

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»



Новосибирск
2021

Всероссийская научная
конференция молодых ученых,
посвященная году науки и технологий в России

НАУКА ТЕХНОЛОГИИ ИННОВАЦИИ

Сборник
научных трудов

Часть 5

г. Новосибирск, 06 – 10 декабря 2021 г.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

НАУКА ТЕХНОЛОГИИ ИННОВАЦИИ

**XV Всероссийская научная конференция молодых
ученых, посвященная Году науки и технологий в России
г. Новосибирск, 06-10 декабря 2021 г.**

**Сборник научных трудов
в 10-и частях**

Часть 5

НОВОСИБИРСК
2021

УДК 62(063)
ББК 72.5я431
Н34

Н34 НАУКА. ТЕХНОЛОГИИ. ИННОВАЦИИ: XV Всероссийская научная конференция молодых ученых, посвященная Году науки и технологий в России (г. Новосибирск, 06-10 декабря 2021 г.) // Сборник научных трудов в 10 ч. / Под ред. Соколовой Д.О. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2021.

ISBN 978-5-7782-4562-4

Часть 5: – 257 с.

ISBN 978-5-7782-4567-9

В сборнике опубликованы материалы научных исследований, представленных на XV Всероссийской научной конференции молодых ученых, посвященной Году науки и технологий в России.

В части 1 сборника представлены материалы по направлению «Информатика, автоматика, вычислительная и измерительная техника». В части 2 сборника представлены материалы по направлению «Информационные технологии математического моделирования и обработки данных». В части 3 сборника представлены материалы по направлению «Технология, оборудование и автоматизация машиностроительных производств. Материаловедение, технологические процессы и аппараты». В части 4 сборника представлены материалы по направлению «Энергетика». В части 5 сборника представлены материалы по направлению «Электротехника, электромеханика и электротехнологии». В части 6 сборника представлены материалы по направлению «Электроника и биомедицинская техника». В части 7 сборника представлены материалы по направлению «Экономика и управление». В частях 8 и 9 сборника представлены материалы по направлению «Гуманитарные науки и современность». В части 10 сборника представлены материалы по направлению «Актуальные проблемы авиаракетостроения».

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Председатель Оргкомитета:

Батаев А.А., д.т.н., профессор, ректор НГТУ

Зам. председателя Оргкомитета:

Брованов С.В., д.т.н., доцент, проректор по научной работе НГТУ

Программный комитет:

Драгунов В.П., д.т.н., профессор, начальник ОПК ВК

Корель И.И., к.ф.-м.н., доцент, декан ФТФ

Осьмук Л.А., д.соц.н., профессор, директор ИСТР

Рева И.Л., к.т.н., доцент, декан АВТФ

Мелехина Е.А., к.п.н., доцент, декан ФГО

Саленко С.Д., д.т.н., профессор, декан ФЛА

Тимофеев В.С., д.т.н., доцент, декан ФПМИ

Овчинникова Н.Н. к.э.н., декан ФБ

Стрельцов С.А., к.т.н., доцент, декан РЭФ

Вильбергер М.Е., к.т.н., доцент, декан ФМА

Тюрин А.Г., к.т.н. доцент, декан МТФ

Русина А.Г., д.т.н. доцент, декан ФЭН

УДК 62(063)

ББК 72.5я431

ISBN 978-5-7782-4567-9 (Ч.5)

© Коллектив авторов, 2021

ISBN 978-5-7782-4562-4

© Новосибирский государственный
технический университет, 2021

Секция ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И СИСТЕМЫ. ТЕХНИЧЕСКАЯ ЭКОЛОГИЯ

**РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ПО ОСАЖДЕНИЮ
ФТОРПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ HW CVD**

С.А. Алехин

**Новосибирский государственный технический университет,
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,
г. Новосибирск, alexin.2017@stud.nstu.ru**

**Научные руководители: Сафонов А.И., к.ф.-м.н.,
Шишкин А.В., к.х.н., с.н.с., доцент**

Разработана автоматизированная установка для проведения процесса осаждения фторполимерных покрытий методом HW CVD. В качестве прекурсора использована окись гексафторпропилена (C_3F_6O). Активация прекурсора проведена с помощью нагрева тонких параллельных нихромовых проволок. Исследовано влияние скорости движения нити активатора на процесс осаждения. Определены параметры, при которых получаемая фторполимерная пленка наиболее равномерно распределена по всей площади кремниевой подложки.

An automated installation has been developed for carrying out the process of deposition of fluoropolymer coatings by the HW CVD method. Hexafluoropropylene oxide (C_3F_6O) was used as a precursor. The precursor was activated by heating thin parallel nichrome wires. The effect of the speed of movement of the activator filament on the deposition process has been investigated. The parameters at which the resulting fluoropolymer film is most uniformly distributed over the entire area of the silicon substrate were determined.

Метод HW CVD (Hot wire chemical vapor deposition) (также называемый каталитическим CVD (Cat-CVD) – осаждение органических и неорганических функциональных пленок при низком давлении на основе разложения прекурсора на нагретой металлической поверхности. После получения первого патента в 1979 г. [1], данная технология была значительно улучшена и в настоящее время является одним из методов для осаждения различных функциональных пленок. В частности, применяя метод HW CVD можно изготавливать высококачественные фторполимерные покрытия и солнечные элементы [2].

Упрощенно схема метода HW CVD изображена на рисунке 1. Основные факторы, влияющие на строение формируемого покрытия:

- температура, скорость движения, материал и площадь нити активатора;
- давление и расход газа-предшественника;
- температура подложки;
- расстояние активатор-подложка.

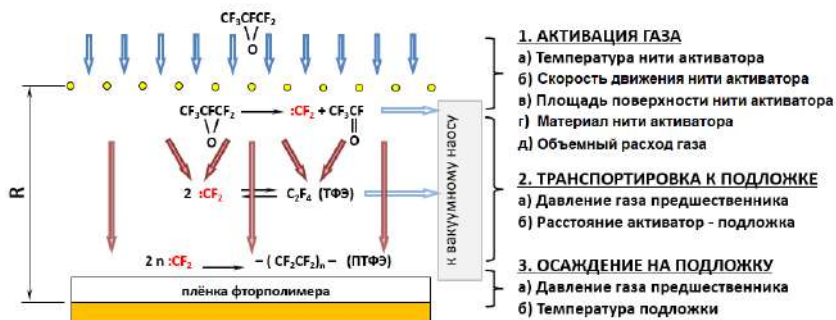


Рис.1 – Схема процесса осаждения фторполимерного покрытия методом HW CVD с указанием основных этапов и параметров, оказывающих влияние на процесс

Установка для проведения осаждения представлена на рисунке 2. Она состоит из вакуумной камеры объёмом около 30 литров, подвижной сетки-активатора и подложкодержателя. Камера откачивается безмасляным вакуумным насосом до остаточного давления 10^{-3} Торр, после чего газ-предшественник (окись гексафторпропилена) подается через регуляторы расхода MKS 1179BX в распылитель потока, расположенный в верхней части камеры. Поток газа проходит через каталитический активатор, представляющий собой перемещающуюся сетку из нихромовой нити диаметром 0,45 мм, находящуюся под напряжением в 30 В.

Температура нити активатора ($570\text{ }^{\circ}\text{C}$) контролировалась по электрическому сопротивлению и контактно, двумя хромель-алюмелевыми термопарами. Под сеткой активатора располагался водоохлаждаемый подложкодержатель диаметром 90 мм. Температура подложкодержателя поддерживалась на уровне $30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Давление газа-предшественника ($0,5$ Торр) в камере во время процесса осаждения регулировалось сильфонным затвором и измерялось емкостным датчиком MKS Varatron 623B. Расход газа-предшественника составлял $466\text{ см}^3/\text{мин}$ в стандартных условиях.

Для приведения сетки-активатора в движение использовался шаговый двигатель, подключенный к микроконтроллеру Arduino Uno. На микроконтроллере была написана программа, реализующая движение сетки с постоянной скоростью.

Для выявления зависимости качества покрытия от скорости движения сетки было проведено 3 эксперимента при разных скоростях: 3,2 мм/с, 6,4 мм/с, 12,7 мм/с.

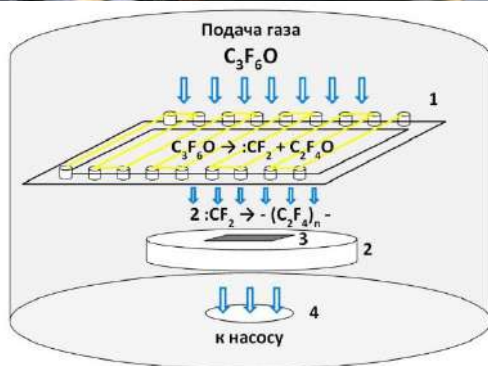


Рис.2 – Экспериментальная установка для проведения осаждения и ее схематичное представление [3]:

1 – проволочный активатор газа-предшественника; 2 – подложко-держатель; 3 – подложки из кремния; 4 – вакуумная откачка

Изображения осажденных покрытий получены с помощью сканирующего электронного микроскопа JEOL JSM-6700F и представлены на рисунке 3. Все полученные образцы характеризуются равномерным покрытием площади подложки. Отсутствуют неравномерности (полосы

шириной 5-10 мм), возникающие в некоторых режимах осаждения с неподвижной сеткой-активатором. Более высокое качество покрытия наблюдается на образце, полученном при скорости движения сетки-активатора 6,4 мм/с (рис. 3*b*).

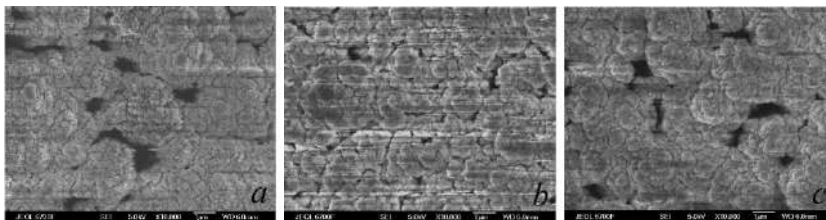


Рис.3 – Покрытия политетрафторэтилена на поверхности кремниевой подложки, полученные при различной скорости сетки-активатора: *a* – 3,2, *b* – 6,4, *c* – 12,7 мм/с

Таким образом, в результате проделанной работы были получены равномерные покрытия фторполимерного материала. Определена оптимальная скорость движения активатора. Разработанная установка может применяться для осаждения фторполимерных и других полимерных покрытий с заранее заданной структурой.

Литература:

1. A-Si : H produced by high-temperature thermal decomposition of silane / [H. Wiesmann](#), [A. K. Ghosh](#), [T. McMahon](#), [M. Strongin](#) // Journal of Applied Physics. – 2005. – Vol. 50. - P. 3752-3754. – [doi: 10.1063/1.326284](#).
2. Grain boundaries and impurities in CdTe/CdS solar cells / K. Durose, M.A. Cousins, D.S. Boyle, J. Beier, D. Bonnet // Thin Solid Films (c). – 2002. – Vol. 403-404. – P. 396–404. – [doi: 10.1016/S0040-6090\(01\)01518-8](#).
3. The influence of precursor gas pressure on structure and properties of fluoropolymer coatings by hot wire CVD / Safonov A., Sulyaeva V., Kubrak K., Starinskiy S., Timoshenko N // Europ. Phys. J. Conf. – 2017. – Vol. 159, iss. 5. – P. 42. – [doi: 10.1051/epjconf/201715900042](#).

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МГД-ПЕРЕМЕШИВАТЕЛЯ С НЕСИНУСОИДАЛЬНЫМ ТОКОМ

А.Ю. Олзоев, Г. П. Балабанов

**Сибирский федеральный университет,
г. Красноярск, viktortim0807@mail.ru**

Научный руководитель: Тимофеев В. Н., д.т.н., профессор

В работе рассмотрены магнитогидродинамические (МГД) перемешиватели, питаемые током несинусоидальной формы. Построена расчётная модель МГД-перемешивателя, на основе которой получены аналитические выражения для электромагнитных характеристик МГД-перемешивателя. Предлагаемая методика позволяет анализировать электромагнитные процессы в МГД-перемешивателях с различными индукторами, обмотки которых питаются периодическим несинусоидальным током произвольной формы.

The paper considers magnetohydrodynamic (MHD) stirrers powered by a non-sinusoidal current. A computational model of the MHD stirrer is constructed, on the basis of which analytical expressions for the electromagnetic characteristics of the MHD stirrer are obtained. The proposed technique makes it possible to analyze electromagnetic processes in MHD stirrers with various inductors, the windings of which are fed by a periodic non-sinusoidal current of arbitrary shape.

В последние годы увеличился выпуск и потребление сплавов на основе алюминия, в производстве высококачественных сплавов важной операцией является гомогенизация химического состава и температуры расплава (жидкого металла) во всем объеме ванны печи-миксера. Использование МГД-перемешивателей позволяет автоматизировать процесс гомогенизации, сократить время приготовления и уменьшить расход энергии на производство сплавов [1]. МГД – перемешиватели с синусоидальными токами имеют в ряде случаев низкие эффективность, КПД и коэффициент мощности. Особенно низкая эффективность проявляется при устранении микронеоднородностей экономнолегированных многокомпонентных расплавов на молекулярном уровне.

Возможным способом улучшения эффективности МГД-перемешивания и повышения его энергетических характеристик является применение питающего тока несинусоидальной формы [2].

Целью настоящей работы является расчет электромагнитного поля и анализ электромагнитных характеристик МГД-перемешивателя жидких металлов с несинусоидальным током.

Расчетная модель и уравнения электромагнитного поля. Анализ электромагнитного поля (ЭМП) произведен аналитическим методом. На рисунке 1 представлена расчетная модель МГД-перемешивателя. Здесь участок **1** ($0 \leq z \leq \delta'$) – зазор между индуктором и расплавом в миксере. А участок **2** ($\delta' \leq z < +\infty$) – расплав металла в ванне миксера.

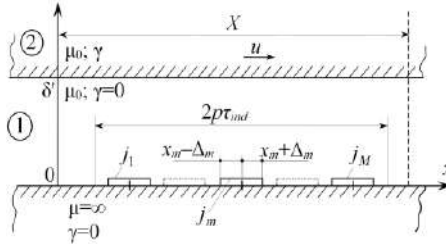


Рис.1 – Расчётная модель МГД

В расчетной модели индуктор МГД – перемешивателя представлен гладким, а пазы с обмоткой заменены токовыми слоями с линейной плотностью:

$$j_m(t) = \frac{W_m i_m(t)}{2\Delta m}. \quad (1)$$

Здесь W_m и $i_m(t)$ – число витков и мгновенное значение тока в m -ом пазу; $2\Delta m$ - ширина m -ого паза.

Линейную плотность тока индуктора можно представить в виде двойного ряда Фурье по kn гармоникам.

$$j_{kn}(t, x) = 4J_{kn} e^{i\xi_k t} \cdot e^{ik_n x} \cdot e^{i\sigma_{kn}}. \quad (2)$$

Здесь $j_{kn} = \frac{1}{X} \int_0^X j_{km}(x) e^{-ik_n x} dx$; $j_{km} = j_k e^{-ik(m-1)\frac{2\pi}{M}}$

– комплексная линейная плотность тока m -ого паза.

$$j_k = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) e^{-i\xi_k t} dt = |j_k| e^{i\alpha_k}; \quad \xi_k = \frac{2k\pi}{T}; \quad k_n = \frac{2n\pi}{X},$$

где T , X – периоды разложения линейной плотности тока в ряды Фурье по времени и координате x .

Поскольку источником ЭМП является электрический ток в пазах индуктора, то напряженность $E(t, x, z)$ можно также представить в виде двойного ряда Фурье, с kn гармониками.

$$E_{kn}(t, x, z) = \tilde{E}_{kn}(z) e^{i\xi_k t} \cdot e^{ik_n x} \cdot e^{i\sigma_{kn}}. \quad (3)$$

Здесь для $\tilde{E}_{kn}(z)$ справедливы обыкновенные дифференциальные уравнения.

$$\frac{d^2 \tilde{E}_{1kn}}{dz^2} - k_n^2 \tilde{E}_{1kn} = 0; \quad \frac{d^2 \tilde{E}_{2kn}}{dz^2} - \underline{\varphi}_{kn} \tilde{E}_{2kn} = 0, \quad (4)$$

$$\underline{\varphi}_{kn} = k_n^2 + i \xi_k \mu_0 \gamma + i k_n \mu_0 \gamma u. \quad (5)$$

где u – скорость движения расплава по оси абсцисс, м/с;
 γ – удельная электропроводность расплава, Ом⁻¹·м⁻¹;
 μ_0 – магнитная постоянная, $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Решением математической модели для \tilde{E}_{1kn} является выражение:

$$\tilde{E}_{1kn}(z) = i \xi_k \mu_0 \frac{J_{kn}}{k_n} \left[\frac{k_n \operatorname{ch} k_n (z - \delta) - \underline{\varphi}_{kn} \operatorname{sh} k_n (z - \delta)}{k_n \operatorname{sh} k_n \delta + \underline{\varphi}_{kn} \operatorname{ch} k_n \delta} \right]. \quad (6)$$

Комплексная электромагнитная мощность kn -й гармоники, передаваемая от индуктора в расплав равна:

$$\underline{S}_{kn}^{3M} = l \cdot L \cdot \tilde{E}_{1kn}(0) \cdot J_{kn}^* = P_{kn}^{3M} + i Q_{kn}^{3M}. \quad (8)$$

$$P_{kn}^{3M} = l \cdot L \cdot J_{kn}^2 X_{kn}; \quad (9)$$

$$Q_{kn}^{3M} = l \cdot L \cdot J_{kn}^2 Y_{kn} \quad (10)$$

$$X_{kn} + i Y_{kn} = i \left[\frac{k_n \operatorname{ch} k_n \delta + \underline{\varphi}_{kn} \operatorname{sh} k_n \delta}{k_n \operatorname{sh} k_n \delta + \underline{\varphi}_{kn} \operatorname{ch} k_n \delta} \right] \quad (11)$$

Также l и L – длина и ширина индуктора МГД – перемешивателя.

Полные активная и реактивная электромагнитные мощности индуктора получаются суммированием мощностей по k и n гармоникам. Аналогично определяются электромагнитные силы, действующие на расплав. Подключение многофазной обмотки индуктора МГД-перемешивателя жидкого металла к источнику несинусоидального периодического тока, позволяет получать различные формы мгновенной мощности и электромагнитной силы [3].

На рисунке 2 представлены зависимости мгновенной мощности МГД-перемешивателя при подключении его обмотки к источнику прямоугольного периодического напряжения.

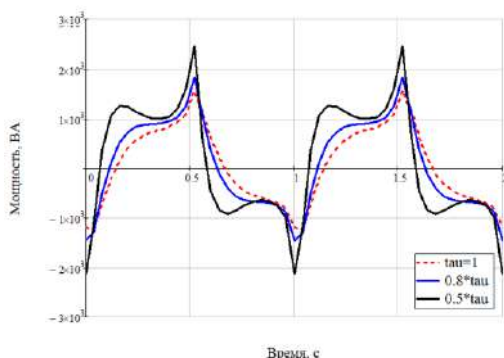


Рис. 2 – Мгновенное значение полной мощности

В зависимости от свойств легирующих элементов, добавляемых в расплав, подбираются форма тока, питающего обмотку индуктора так, чтобы получаемые параметры электромагнитного поля вызывали пульсации электромагнитных мощностей и сил, что в последствии позволит ликвидировать значительную часть макро- и микронеоднородностей в объёме расплава.

Литература:

1. Применение МГД устройств в металлургии: Учебное пособие / Под ред. В.Н. Тимофеева, Е.А. Головенко, Е.В. Кузнецова – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2007.

2. Патент 2524463 Российская Федерация, МПК F27 D27/00 B01 F13/08. Индукционная установка для перемешивания жидких металлов. /В. Н. Тимофеев, Г. Ф. Лыбзиков, М. Ю. Хацаюк, М. А. Ерёмин; заявитель и патентообладатель Тимофеев Виктор Николаевич. – № 2012146779/02; заявл. 01.11.12; опубл. 27.07.14, Бюл. № 21. – 14 с.

3. Магнитогидродинамические перемешиватели жидких металлов с несинусоидальными токами / В. Н. Тимофеев, Г. Ф. Лыбзиков, М. Ю. Хацаюк, М. А. Еремин, С. П. Тимофеев // Журнал Сибирского федерального ун-та. Серия: техника и технологии. – 2013. – Том 6. – № 2. – С. 166-177.

ИНДУКЦИОННАЯ ВАКУУМНАЯ ПЕЧЬ ДЛЯ ПЛАВКИ КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА

Ю.Ю. Перевалов, М.Р. Ермекова, Т.П. Козулина
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ», г. Санкт-Петербург, yuperevalov@vandex.ru
Научный руководитель: Перевалов Ю.Ю., к.т.н., доцент

В статье описана разработка численной модели индуктора и графитового тигля для индукционной вакуумной печи и эксперимент по доведению вакуумной печи до рабочей температуры. Проведено сравнение результатов численного моделирования и реального эксперимента.

The article describes the development of numerical model of an inductor and a graphite crucible for an induction vacuum furnace and the experiment to bring the vacuum furnace to an operating temperature. The results of numerical simulation and a real experiment were compared.

Основой разработки является печь с резистивным нагревом, имеющая низкий КПД и неустойчивый режим работы из-за пробоев проводника.

Численное моделирование индукционной системы для печи проводилось в программе UNIVERSAL 2D. Моделируемая индукционная система состоит из индуктора, загрузки и футеровки.

Индуктор разделен на три параллельные секции. Высота индуктора составляет 880 мм, внутренний диаметр – 450 мм. Высота одной секции равна 280 мм, расстояние между секциями – 20 мм. Количество витков одной секции – 8, коэффициент заполнения индуктора равен 0,514.

В качестве загрузки выступает графитовый тигель, который имеет следующие параметры: длина – 1500 мм, внешний диаметр – 330 мм, внутренний диаметр – 300 мм. Начальная температура – 20 °С.

Футеровка разрабатываемой печи состоит из двух слоев толщиной 30 мм каждый: из углеродного теплоизоляционного материала УТМ-1 и

огнеупорного керамического волокна Fiberfrax. Длина (высота) футеровки равна 1500 мм, внутренний радиус – 166 мм.

Стадий расчета – 8; шаг по времени, влияющий на длительность и точность расчета – 30 с; максимальное выходное напряжение источника – 400 В; номинальная мощность – 250 кВт; частота тока – 4 кГц.

Результат численного моделирования процесса нагрева графитового тигля в печи представлен на рисунке 1 в виде распределения температуры вдоль загрузки.

В ходе моделирования был произведен замер температуры загрузки под индуктором, напряжения и мощности с интервалом 10 мин в процессе нагрева.

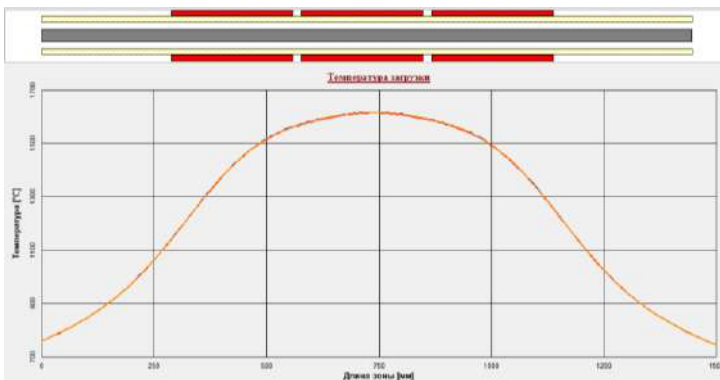


Рис.1 – Распределения температуры вдоль загрузки

На рисунке 2 изображен эскиз вакуумной печи с индуктором. Термопара Т1 расположена на крышке графитового тигля, по ней ведется контроль рабочей температуры, термопара Т2 находится в подвешенном состоянии и измеряет температуру атмосферы печи.



Рис.2 – Эскиз вакуумной печи с индуктором

Одно из технологических отверстий печи было модифицировано под смотровое окно диаметром 40 мм для наблюдения за процессами в печи. Напротив окна расположено зеркало для наблюдения за нижней частью печи, которая оборудована нижним подом для загрузки-выгрузки.

При плавке кварцевого песка необходимо откачивать из него всю жидкость и воздух, иначе в стекле образуются пузыри, или оно мутнеет. Удаление воздуха происходит за счет насоса, который создает вакуум.

Загрузка состоит из двух графитовых цилиндров разного диаметра с крышками, между которыми насыпан мелкий белый кварцевый песок. Высота загрузки – 150 мм, диаметр – 150-200 мм. Для улучшения газоотвода сделаны отверстия диаметром 1,5 мм в загрузке, графитовых цилиндрах и крышках, а также оставлены зазоры между шамотными кирпичами, на которых стоит тигель. Газоотвод из загрузки идет снизу.

На рисунке 3 изображен вид печи изнутри: контрольная термопара Т1, измеряющая температуру крышки тигля, индуктор и его выводы, двойная теплоизоляция, зеркало напротив смотрового окна и большая труба, ведущая к вакуумному насосу.



Рис.3 – Вид печи изнутри

Было проведено несколько кратковременных включений печи, в ходе которых температура тигля достигла 300-400 °С.

При подготовке к основному пуску печи тигель нагрели до 700 °С. В закрытой печи был произведен нагрев, после чего печь заполнили азотом и открыли нижний под, чтобы увидеть зону нагрева тигля. Термопара измеряет температуру крышки печи, а температура под индуктором остается неизвестной, но она больше температуры крышки.

В открытом состоянии печи, при измерении температуры с помощью пирометра, под индуктором значение температуры составляет порядка 700 °С, а температура крышки – около 400 °С.

В ходе данного эксперимента был произведен замер температуры на крышке тигля, температуры атмосферы внутри печи и температуры воды на выходе с интервалом в 10 мин.

Далее было проведено сравнение результатов численного моделирования процесса нагрева и реального нагрева тигля в печи.

На рисунке 4 представлен график температурного режима для результатов численного моделирования и физического эксперимента.

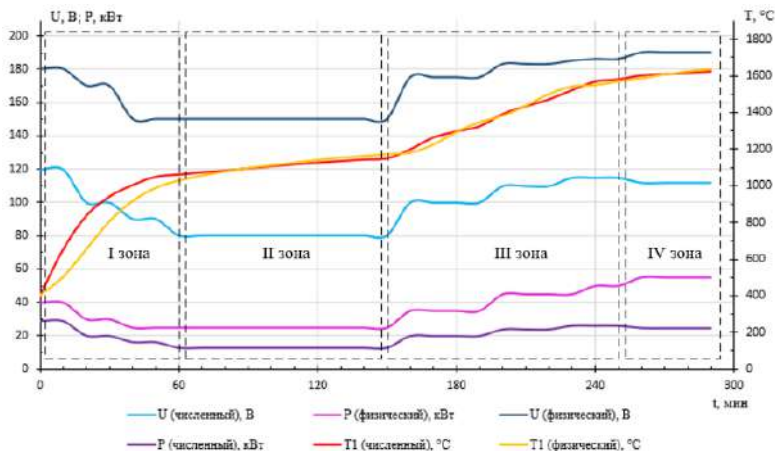


Рис.4 – График температурных режимов при численном моделировании и физическом эксперименте

После сравнения кривых на графике температурных режимов можно сделать вывод, что результаты численного моделирования и физического эксперимента очень близки друг к другу.

Кривые температур T1, как в численном моделировании, так и при физическом эксперименте, практически идентичны. Однако, значения напряжения и мощности немного различаются. Это объясняется тем, что в расчетной модели при численном моделировании не учитывались тепловые потери на нагрев корпуса и подводящих кабелей.

Работа выполнена в рамках НИОКР НП/ПОПР-15 "Разработка цифровых интеллектуальных комплексов электромагнитной обработки материалов" СПбГЭТУ "ЛЭТИ".

Литература:

1. Чмиленко Ф.В. Моделирующие комплексы проектирования и управления системами индукционного нагрева: дисс. канд. техн. наук / СПбГЭТУ «ЛЭТИ», СПб, 2018.
2. Матюхин В.И. Конструкция и расчет индукционных тигельных печей: учеб. пособие. Екатеринбург: Изд-во УГТУ-УПИ, 2003. 61 с.
3. Индукционные тигельные печи: учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. / Л.И. Иванова, Л.С. Грובהва, Б.А. Сокунов, С.Ф. Сарпулов. Екатеринбург: Изд-во УГТУ-УПИ, 2002. 87 с.
4. Демидович В. Б., Чмиленко Ф.В. Компьютерное моделирование устройств индукционного нагрева. СПб.: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. 167 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ОПЛАВЛЕНИИ НАПЫЛЕННОГО КОРРОЗИОННОСТОЙКОГО ПОКРЫТИЯ В ИНДУКЦИОННОЙ УСТАНОВКЕ С ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ НА ОСНОВЕ ШАГОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

М.А. Федин, С.С. Кондрашов, Б. Чень
Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
г. Москва, SSKondrashov@yandex.ru
Научный руководитель: Федин М.А., д.т.н., доцент

Рассматривается процесс индукционного оплавления напыленных коррозионностойких покрытий стальных деталей. Разработан экспериментальный стенд, состоящий из установки индукционного нагрева, электроприводов с шаговыми двигателями для перемещения обрабатываемой заготовки и системы управления технологическим процессом. Проведены расчеты и исследование распределения термических напряжений, возникающих в обрабатываемой заготовке при ее индукционном нагреве и вращении.

The process of induction melting of sprayed corrosion-resistant coatings of steel parts is considered. An experimental stand has been developed, consisting of an induction heating unit, electric drives with stepper motors for moving the workpiece to be processed, and a process control system. Calculations and research of the distribution of thermal stresses arising in the workpiece being processed during its induction heating and rotation have been carried out.

Сегодня для предотвращения воздействия коррозии на металлические конструкции и эффективного продления срока службы изделия применяют такие технологии как электролитическое осаждение, гуммирование, покраска, газотермическое напыление и др. Анализ показывает, что одним из самых простых в реализации, эффективных и экономичных способов является газопламенное порошковое напыление [1].

Покрытие, полученное в результате напыления, по своей структуре является в значительной степени пористым. В некоторых случаях это свойство можно использовать, но, как правило, требуются плотные покрытия с низким содержанием пор, в том числе для упрочнения детали и повышения износостойкости [2]. Также существенным недостатком газопламенных покрытий является их относительно невысокая адгезионная прочность. Эффективным является оказание влияния на эти факторы с помощью последующего дополнительного высокоэнергетического воздействия на напыленное покрытие для улучшения качествен-

ных показателей покрытия. Проведенный сравнительный анализ позволил установить, что в условиях комбинированной обработки наиболее предпочтительным способом температурного воздействия на напыленные покрытия является индукционный нагрев токами средней и высокой частоты. Способ имеет характерное преимущество – оплавление производится непосредственно в узкой зоне сцепления поверхности с покрытием без нагрева самого изделия.

Предложенная авторами технология нанесения защитного покрытия разделяется на два этапа: напыление порошка при помощи специальной газопламенной горелки и последующее расплавление для фиксации на детали при помощи индукционного нагрева [3]. В [4] рассмотрен процесс оплавления коррозионностойкого покрытия с применением индукционной установки, в которой вращение изделия и перемещение индуктора осуществлялось с использованием асинхронных двигателей.

Предлагается оснастить индукционную установку шаговыми двигателями (Рисунок 1), один из которых будет перемещать индуктор, а второй – вращать изделие с нанесенным покрытием, осуществить синтез системы управления и программирование контроллеров плат управления электроприводами. Такое решение позволит повысить точность управления технологическим процессом, уменьшить размеры и снизить стоимость установки.



Рис. 1 – Конструкция шагового электродвигателя и платы управления

В качестве объекта исследования и моделирования выбрана индукционная установка, которая используется для оплавления напыленного коррозионностойкого покрытия Castolin Eutalloy RW 12496 цилиндрической заготовки из стали 45. Геометрические размеры заготовки: диаметр – 16 мм, общая длина – 120 мм, длина защитного покрытия, наносимого на заготовку – 100 мм, толщина наносимого покрытия – 1 мм, твёрдость HRC заготовки до нанесения защитного покрытия – 21.

Отличительной особенностью рассматриваемой системы «индуктор – загрузка – электропривод» является ее мультифизичность. В [3 – 4] рассматривалось решение электромагнитной и тепловой задачи. В данной работе рассматривается решение механической задачи в пакете Induction Systems [5] для расчета и исследования термических напряже-

ний, возникающих при индукционном оплавлении покрытия и ее вращения шаговым электродвигателем.

Решение механической задачи в пакете Induction Systems показывают, что максимальный перепад температур $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ достигается на первой стадии нагрева. В конце первой стадии при достижении температуры точки Кюри разница между температурой поверхности и центра невелика и составляет $68\text{ }^{\circ}\text{C}$. После точки Кюри процесс нагрева замедляется и уменьшается перепад температур между центром изделия и поверхностью. Нагрев продолжается в таком режиме до достижения температуры $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Рисунок 2).

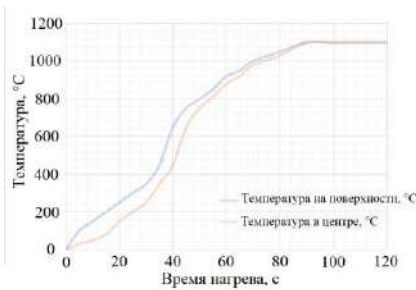


Рис. 2 – Температура внутри и на поверхности заготовки от времени

Распределения термических напряжений на начальной стадии нагрева заготовки и напыления, полученные в пакете COMSOL, при различных частотах представлены на Рисунке 3.

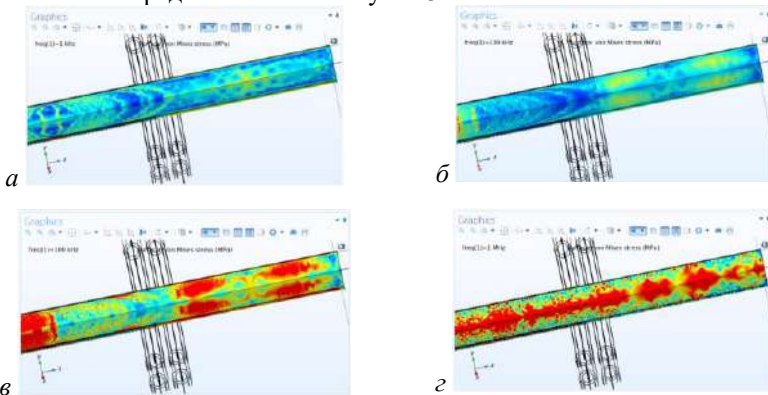


Рис. 3 – Распределение термических напряжений на начальной стадии нагрева заготовки и напыления при различных частотах:

а – 1 кГц; *б* – 35 кГц; *в* – 100 кГц; *г* – 1 МГц

Максимум термонапряжений (Рисунок 4) приходится на момент времени 22 с, когда $\sigma = 299$ МПа, при этом максимальное значение напряжения меньше предела текучести материала.

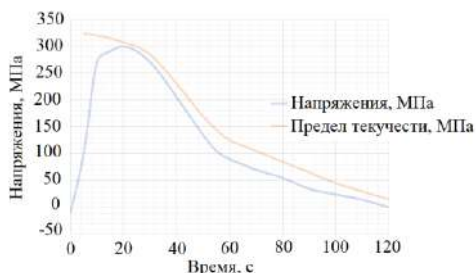


Рис. 4 – Зависимость термонапряжений в центре заготовки от времени нагрева на частоте 35 кГц

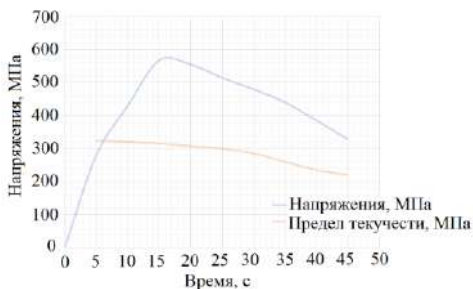


Рис. 5 – Зависимость термонапряжений в центре заготовки от времени нагрева на частоте 100 кГц

При нагреве с частотой 100 кГц (Рисунок 5) возникающие напряжения превышают предел текучести на первой стадии нагрева достигая значения $\sigma_Z = 568$ МПа.

Из результатов моделирования видно, что, благодаря скоростным режимам индукционного нагрева, в начальный период оплавления термические напряжения в обрабатываемой заготовке достигают своих наибольших значений и при определенных условиях могут превышать предел текучести материала, поэтому очень важным является правильный выбор частоты тока индуктора (в рассматриваемом примере – 35 кГц). После достижения покрытия температуры точки Кюри (358 °С) и до завершения технологического процесса неравномерность температурного поля по сечению заготовки снижается, поэтому термические напряжения также снижаются и при частотах до 66 кГц не превышают значения предела текучести, снижающегося в ходе нагрева заготовки.

При более высоких частотах (например, при частоте 100 кГц) термонапряжения в заготовке превышают значение предела текучести и на этом этапе оплавления, что также не является допустимым.

Литература:

1. Кудинов В. В., Бобров Г.В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование. – М.: Metallurgy, 1992. – 432 с.
2. Защита от коррозии, старения и биоповреждений машин, оборудования и сооружений. Справочник. Под ред. А.А. Герасименко. – М.: Машиностроение, 1987: Том 1, – 688 с.
3. Федин М.А., Кувалдин А.Б. и др. Разработка методики расчета индукционной установки для оплавления коррозионностойких покрытий // Фёдоровские чтения – 2020: L Междунар. научно-практич. конф. с элементами научной школы. – М.: Издательский дом МЭИ, 2020. – С. 139 – 146.
4. Кондрашов С.С., Кулешов А.О., Федин М.А. Применение индукционного нагрева для оплавления напыленного коррозионностойкого покрытия. НАУКА. ТЕХНОЛОГИИ. ИННОВАЦИИ // Сборник научных трудов в 9 ч. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2019. – С. 54 – 58.
5. Кувалдин А.Б., Лепешкин А.Р. Скоростные режимы индукционного нагрева и термонапряжения в изделиях: монография / – М.: ИНФРА-М, 2019. - 273 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКЕ ПЛОСКИХ ЗАГОТОВОК ИЗ АЛЮМИНИЯ

А. С. Мельников, В. Е. Парменов, Ю. Ю. Перевалов
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина),
г. Санкт-Петербург, asmelnikov.spb@yandex.ru
Научный руководитель: **Перевалов Ю.Ю., к.т.н., доцент**

В работе рассматриваются электромагнитные и тепловые процессы, протекающие при магнитно-импульсной обработке круглых заготовок из алюминия. Представлены результаты исследования распределения импульсного магнитного поля внутри тонкостенной плоской заготовки. Представленные результаты получены с использованием двумерной конечно-элементной модели.

The work examines the electromagnetic and thermal processes occurring during the magnetic-pulse processing of round aluminum workpieces. The results of a study of the distribution of a pulsed magnetic field inside a thin-walled flat workpiece are presented. The presented results were obtained using a two-dimensional finite element model.

Магнитно-импульсная обработка – это процесс обработки металлов давлением, в котором деформирующее усилие формируется за счет магнитных сил отталкивания между индуктором, по которому протекает импульсный ток большой амплитуды и заготовкой, по которой протекает вихревой ток, порожденный явлением магнитной индукции. Форма импульсного тока в магнитно-импульсной технологии – затухающая синусоида, скорость затухания которой определяется относительным декрементом затухания разрядного контура [1].

В данной работе будут рассмотрены только электромагнитные и тепловые процессы, происходящие при подобном воздействии на обрабатываемый металл.

Эскиз реальной системы «индуктор-заготовка» для плоской магнитно-импульсной штамповки представлен на рисунке 1. Индуктор располагается над заготовкой с некоторым зазором (в данном случае – 2 мм). Неподвижность индуктора в процессе работы обеспечивает прочный каркас из непроводящего материала. Обрабатываемая заготовка размещается на матрице, изготовленной из прочного и, предпочтительно, непроводящего материала. В процессе обработки заготовка вдавливается в матрицу и приобретает необходимую форму. В данной работе, заготовка считается неподвижной. На рисунке 1 представлен общий вид геометрии.

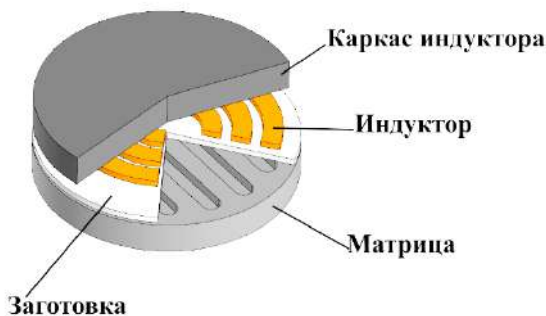


Рис. 1 – Эскиз индукционной системы

Мгновенное значение электромагнитного давления на обрабатываемый материал можно определить с помощью следующего выражения:

$$P_m = \frac{\mu_0}{2} (H_{m1}^2 - H_{m2}^2), \quad (1)$$

где H_{m1} – величина напряженности магнитного поля в зазоре между индуктором и заготовкой, А/м; H_{m2} – величина напряженности магнитного поля, прошедшей через заготовку, А/м.

Как видно, для вычисления давления магнитного поля на материал достаточно определить напряженность магнитного поля в точках, расположенных на поверхностях плоской заготовки.

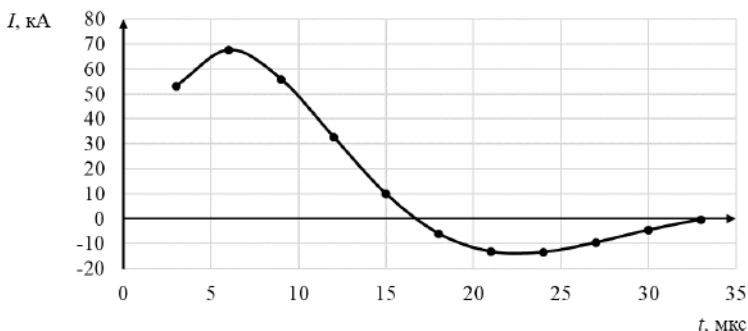


Рис. 2 – Временная зависимость тока индуктора

Исходя из численного моделирования, было установлено, что основное усилие приходится на область заготовки, находящуюся под 2 и 3 витками индуктора, а магнитное поле центрального витка сосредоточено на оси индуктора, что может быть вызвано его близостью к витку, по которому течет встречный ток. Также можно заметить, что силовое воздействие, оказываемое индуктором на самого себя, превышает давление на заготовку. Причем, наблюдаются не только силы отталкивания между индуктором и заготовкой, но и значительные силы отталкивания между витками индуктора [2].

По итогам проделанной работы было определено, что для достижения необходимой для деформации алюминия величины магнитного давления (30 МПа) по индуктору должен протекать импульсный ток амплитудой не менее 70 кА. Также было установлено, что геометрия рассматриваемой системы является неудачной – магнитное давление, создаваемое индуктором в центре заготовки, сильно меньше, чем на

остальной её площади. Данная проблема может быть решена путем увеличения внутреннего диаметра индуктора, а также уменьшением зазора между индуктором и заготовкой.

Работа выполнена в рамках НИОКР НП/ПОПР-15 "Разработка цифровых интеллектуальных комплексов электромагнитной обработки материалов" СПбГЭТУ "ЛЭТИ".

Литература:

1. A Review on Electromagnetic Forming Process. Dhiraj Gayakwada, Mahesh Kumar Dargara, Pramod Kumar Sharmaa, Rajesh purohitb, R.S.Rana. 3rd International Conference on Materials Processing and Characterisation (ICMPC 2014). Procedia Materials Science 6 (2014) pp.520 – 527
2. Magnetic pulse processing of materials: monograph / A.B.Prokofiev [and others] – Samara: «Izdatelstvo Samarskiy Nauchniy centr» [Samara science centre publishing], 2019. – 140 p. (in Russian).

РАЗРАБОТКА ПРОТОТИПОВ ДАТЧИКОВ ПОТЕРЬ ПУЧКА ДЛЯ СИБИРСКОГО КОЛЬЦЕВОГО ИСТОЧНИКА ФОТОНОВ

А.А. Морсина

**Новосибирский государственный технический университет,
Институт ядерной физики им. Будкера СО РАН,
г. Новосибирск, annamorsina90157@gmail.com**

Научный руководитель: Мальцева Ю. И., научный сотрудник

Для обеспечения надежной работы Сибирского кольцевого источника фотонов (СКИФ) необходима система диагностики потерь пучка. Было выбрано два типа датчиков – оптоволоконный на основе черенковского излучения и сцинтилляционный. Данная работа посвящена разработке прототипов выбранных датчиков потерь пучка для СКИФ. С помощью численного моделирования проведена калибровка и определено оптимальное местоположение датчиков. В экспериментах с электронным пучком была исследована работа датчиков.

To ensure reliable operation of the Siberian ring source of photons (SKIF), beam loss diagnostics system is required. Two types of monitors – fiber-based on the Cherenkov radiation and scintillator-based were chosen. This work is devoted to the development of prototypes of the selected beam loss monitors for SKIF. Using numerical simulations, the monitor signals

were calibrated, and their optimal positions were selected. In experiments with an electron beam the monitor operation was studied.

В настоящий момент в Новосибирске строится источник синхротронного излучения поколения «4+» с энергией 3 ГэВ и эмиттансом 75 пм·рад [1]. СКИФ должен обеспечивать пользователей, работающих на станциях, пучками синхротронного излучения в режиме непрерывной работы, из-за чего к стабильности электронного пучка предъявляются повышенные требования. Для минимизации потерь пучка необходима диагностика потерь, которая должна обеспечивать надежную работу СКИФ. Для этой цели были выбраны два типа датчиков на основе оптического излучения. Для линейного ускорителя и транспортных каналов был выбран оптоволоконный датчик на основе черенковского излучения. Для накопительного кольца, работающего в режиме непрерывной инжекции, была выбрана система сцинтилляционных датчиков.

Для внедрения выбранных датчиков потерь пучка на СКИФ необходимо создать прототипы датчиков и протестировать их на действующих ускорительных комплексах Института ядерной физики (ИЯФ). Схема комплексов представлена на рис. 1.

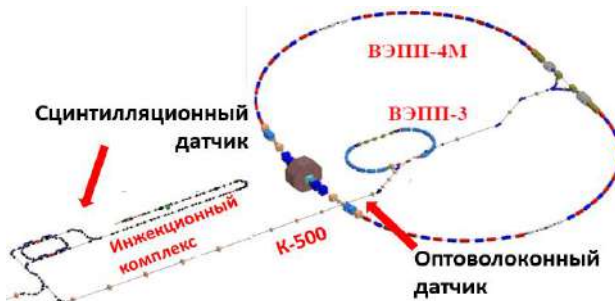


Рис. 1 – Схема ускорительных комплексов ИЯФ, стрелками обозначено положение датчиков потерь пучка

Оптоволоконный датчик потерь пучка

Принцип работы оптоволоконного датчика основан на регистрации черенковского излучения, генерируемого вторичными заряженными частицами в оптоволокне, протянутом вдоль вакуумной камеры. Излучение за счет полного внутреннего отражения распространяется по оптоволокну на границе сердцевина-оболочка и регистрируется фотоэлектронным умножителем (ФЭУ), подсоединенным к торцу волокна. По временной задержке сигнала с ФЭУ определяется место потери пучка, а

по интенсивности сигнала оценивается количество потерянных частиц [2].

Для прототипа оптоволоконного датчика было выбрано пластиковое оптоволокно Broadcom «HFBR-RUS» длиной 35 м, диаметром сердцевины 0.94 мм и числовой апертурой 0.47, выбран ФЭУ на микроканальных пластинах и АЦП с частотой дискретизации 5 Гвыб/с.

Для калибровки датчика проводилось численное моделирование на основе метода Монте-Карло в программе FLUKA. Для моделирования потери задавался электронный пучок, падающий на стенку вакуумной камеры под малым углом, характерным для потери. В результате полученного распределения вторичных частиц ливня по поверхности вакуумной камеры и количества черенковских фотонов, регистрируемых датчиком, была проведена калибровка сигнала по абсолютной величине потерь.

Прототип был протестирован с электронным пучком в транспортном канале К-500. Распределения потерь пучка вдоль канала показаны на рис. 2, цветной областью обозначены места потери пучка на структуре. Датчик локализует места потерь с точностью около 1 м. С помощью калибровочного коэффициента был рассчитан процент теряемых частиц пучка от первоначального. Полученные при помощи моделирования значения величины потерь хорошо согласуются с экспериментальными данными. Информация о количестве потерянных частиц на выбранном промежутке была получена по датчикам тока.

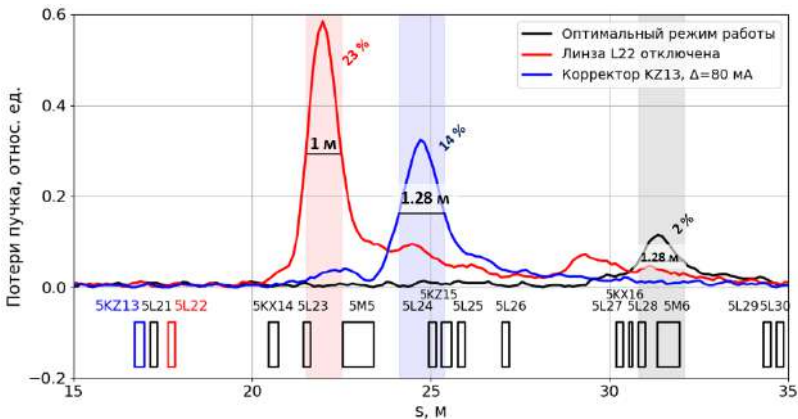


Рис. 2 – Распределение потерь электронного пучка в канале К-500. Снизу магнитная структура канала. Красная линия – потери, вызванные отключением линзы «L22», синяя линия – потери, вызванные изменением силы магнитного корректора «KZ13».

Сцинтилляционный датчик потерь пучка

Сцинтилляционные датчики детектируют заряженные частицы и гамма-кванты, пролетающие через объем сцинтиллятора. Сцинтилляционный свет регистрируется при помощи ФЭУ, подсоединенного к торцу сцинтиллятора [3].

В качестве прототипа был выбран цилиндрический сцинтиллятор из полистирола длиной 10 см и диаметром 2 см, обернутый светоотражающим алюминизированным лавсаном для максимального светосбора. Был выбран ФЭУ Hamamatsu R1924A, диаметр которого согласован с сечением сцинтиллятора, а его максимум спектральной чувствительности соответствует максимуму спектра высвечивания сцинтиллятора.

В циклических ускорителях в штатном режиме их работы потери наиболее вероятны в местах с большим поперечным размером пучка, что связано с более высокими значениями структурных функций ускорителя [4]. Моделирование проводилось для циклического коллайдера ВЭПП-4 на участке с максимальным значением структурных функций. На основе полученных распределений, представленных на рис. 3, был рассчитан калибровочный коэффициент, а также было определено оптимальное положение датчика – датчик будет размещен с внутренней стороны кольца на расстоянии 5 см после квадрупольного магнита.

В результате первого тестирования датчика в транспортном канале ускорительного комплекса при потере электронного пучка ~ 0.1 пКл амплитуда сигнала с датчика составила около 0.5 В, а длительность сигнала 72 нс, что согласуется со значением времени высвечивания сцинтиллятора на основе полистирола.

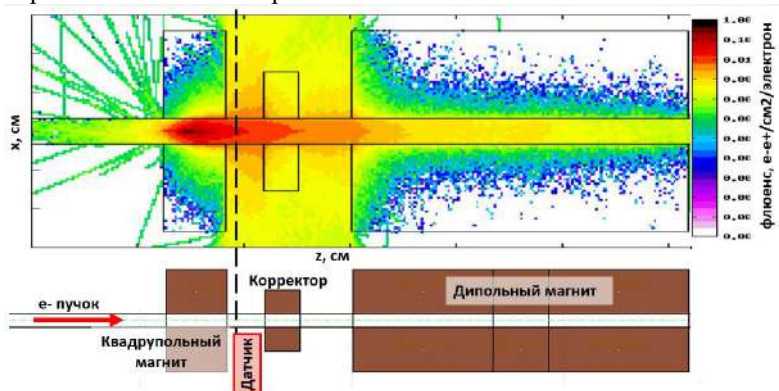


Рис. 3 – Флюенс вторичных частиц при потере электронного пучка в коллайдере ВЭПП-4, снизу показаны магнитные элементы участка кольца и планируемое расположение сцинтилляционного датчика

Для системы диагностики потерь пучка на СКИФ были выбраны оптоволоконный и сцинтилляционный датчики потерь. С помощью численного моделирования проведена калибровка сигналов датчиков и определено их оптимальное местоположение. В результате работы с пучком на действующих ускорительных комплексах ИЯФ были протестированы прототипы выбранных датчиков.

Литература

1. Инжекционная система для Сибирского кольцевого источника фотонов / С. М. Гуров, В. Н. Волков, К. В. Золотарев, А. Е. Левичев // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2020. – № 7. – С. 3–7.
2. Мальцева Ю. И. Оптоволоконный датчик потерь пучка на основе черенковского излучения для Инжекционного комплекса ВЭПП-5: дис. канд. физ.-мат. наук: 01.04.20. – Новосибирск, 2021. – 122 с.
3. Онучин А. П. Экспериментальные методы ядерной физики. — Новосибирск: НГТУ, 2010. — 220 с.
4. Wittenburg K. Beam loss monitors // CAS – CERN Accelerator School: Course on Beam Diagnostics, Dourdan, France, 28 May – 6 June 2008: Conference proceedings. – Geneva, 2009. — P. 249–280.

ЦИФРОВАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ИСТОЧНИКОМ ПИТАНИЯ ДЛЯ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ

В. Е. Парменов, А. С. Мельников, Ю. Ю. Перевалов
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина),
г. Санкт-Петербург, parmenov.slava@yandex.ru
Научный руководитель: Перевалов Ю.Ю., к.т.н., доцент

В работе излагаются особенности построения цифровой системы управления источником питания, предназначенного для магнитно-импульсной обработки труб и профилей различного сечения. Рассмотрены принципы и алгоритмы работы цифровой системы управления.

The paper outlines the features of building a digital control system for a power source intended for magnetic-pulse processing of pipes and profiles of various cross-sections. The principles and algorithms of the digital control system are considered.

Технология магнитно-импульсной обработки труб и профилей различного сечения является перспективным направлением развития промышленности. Импульсная обработка подобного рода позволяет создавать управляемые деформации различных профилей – например раздачу или обжатие, а также позволяет полностью автоматизировать процесс. Магнитно-импульсная обработка подразумевает передачу большого количества энергии (0.5...50.0 кДж) на индуктор с заготовкой за короткий промежуток времени (10...1000 мкс) [1]. Для накопления энергии используются емкостные накопители – конденсаторные батареи. Причём для того, чтобы накопить достаточное количество энергии, необходимое для формирования достаточных усилий в заготовке, используются высоковольтные (1...20 кВ) конденсаторы большой ёмкости (1...250 мкФ).

Существует актуальная задача – встраивание установки магнитно-импульсной обработки в технологический процесс обработки труб и профилей различного сечения. В рамках этой задачи необходимо разработать цифровую систему управления и источник питания с контролем напряжения и времени заряда.

Для успешного встраивания установки магнитно-импульсной обработки необходимо обеспечивать заряд емкостных накопителей до заданного напряжения за заданный промежуток времени. Напряжение конденсаторных батарей в момент разряда определяет энергию, которую необходимо передать в заготовку для обеспечения условий, заданных технологическим процессом. Энергия W , запасённая в батарее конденсаторов, равна [2]:

$$W = \frac{CU^2}{2}, \quad (1)$$

где C – ёмкость батареи конденсаторов; U – напряжение заряда.

Время заряда определяется длительностью технологической операции, а также исходит из принципа минимизации времени удержания напряжения на заряженных конденсаторных батареях для обеспечения максимального ресурса их работы.

Принципиальная схема источника питания с емкостным накопителем энергии показана на рисунке 1.

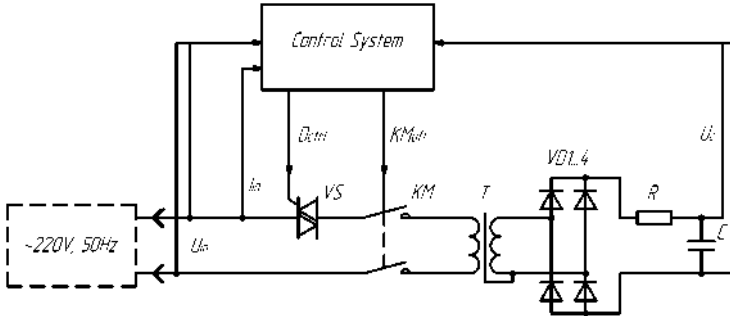


Рис. 1 – Принципиальная схема источника питания для магнитно-импульсной обработки

Заряд конденсаторной батареи ёмкостью $C = 160 \text{ мкФ}$ производится питающей сетью 220В через повышающий трансформатор с коэффициентом трансформации $k = 0.045$ и высоковольтный неуправляемый выпрямительный мост $VD1...4$.

Данный источник питания способен заряжать конденсаторную батарею до $3...6 \text{ кВ}$ и запастись энергией $0.7...2.8 \text{ кДж}$. Оптимальным временем заряда является 15 с .

Резистор $R = 3 \text{ kOhm}$ ограничивает ток заряда конденсаторной батареи C и ограничивает обратный ток через диодный мост $VD1...4$ в случае колебательного характера затухания разрядного импульса [3].

Контактор KM осуществляет подключение и отключение повышающего трансформатора к питающей сети. Система управления способна производить аварийное размыкание контактора KM для снятия питающего напряжения с высоковольтной части источника питания. На рисунке 2 представлен алгоритм работы.



Рис. 2 – Алгоритм работы установки магнитно-импульсной обработки

Система управления должна обеспечить оптимальный заряд высоковольтной конденсаторной батареи, с учетом тока заряда и времени заряда. Дальнейшие исследования будут направлены на создания установки большей мощности, способной обрабатывать алюминиевые трубы большего сечения, а также цифровой системы управления, управляющей зарядом и импульсным разрядом высоковольтной конденсаторной батареи.

Работа выполнена в рамках НИОКР НП/ПОПР-15 «Разработка цифровых интеллектуальных комплексов электромагнитной обработки материалов» СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

Литература:

1. Прокофьев А.Б. Магнитно-импульсная обработка материалов (МИОМ): монография / А.Б. Прокофьев [и др.] – Самара: АНО «Издательство СНЦ», 2019. – 140 с.

2. Глущенко В.А., Карпухин В.Ф. Технология магнитно-импульсной обработки материалов: монография. – Самара: Изд. дом «Федоров», 2014. – 208 с.

3. Abdulkhakov Ilias, Perevalov Yu.Yu. Mixed Inverter Regulation Method for Induction Heating. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 950 (2020) 012023 doi:10.1088/1757-899X/950/1/012023

ЛЕВИТАЦИОННАЯ ИНДУКЦИОННАЯ ПЛАВКА АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

А.А. Сапрыкин, А.Э. Морев

**Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, 7alexsapr7@gmail.com**

Научный руководитель: Алиферов А.И., д.т.н., профессор

В тезисах рассматривается подход к левитационной плавке алюминия, а также физическое обоснование работы установки. Левитационная плавка помимо того, что она проводится бесконтактно с элементами конструкции индукционной установки, позволяет создать специфические условия при кристаллизации расплавленного образца.

In the abstracts, an approach to the levitation melting of aluminum is considered, as well as the physical substantiation of the operation of the installation. Levitation melting, in addition to the fact that it is carried out con-

tactlessly with the structural elements of the induction installation, allows you to create specific conditions for the crystallization of the molten sample.

В современном мире остро стоит проблема нехватки сверхчистых металлов, так как они используются в микроэлектронике, ракетостроении, ядерной энергетике и в других высокотехнологичных областях производств.

Технологии получения сверхчистых металлов на этапе их рафинирования от более или менее, чем они, летучих элементов требуют применения видов плавления, не загрязняющих рафинируемый расплав материалом тигля или плавильной ванны. Таким видам плавки относится левитационная индукционная плавка.

В процессе электромагнитной левитационной плавки металлическая заготовка помещается в изменяющееся во времени электромагнитное поле, которое индуцирует в ней вихревые токи. При этом взаимодействие между наведенными вихревыми токами и приложенным внешним переменным электромагнитным полем приводит к двум основным эффектам. Во-первых, возникает вертикальная сила Лоренца, противодействующая силе тяжести и удерживающая расплавляемую заготовку во взвешенном состоянии. Во-вторых, вихревые токи, индуцируемые в металлической заготовке изменяющимся во времени электромагнитным полем, нагревают и расплавляют ее.

Левитационная плавка помимо того, что она проводится бесконтактно с элементами конструкции индукционной установки, создает специфические условия при кристаллизации расплавленного образца.

Наилучшими условиями для измельчения зерна в алюминиевых сплавах с помощью левитационного индукционного плавления является перегрев сплава выше точки плавления. Это необходимо для создания низкого температурного градиента по всему расплаву до того, как начнется затвердевание и силы Лоренца, достаточно сильные для отделения зародышевых зерен и создания достаточной конвекции для переноса зерна в основную часть расплава вовремя левитационной индукционной плавки.

Главным недостатком левитационной плавки является то, что на данный момент левитировать могут относительно небольшие объемы металла, исчисляемые в граммах. Достижение более высокой плавильной способности является темой для активных исследований.

В данной работе рассматривается модель, состоящая из металлического цилиндра, левитирующего в индукционной конической катушке, показанной на рис. 1. Полная электромагнитная и магнитодинамическая модель системы "индуктор-заготовка" необходима как для разработки

системы управления, так и для выработки рекомендаций по выбору параметров источника электропитания. Моделирование движения электромагнитно левитирующего цилиндра проводилось с учетом Силы Лоренца, действующей против силы тяжести, которая явно связана с электрическими переменными.

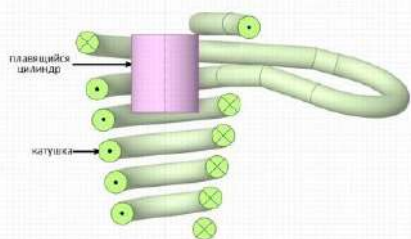


Рис. 1 – Модель конического индуктора с обратным витком и плавящейся заготовки в виде цилиндра

Разработанная модель трехмерной сопряженной электромагнитной и тепловой задачи с учетом фазового перехода позволит создать лабораторную учебно-научную установку левитационной плавки в коническом индукторе с обратным витком и плавящейся заготовки в виде цилиндра.

СПОСОБ СОЗДАНИЯ НИКЕЛЕВО-ПАЛЛАДИЕВЫХ КАТАЛИЗАТОРОВ ДЛЯ МЕТАНОЛЬНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

А.А. Тихонова, В.Р. Иванов, Е.Д. Рябков
МИРЭА – Российский технологический университет,
Институт тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова,
г. Москва, annochka-tikhonova@list.ru

Энергетический сектор – одна из базовых отраслей промышленности, от развития которой зависит вся индустрия в целом. В связи с промышленным развитием спрос на энергию постоянно увеличивается, поэтому возникает необходимость совершенствования нетрадиционных источников энергии, таких как, например, топливный элемент. В данной работе представлен способ создания никелево-палладиевых катализаторов для метанольных топливных элементов, который удешевляет технологию создания катализатора, но при этом способен увеличить каталитическую активность материала.

Energy sector is one of the fundamental branch of industry and the whole industry depends on its development. The demand for energy is constantly increasing so there is a need to improve non-traditional energy sources, such as, for example, a fuel cell. In this research we present a method for creating nickel-palladium catalysts for methanol fuel cells, which reduces the cost of the technology for creating a catalyst, but at the same time is able to increase the catalytic activity of the material.

Энергетика является одной из ведущих отраслей промышленности, от развития которой зависит практически вся деятельность человека. Постоянно увеличивающаяся потребность в энергии заставляет искать новые источники или модернизировать уже существующие. С каждым днем все острее встает вопрос об истощении традиционных источников энергии (нефть, уголь, газ) а также их влиянии на экологическую ситуацию (выбросы вредных веществ в атмосферу, загрязнение воды и почвы) и здоровье человека. Одним из решений данного вопроса является использование топливного элемента - устройства преобразующего химическую энергию в электрическую при помощи электрохимических процессов. Перед традиционной энергетикой такой способ получения энергии имеет ряд преимуществ: высокая экологическая безопасность, высокий КПД, возможность использования возобновляемых видов топлива, небольшие размеры. Следовательно, появляется необходимость улучшения топливных элементов. Это можно достичь путем создания более эффективных и экономически выгодных катализаторов.

На данный момент ученые работают над целым рядом проблем, с которыми столкнулась современная химическая энергетика. Kensaku Kodama и др. рассмотрели различные разработки нанокатализаторов известные на данный момент [2]. Широко используются углеродные подложки, с нанесенными на них сферическими наночастицами, что увеличивает площадь поверхность. Кроме того активно ведутся разработки и исследования в области наночастиц с регулируемой формой, что с одной стороны снижает использование Pt, а с другой значительно увеличивает эффективность катализатора. Однако все разработки сталкиваются с проблемой стремительной деградации наноразмерного катализатора, связанной с его тонкой структурой. В исследовании Abdalla M. и др. поднимается вопрос о продуктивности катализатора при низких рабочих температурах, чего можно достичь путем создания наноразмерных катализаторов с включением углерода или графена [3].

В работе Kun-Yauh Shih и др. представлен процесс получения катализатора для топливных элементов на прямом метаноле [4]. Такие ТЭ возможно применять в различных электронных устройствах благодаря

ряду преимуществ: низкая рабочая температура, экологичность, простая структура системы и высокая эффективность преобразования энергии. Однако широкому распространению такого вида источника энергии препятствует его высокая стоимость вследствие довольно низкой скорости реакции окисления метанола и необходимости использовать катализаторы. В своей работе Kun-Yauh Shih и др. создали тройной металлический нанокатализатор PtNiCo на углеродной подложке путем микроволнового нагрева, который обеспечивает равномерное нанесение частиц на носитель. При этом графен как носитель катализатора обладает большой удельной поверхностью, хорошей проводимостью и механической стойкостью, а совместное использование нанокристаллов Pt-Ni-Co позволяют увеличить электрохимическую активность катализатора и его стабильность.

В данной работе представлен способ создания никелево-палладиевого катализатора электрохимическим методом, который можно использовать в метанольных топливных элементах. При этом данный способ потенциально увеличивает каталитическую активность, позволяя при этом снизить стоимость получаемого катализатора.

Одним из способов улучшения эффективности катализатора является увеличение площади его поверхности, что достигается при создании наноразмерных катализаторов. В своей работе мы использовали метод реплик для создания нанокатализатора. Его суть заключается в том, что на подложку, содержащую наноотверстия, наносится металлический слой, на который в свою очередь наносится слой основного металла. В литературе чаще всего в качестве подложки упоминается шаблон из оксида индий-олово (ITO-подложка) [1]. В своей работе в качестве наноперфорированной матрицы мы использовали пластину алюминия, которая дешевле своего аналога. Алюминий анодируется и в результате данного электрохимического процесса на его поверхности образовались наноразмерные отверстия. На полученную алюминиевую матрицу путем электролиза осаждается никель из раствора, образуя наноструктуры, которые значительно увеличивают общую площадь поверхности. После алюминиевую подложку удаляют раствором щелочи. Для повышения эффективности катализаторов используют металлы платиновой группы. В своей работе мы использовали Pd. Наночастицы Pd электрохимически восстанавливали на поверхности Ni. При помощи рентгенограммы мы подтвердили наличие палладия на полученных образцах (Рис.1).



Spectrum: Specter 1478

Element	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [%]
Nickel	K-series	82,51	81,89	60,38	2,5
Oxygen	K-series	6,28	6,24	16,87	2,2
Aluminium	K-series	5,63	5,59	8,96	0,3
Sulfur	K-series	3,04	3,02	4,07	0,2
Palladium	L-series	0,65	0,65	0,26	0,1
Carbon	K-series	2,65	2,63	9,46	1,3
Total:		100,76	100,00	100,00	

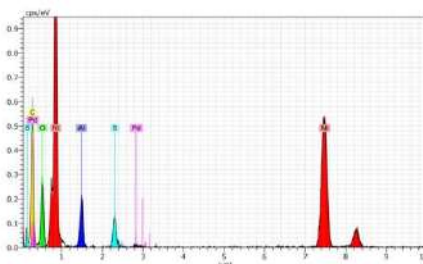


Рис.1 – спектр отражения рентгеновских лучей с расшифровкой

Причем при анализе снимков со сканирующего электронного микроскопа (Рис.2) было установлено, что частички палладия преимущественно восстанавливались на кончиках никелевых нановорсинок, где существует наибольшая вероятность соприкосновения с реагентами.



Рис.2 – Снимки СЭМ модифицированных палладием никелевых наноструктур

В теории такое расположение Pd наиболее оптимальное и позволяет увеличить каталитическую активность материала. Таким образом, удалось снизить использование Pd.

Способ, описанный в данной работе, позволяет выиграть в экономическом и энергетическом плане, однако он не решает всех проблем, с которыми столкнулась современная химическая энергетика, что дает нам возможность продолжать свое исследование.

Литература:

1. Anodic electrodeposition of several metal organic framework thin films on indium tin oxide glass / Hauser, Jesse L.; Tso, Monique; Fitchmun, Kimberly; Oliver, Scott R. J. // *Crystal Growth & Design* (c). – 2019.– Vol. 19, N. 4. – P. 2358–2365. – doi:10.1021/acs.cgd.9b00054.

2. Challenges in applying highly active Pt-based nanostructured catalysts for oxygen reduction reactions to fuel cell vehicles / Kensaku Kodama, Tomoyuki Nagai, Akira Kuwaki, Ryosuke Jinnouchi // *Nature Nanotechnology* (c). – 2021. – Vol. 16, N. 2. – P. 140-147. – doi: 10.1038/s41565-020-00824-w.

3. Nanomaterials for solid oxide fuel cells: A review / Abdalla M. Abdallaa,b , Shahzad Hossaina,c , Atia T. Azadd , Pg Mohammad I. Petraa, Feroza Beguma , Sten G. Erikssone, Abul K. Azada // *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (c). – 2018. – Vol. 82. – P. 353-368. – doi: 10.1016/j.rser.2017.09.046.

4. One-Step Microwave-Assisted Synthesis of PtNiCo/rGO Electrocatalysts with High Electrochemical Performance for Direct Methanol Fuel Cells / Shih, K.-Y.; Wei, J.-J.; Tsai, M.-C. // *Nanomaterials* (c). – 2021. – Vol. 9, N. 11. – doi: 10.3390/nano11092206.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА
ПРИ ПОМОЩИ ПРОГРАММЫ SIMINTECH**

Д.А. Головачева, А.Л. Федянин
Северский технологический институт НИЯУ МИФИ,
г. Северск, d.golovasheva@gmail.com

В данной статье рассматривается имитационная модель синхронного генератора и ее возможности. Делается вывод об исследовании основных характеристик имитационной модели синхронного генератора. Дается определение синхронного генератора, основные характеристики, его преимущества и недостатки.

In this article the simulation model of synchronous generator and its capabilities are considered. It is concluded that the main characteristics of the simulation model of synchronous generator are investigated. The definition of synchronous generator, its main characteristics, its advantages and disadvantages are given.

Введение

Синхронная машина используется главным образом как генератор для производства электрической энергии. Если к обмотке возбуждения синхронной машины подвести постоянный ток и ротор вращать первичным двигателем с частотой n , то магнитный поток, создаваемый обмоткой возбуждения Φ_0 , будет индуцировать в обмотке статора (якоря) ЭДС, изменяющуюся с частотой $f = np/60$ Гц, где n - частота вращения ротора в об/мин, p - число пар полюсов ротора. При подключении к обмотке статора потребителя электрической энергии под действием ЭДС в фазах обмотки статора и потребителя появятся токи. Синхронная машина начнёт отдавать потребителю электрическую энергию, т.е. будет работать генератором. Синхронный генератор преобразует механическую энергию, подводимую со стороны первичного двигателя, в электрическую.

Преимуществом синхронных генераторов является высокая стабильность выходного напряжения, а недостатком – возможность перегрузки по току, так как при завышенной нагрузке, регулятор может чрезмерно повысить ток в обмотке ротора, что может привести к выходу из строя.

Синхронные генераторы устанавливаются на крупных электростанциях и используются в качестве автономных источников электроэнер-

гии. Синхронные двигатели применяются для привода производственных механизмов большой мощности: насосных агрегатов, компрессоров, прокатных станов.

Если сравнивать асинхронный генератор и синхронный, то у синхронного генератора величина напряжения и частота поддерживаются с высокой точностью, в то время как у асинхронного они изменяются в относительно большом диапазоне. Синхронный генератор будет более правильным выбором для работы в бытовых условиях, для запитки дома или другого объекта с чувствительной к перепадам технике.

Рабочие свойства синхронного генератора оцениваются его характеристиками, важнейшими из которых являются характеристики: холостого хода, внешняя, регулировочная и короткого замыкания. Для того, чтобы исследовать характеристику короткого замыкания, реализована имитационная модель синхронного генератора при помощи программы SimInTech.

Описание работы

Расчет тока в процессе набора мощности генератора и выхода его на номинальный режим с последующим коротким замыканием. Напряжение возбуждения и скорость вращения генератора соответствуют номинальному режиму и не изменяются. Аналитическая кривая тока генератора до момента короткого замыкания не учитывает процесс набора мощности генератором и представлена прямой с постоянным значением 3953 А равным номинальному амплитудному фазному току.

Параметры генератора:

- номинальная активная мощность, 42600 кВт;
- номинальное напряжение 11000 В;
- номинальный коэффициент мощности $\cos \varphi = 0,8$;
- номинальная частота 50 Гц;
- номинальная скорость вращения 1500 об/мин.

Имитационная модель синхронного генератора представлена на рисунке 1.

На интервале времени от 0 до 40 с возбужденный генератор выходит на номинальный режим. Амплитуда тока статора генератора I_T увеличивается от 0 до 4000 А. После этого расчет останавливается. График тока генератора фазы до короткого замыкания представлен на рисунке 2.

На интервале времени от 40 до 60 с выключатель замыкается и происходит короткое замыкание. Для его моделирования необходимо продолжить расчет (повторно нажав кнопку «Пуск»). График тока генератора фазы после короткого замыкания представлен на рисунке 3.

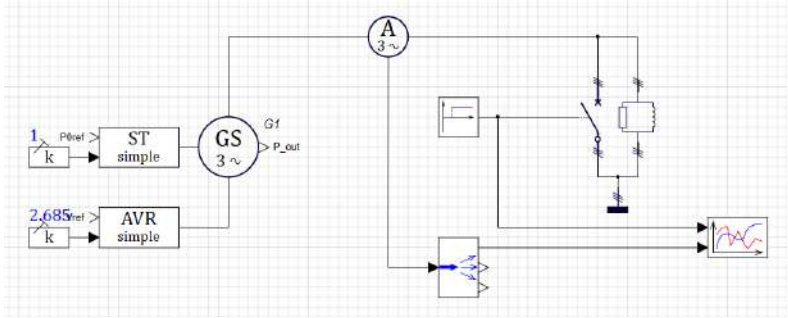


Рис. 1 - Имитационная модель синхронного генератора.

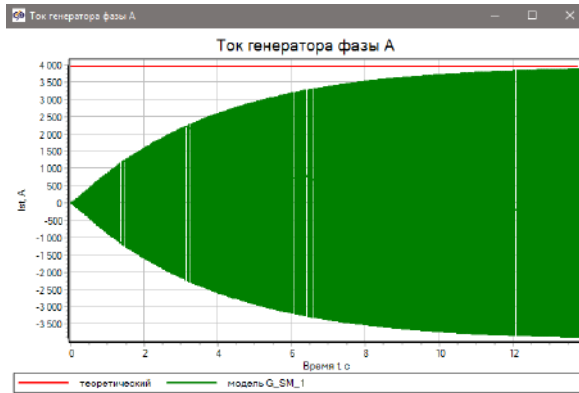


Рис. 2 – Ток генератора фазы до КЗ.

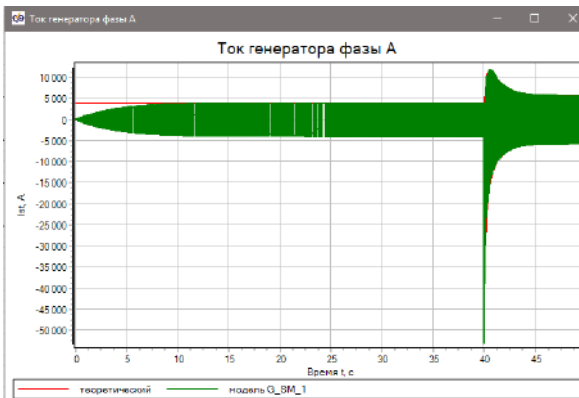


Рис. 3 – Ток генератора фазы после КЗ.

Заключение

Таким образом, с помощью имитационной модели синхронного генератора исследование основных характеристик показало, что работа генератора после короткого замыкания продолжается, следовательно, эта характеристика позволит лучше выявить работу синхронного генератора.

Литература:

1. Ю. Н. Калачев SimInTech: Моделирование в электроприводе 2019 – 90 с.
2. Синхронные машины: учеб. пособ./ Ю.А. Макаричев, В.Н. Овсянников. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2011.-152 с.

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ – ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРЕИМУЩЕСТВА ПЕРЕД КЛАССИЧЕСКИМИ ТРАНСФОРМАТОРАМИ

И.К. Мехряков

**Северский технологический институт Национального исследова-
тельского ядерного университета «МИФИ»,
г. Северск, mehryakov2000@mail.ru
Научный руководитель: Тютеева П.В., к.т.н., доцент**

В данной статье приводится сравнение энергосберегающего трансформатора ТМГ 12+ с его классической версией ТМГ11 и промежуточным экземпляром ТМГ 12. Также проводится исследование особенностей энергосберегающих трансформаторов, что повышает энергоэффективность масляного трансформатора.

This article compares the energy-saving transformer TMG12+ with its classic version TMG11 and an intermediate unit TMG 12. There is also a study of the features of energy-saving transformers, consideration of the possibility and practical implementation of design changes that lead to a reduction in losses, ultimately, increase the energy efficiency coefficient of an oil transformer.

Вопросы энергосбережения сегодня становятся не просто модной темой. Большие энергопотери в сетях, рост тарифов на электроэнергию и возможность запрета оборота неэнергоэффективных устройств заставляют заказчиков силовых трансформаторов задумываться о приоб-

ретенции оборудования с пониженными потерями. Несомненно, одним из самых эффективных способов снизить потери электроэнергии на отдельно взятом участке, является использование энергосберегающих силовых распределительных трансформаторов. В данной статье приводится сравнение энергосберегающего трансформатора с его классической версией.

Целью данной работы является анализ особенностей конструктивных изменений, которые приводят к уменьшению потерь холостого хода (ХХ), короткого замыкания (КЗ) и, в конечном счете, повышают энергоэффективность масляного трансформатора, а также расчет сроков окупаемости при переходе на энергоэффективные трансформаторы взамен классических.

Конструктивные мероприятия, с помощью которых могут быть достигнуты значения потерь ХХ и КЗ, вытекают из теории проектирования трансформаторов. Анализ особенностей дает следующие конструктивные возможности снижения потерь холостого хода и короткого замыкания в трансформаторе:

- использование материала магнитопровода с меньшими удельными потерями;
- снижение индукции в стержне;
- уменьшение массы стержня и ярма;
- увеличение площади поперечного сечения витков обмоток трансформатора [1].

Для анализа эффективности внедрения энергоэффективных трансформаторов взамен классических были рассмотрены трехфазные масляные трансформаторы: ТМГ11 – базовый, ТМГ12 – с улучшенными параметрами энергосбережения, ТМГ12+ – новая серия с у улучшенными показателями энергоэффективности за счет сердечника из электротехнической стали с малыми удельными потерями [1].

Снижение потерь холостого хода и короткого замыкания в ТМГ12+ достигнуто так же за счет вложений увеличения расходов на активные материалы трансформатора. В связи с этим стоимость трансформаторов серии 12+ превышает стоимость стандартной линейки трансформаторов 11 серии. Приведем сравнение технических характеристик базового и улучшенных трансформаторов, таблица 1 [2].

Из таблицы 1 видно, что трансформаторы новой серии 12+ превосходит 12 серию по потерям ХХ до 20% и по потерям КЗ до 24% .

Уменьшение потерь в энергоэффективных трансформаторах достигается за счет использования более совершенных подходов к проектированию и изготовлению трансформатора, использования материалов с меньшими удельными потерями, поэтому энергоэффективные транс-

форматоры имеют большую стоимость. Сравнение стоимости трансформаторов приведено в таблице 2 [2].

Таблица 1 – Технические характеристики

	Мощность, кВА				
	100	160	400	630	1000
Потери ХХ/КЗ для 11 серии, Вт	460/2640	644/3630	955/6490	1208/8360	1783/11880
Потери ХХ/КЗ для 12 серии, Вт	311/2167	426/3080	702/5060	920/7425	1265/11550
Снижение потерь ХХ/КЗ, 12 серии относительно 11 серии, %	32/18	34/15	26/22	24/11	29/3
Потери ХХ/КЗ для 12+ серии, Вт	250/1750	375/2350	650/4600	800/6750	1100/10500
Снижение потерь ХХ/КЗ, относительно 12 серии, %	20/19	12/24	7/9	13/9	13/9

Таблица 2 – Технические характеристики

	Мощность, кВА				
	100	160	400	630	1000
Стоимость, 11 серия, руб.	100000	130000	270000	390000	550000
Стоимость, 12 серия, руб.	115000	145000	300000	430000	605000
Удорожание по отношению к 11 серии, руб.	15000	15000	30000	40000	55000
Удорожание по отношению к 11 серии, %	13	10	10	9	9
Стоимость, 12+ серия, руб.	122000	160000	330000	450000	620000
Удорожание по отношению к 11 серии, руб.	22000	30000	60000	60000	70000
Удорожание по отношению к 11 серии, %	18	19	18	13	11

Трансформатор является сложным и дорогим устройством и его стоимость складывается не только из стоимости покупки, но и из затрат приходящихся на период эксплуатации. Сделаем сравнение затрат для трансформатора мощностью 630 кВ·А на период эксплуатации 10 лет. Расчет проведем для базового и улучшенных трансформаторов серий 11, 12 и 12+, результаты приведены на рисунке 1. Стоимость электроэнергии принимаем 6 руб. за 1 кВт·ч. Для наглядности сделаем два графика, с расчетом только по потерям холостого хода и с расчетом сум-

марных потерь в трансформаторе. В расчете суммарных потерь принимаем коэффициент загрузки трансформатора равным 0.5. При увеличении коэффициента загрузки потери короткого замыкания соответственно будут увеличиваться.

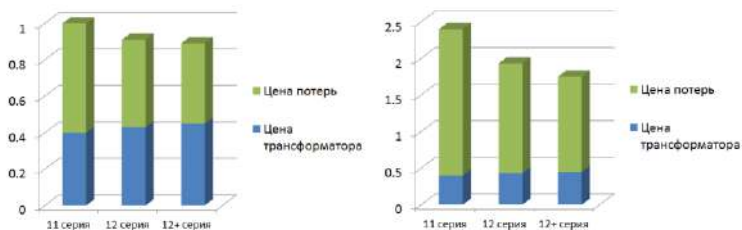


Рис. 1 – Расчет по потерям холостого хода и расчет суммарных потерь в трансформаторе, млн. руб.

Из графиков (рис. 1) видно, что потери в трансформаторе уже через 10 лет эксплуатации значительно превосходят стоимость самого трансформатора. В долгосрочном периоде использование энергоэффективных трансформаторов приводит к окупаемости сделанных вложений на его покупку. Стоит отметить, что при выборе стандартного или энергоберегающего трансформатора нужно ориентироваться на суммарные потери за весь срок службы трансформатора, который составляет не менее 30 лет.

Полученные данные по суммарным потерям трансформаторов и получаемой экономии позволяют выполнить оценку срока окупаемости для улучшенных энергоэффективных трансформаторов 12 серии и 12+ серии. Для расчета принимаем трансформатор мощностью 630 кВ·А. На рисунке 2 приведены графики срока окупаемости в зависимости от коэффициента загрузки трансформатора.

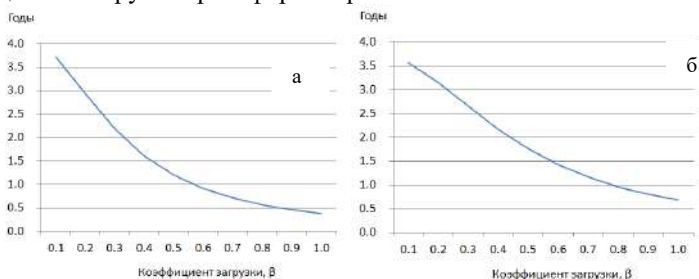


Рис. 2 – Срок окупаемости 12+ серии относительно 12 серии (а) и 12+ серии относительно 11 серии (б)

Из приведенных графиков видно (рис. 2), что при средней загрузке трансформатора 0.5...0.7 срок окупаемости дополнительных затрат на покупку серии 12+ относительно покупки стандартного трансформатора 11 серии составит от 1,5 до 2-х лет. При этом энергосберегающий трансформатор серии 12+ обладает всеми преимуществами стандартной серии трансформаторов.

Существующие конструктивные способы уменьшения суммарных потерь в трансформаторах позволяют существенно повысить энергоэффективность трансформации электроэнергии. Применение же новых инновационных материалов, в частности в магнитопроводах силовых трансформаторов, обеспечит качественный скачок в снижении затрат на функционирование всей сети электроснабжения. В силу более высоких производственных затрат стоимость трансформатора с улучшенными характеристиками, конечно, будет несколько выше стоимости на аналог в стандартном исполнении. Но за счет меньших расходов на электроэнергию это повышение окупится уже через три-пять лет эксплуатации в зависимости от мощности трансформатора и региональных тарифов на электричество, и в целом экономический эффект будет положительным.

Литература:

1. Калинин Е.В., Чивенков А.И.. Прогнозирование прироста потерь в стыках сердечников силовых трансформаторов // Интеллектуальная электроника. — 2018. — № 3 Стр. 95-99.
2. Тихомиров П. М. Расчет трансформаторов: Учеб. пособие для ВУ-Зов. — 5-е изд. перераб. и доп. / П.М. Тихомиров. — М.: Энергоатомиздат. — 1986 год. 528 стр.

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

А.А. Темляков, Б.В. Малозёмов
Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, mbv5@corp.nstu.ru
Научный руководитель: Темляков З.С., д.т.н., профессор

Рассмотрены технические решения повышения энергоэффективности асинхронных двигателей. Рассчитаны двигатели в диапазоне мощности от 30 кВт до 45 кВт. Показана целесообразность сочетания конструктивных приемов с одновременным обоснованием соотношения главных размеров.

The technical solutions for increasing the energy efficiency of induction motors are considered. The motors are designed in the power range from 30 kW to 45 kW. The expediency of a combination of design techniques with a simultaneous substantiation of the ratio of the main dimensions is shown.

Актуальность работы определяется приоритетным направлением энергетической стратегии России, связанной с энергосбережением.

Цель работы заключается в разработке и анализе конструктивных подходов к определению главных размеров активного объема асинхронного двигателя на базе основного уравнения проектирования электрической машины [1,2,4].

Объектом исследования являются трехфазные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором, являющиеся силовым элементом электропривода современных регулируемых электромеханических систем [2,3].

Алгоритм решения исследовательской задачи обоснования и поиска путей повышения энергоэффективности рассматриваемого класса двигателей на данной стадии состоит из трех последовательных этапов [5,6,7]:

Первый этап предусматривает работу с патентной и научно-технической литературой, формирование массива значений коэффициента мощности, коэффициента полезного действия асинхронных двигателей в диапазоне мощности от 30 кВт до 45 кВт, анализ закономерностей количественных изменений этих энергетических коэффициентов для существующих модификаций асинхронных двигателей.

Второй этап содержит инновационную составляющую: обоснование методов повышения энергоэффективности за счет сочетания целесооб-

разных конструктивно-технических решений на методологической основе понятия «длинная и короткая машина» [7,8].

Третий этап предполагает выработку рекомендаций к проектированию новых энергоэффективных низковольтных асинхронных двигателей в диапазоне мощности от 10 кВт до 100 кВт; модернизацию методики расчета за счет введения отражающих рекомендации фрагментов и автоматизации их расчета в компьютерной среде.

Определение главных размеров является основополагающим этапом в разработке конструкции любой электрической машины. К главным размерам электрической машины относят внутренний диаметр сердечника якоря и расчетную длину воздушного зазора. От профессионального обоснования отношения этих конструктивных параметров зависят все технико-экономические показатели: размеры активного объема, масса электрической машины, энергетические показатели, себестоимость и другие.

На данном этапе решения исследовательской задачи в методику проектирования асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором введен блок, предусматривающий расчет ряда альтернативных вариантов, формирование которых осуществляется на основе понятия «длинная и короткая машина» и одиночных простых конструктивно-технических решений активного объема. Приведенный ниже вывод получен на основании электромагнитных расчетов, тепловые и механические расчеты выходят за рамки решаемой задачи [7,8,9].

Определение зависимости $\eta(D)$ проведено при условии $D \cdot l_{\delta} = \text{const}$. Коэффициентом, характеризующим соотношение длины воздушного зазора и внутреннего диаметра статора является λ , которая определяется формулой $\lambda = \frac{l_{\delta}}{\tau}$ о.е., где полюсное деление $\tau = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p}$ м.

При решении данной исследовательской задачи поиска конструктивно-технических решений обеспечения энергоэффективности асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором диапазон изменения этого коэффициента значительно расширен по отношению к двигателям нормального исполнения. Диапазон изменения $\lambda \ni (0,4; 1,6)$ о.е. В рекомендации [1] для двигателей данной мощности и числе пар полюсов $\lambda \ni (0,8; 1,2)$.

В качестве примера в таблице 1 представлены некоторые результаты расчета, в частности значения электрических потерь в обмотке якоря и коэффициента полезного действия для пяти вариантов конструктивно-технических решений активного объема.

Таблица 1 – Зависимости $P_{эл.1}$, $\eta = (D)$ при условии $D \cdot l_{\delta} = \text{const}$

D , м	0,214	0,237	0,261	0,284	0,308
l_{δ} , м	0,258	0,210	0,173	0,146	0,124
λ , о.е.	1,535	1,128	0,844	0,655	0,513
$P_{эл.1}$, Вт	1605,27	1706,87	1869,43	2031,99	2275,83
η , %	92,09	92,06	91,77	91,35	90,01

При постановке задачи данной работы оговорено, что анализ результатов исследования получен на уровне электромагнитных расчетов, при этом отношение расчетной длины воздушного зазора к полюсному делению относительно машин нормального исполнения значительно расширено. Совершенно очевидно, что при уменьшении наружного диаметра ротора и увеличении его длины снижается жёсткость вала, увеличивается значение прогиба вала, и, как следствие, статического эксцентриситета ротора, что, в свою очередь, может привести к соприкосновению поверхностей ротора и статора, ограничивающих область воздушного зазора.

Для оценки прогиба вала при различных конструктивно-технических решениях активного объема асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в программном комплексе Autodesk Inventor Professional построена 3D модель короткозамкнутого ротора исследуемого двигателя. Расчетная модель включает в себя сердечник магнитопровода ротора с короткозамкнутой обмоткой, которые насажены на вал.

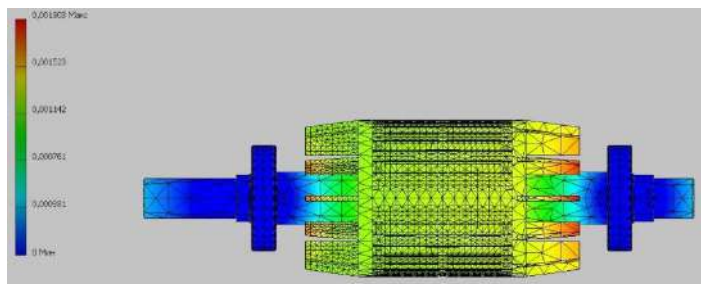


Рис. 1 – Ротор двигателя, $\lambda = 1,128$

На валу установлены подшипники качения. Особенность 3D модели заключается в том, что она учитывает не только геометрическую форму и размерные соотношения элементов конструкции ротора, но и свойства материалов, используемых при изготовлении вала, сердечника магнитопровода и обмотки ротора с короткозамыкающими кольцами. На рисунке 1 приведены результаты расчетов, а именно значение прогиба вала в мм. Он равен максимальному смещению ротора относительно собственной оси вращения.

Для нормальных условий работы статический прогиб вала не должен превышать 10% от величины воздушного зазора. Из расчетов видно, что данное условие соблюдается, значение прогиба вала допустимо [2,3,4].

В целом по работе сделаны следующие выводы:

1. Выполненные исследования показали, что одним из эффективных путей обеспечения энергоэффективности является оптимизация соотношения диаметра и длины электрической машины.
2. С увеличением номинальной мощности асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором и синхронной частоты вращения при прочих равных условиях возрастают коэффициент мощности и коэффициент полезного действия за счет особой закономерности соотношения главных размеров и повышения уровня электромагнитных нагрузок.
3. При разработке новых низковольтных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором резервной зоной обеспечения энергоэффективности является оптимизация соотношения главных размеров при условии постоянства их активного объема.
4. Для оценки рекомендуемых к разработке вариантов конструкции введен дополнительный к энергетическому коэффициенту полезного действия критерий допустимого значения прогиба вала, определяемого на основании механического расчета, выполненного в программном комплексе Autodesk Inventor Professional.

Литература:

1. Домбровский В.В. Асинхронные машины: Теория, расчет, элементы проектирования / В.В. Домбровский, В.В. Зайчик. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 368 с.

2. Копылов И.П. Проектирование электрических машин: Учебник для вузов, - В 2-х кн.:Кн.1 / И.П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин, Б.Ф. Токарев; Под ред. И.П. Копылова, - М.: Энергоатомиздат, 1993, - 464 с

3. Копылов И.П. Справочник по электрическим машинам: В 2т. / Под общ. ред. И.П. Копылова и Б.К. Клокова. Т.1. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 456 с.

4. Кравчик А.Э. Влияние исходных данных на геометрию и технико-экономические показатели асинхронных двигателей / А.Э. Кравчик, Э.К. Стрельбицкий // Электротехника. – 1976. – № 11. – С. 28-30.

5. Темлякова З.С. Исследование эксплуатационных свойств асинхронного двигателя на основе численного моделирования / З.С. Темлякова, А.А. Шевченко, В.В. Гречкин // Электротехника. Электротехнология. Энергетика (ЭЭЭ-2015) = Electrical engineering. Electrotechnology. Energy (EEE-2015) : сб. науч. тр. 7 междунар. науч. конф. молодых ученых, Новосибирск, 9–12 июня 2015 г. В 3 ч. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2015. – Ч. 1. Секция «Электротехника». – С. 79-82.

6. Темлякова З.С. Компьютерная поддержка проектирования высоковольтных асинхронных двигателей / З.С. Темлякова, В. В. Гречкин, Ю. Г. Соловейчик, М. Г. Персова // Электротехника.- 2014. - № 12. - С. 33-35.

7. Шевченко А. А. Автоматизация расчета самозапуска двухскоростных асинхронных машин на основе применения языка программирования JAVASCRIPT / А. А. Шевченко, З. С. Темлякова, В. В. Гречкин // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника : тр. 7 Всерос. науч.-практ. конф., Новокузнецк, 23–24 нояб. 2016 г. – Новокузнецк : Изд-во СибГИУ, 2016. – С. 219-221.

8. Щукин И.О. Влияние конструктивных особенностей активного объема на энергетические показатели асинхронного двигателя / И. О. Щукин // Материалы 53-й Междунар. науч. студ. конф. МНСК-2015: Мехатроника и автоматизация / Новосиб. гос. ун-т. - С. 95.

9. Shevchenko A. A. Large asynchronous machines self-running mode JavaScript-based computer-aided design / A. A. Shevchenko, Z. S. Temlyakova // 11 International forum on strategic technology (IFOST 2016) : proc., Novosibirsk, 1–3 June 2016. – Novosibirsk : NSTU, 2016. – Pt. 2. – P. 133-135.

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С МАССИВНЫМ РОТОРОМ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Н.К. Маломошнов

Новосибирский государственный технический университет,

г. Новосибирск, demonikada@gmail.com

Научный руководитель: Честюнина Т.В., к.т.н.

Рассмотрены конструкции, принцип работы двигателя, расчет параметров массивного ротора. Приведены формулы для учета омеднения массивного ротора. Изложен метод расчета параметров массивного ротора. В результате спроектирован асинхронный двигатель с массивным ротором, получены его характеристики.

The designs, the principle of operation of the engine, the calculation of the parameters of the massive rotor are considered. Formulas for taking into account the copper plating of a massive rotor are given. A method for calculating the parameters of a massive rotor is described. As a result, an asynchronous motor with a massive rotor was designed and its characteristics were obtained.

Современная техника характеризуется массовым применением электрических машин самых разнообразных типов. Для различных производственных механизмов, устройств автоматического управления и регулирования часто требуется, чтобы электрические машины обладали особыми свойствами или характеристиками в тех или иных режимах работы. Одна из таких машин – асинхронный двигатель с массивным ротором (АД с МР). Благодаря своей простоте конструкции, механической прочности и надежности, хорошим регулировочным свойствам и высоким энергетическим показателям в переходных режимах АД с МР находит свое применение в различных типах электроприводов. При производстве АМ такого типа возможна замена короткозамкнутого ротора на массивный, при этом неизменно ставит вопрос о расчете параметров и характеристик полученного двигателя.

Конструктивно АД с МР отличается от АД с КЗ ротором - данная машина не имеет обмоток на роторе, а представляет собой сплошной гладкий цилиндр, выполненный из ферромагнитного материала. Широкое распространение получили пять конструкций АД с МР, а именно гладкий ферромагнитный ротор, ротор с токопроводящим покрытием, зубчатый ротор, двухслойный ротор и МР с беличьей клеткой. Для улучшения свойств данного типа двигателя были разработаны такие модификации как массивный ротор с пазами; МР с торцевыми или ла-

тунными кольцами; МР с медной или латунной втулкой; омедненный МР.

Отличие по принципу действия заключается в том, что вращающееся магнитное поле, возбуждаемое обмоткой статора, наводит в массивном роторе вихревые токи. В результате взаимодействия токов ротора с вращающимся магнитным полем ротор начинается движение в направлении вращения магнитного поля. Сам массивный ротор является и магнитопроводом, через который проходит магнитный поток взаимной индукции, и токопроводом, так как в нем проходят наводимые вихревые токи.

Метод расчета заключается в том, что для начала проектируется АД с КЗ ротором. Далее, у спроектированного двигателя заменяется КЗ ротор на массивный и рассчитываются параметры данного ротора, для этого необходимо найти комплексное магнитное сопротивление [1]. Для того чтобы получить комплексное сопротивление, нужно рассчитать магнитное напряжение, действующее на массивный ротор (1), а затем вычислить напряженность магнитного поля на поверхности массивного ротора (2).

$$F_2 = 2,7 \frac{W_1 k_{o\bar{o}}}{p} \cdot I_2'; \quad (1)$$

$$H_e = \frac{F_2}{\sqrt{2} \cdot k_H \cdot \tau}, \quad (2)$$

где $I_2' = 1 A$ (предварительно) – эквивалентный приведенный ток ротора; $k_H = 0,63$ – коэффициент, учитывающий неравномерный характер распределения магнитной индукции вдоль полюсного деления.

Далее необходимо рассчитать эквивалентное приведенное сопротивление (3) ротора действительная и мнимая части которого будут являться активным и индуктивным сопротивлениями массивного ротора (4).

$$Z_{20}' = \left(\frac{j \cdot \pi \cdot \sqrt{f_1}}{Z_{(1)}} \right) \frac{m \cdot (W_1 \cdot k_{o\bar{o}})^2}{k_A \cdot p}; \quad (3)$$

$$Z'_{20} = \sqrt{r'^2_{20} + x'^2_{20}}, \quad (4)$$

где $k_\Lambda = 0,1$ – коэффициент для учета влияния относительной длины массивного ротора на его эквивалентные приведенные параметры, выбран по рис. 1-15 [1].

Найденные параметры массивного ротора соответствуют тому значению расчетной магнитной проницаемости μ_e на поверхности массивного ротора, которое имеет место при величине эквивалентного приведенного тока ротора $I'_2 = 1 \text{ A}$ при $s = 1$. Для всех других значений этого тока параметры массивного ротора могут быть получены простым пересчетом при использовании универсальной зависимости (5).

$$Z'_{20*} = Z'_{20(s)} = \left(\frac{I'_2}{I'_{2*}} \right)^{\frac{\aleph-1}{2\aleph}}, \quad (5)$$

где \aleph – показатель ферромагнитного материала.

По предложенной выше методике были получены характеристики АД с МР, которые отображены на рисунке 1

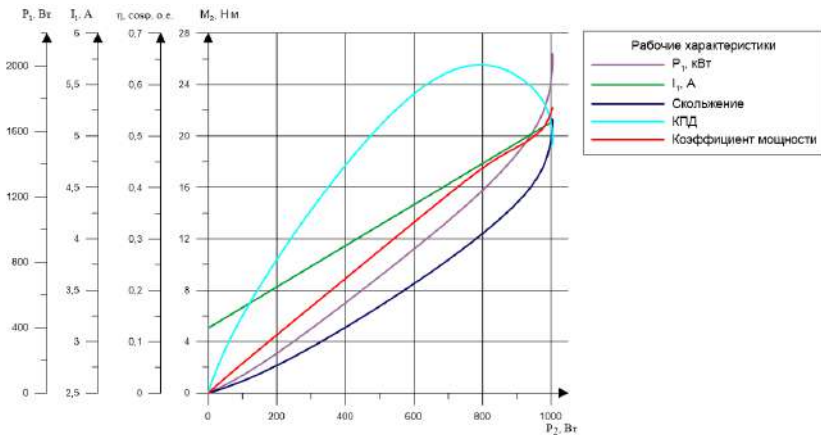


Рис. 1 - Рабочие характеристики асинхронного двигателя с массивным ротором

Для улучшения энергетических показателей используется омеднение ротора. Роль омеднения ротора заключается в том, что оно уменьшает активное и индуктивное сопротивления вторичной цепи, что позволяет улучшить рабочие характеристики двигателя. Формулы для учета омеднения приведены ниже [2]:

$$r_{2s}' = \frac{r_{20(s)}' \cdot r_{\Delta(s)}' (1,36r_{20(s)}' + r_{\Delta(s)}')}{1,36(r_{20(s)}')^2 + 2r_{20(s)}' \cdot r_{\Delta(s)}' + (r_{\Delta(s)}')^2}$$

$$x_{2s}' = \frac{0,6 \cdot r_{20(s)}' \cdot (r_{\Delta(s)}')^2}{1,36(r_{20(s)}')^2 + 2r_{20(s)}' \cdot r_{\Delta(s)}' + (r_{\Delta(s)}')^2}$$

В таблице 1 отображено сравнение энергетических параметров АД с МР и этого же двигателя, но с омеднением.

Таблица 1 – Сравнение энергетических показателей

Асинхронный двигатель	$P_{эм}, Вт$	$\eta, о.е.$	$\cos \varphi, о.е.$
С массивным ротором	1692	0,484	0,46
С массивным омедненным ротором	1703	0,656	0,582

В работе изложена методика расчета параметров и характеристик асинхронного двигателя с массивным гладким ротором, проведено сравнение характеристик АД с МР без омеднения и с его использованием.

Литература:

1. Куцвалов В. М. Вопросы теории и расчета асинхронных машин с массивными роторами. МОСКВА: ЭНЕРГИЯ, 1966.
2. Ищенко И. М. Расчет асинхронного двигателя с омедненным массивным ферромагнитным ротором / И. М. Ищенко, С. С. Голощанов // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. - 2017. - № 1. - С. 144-149.
3. Дмитриев, В. Н. Проектирование и исследование асинхронных двигателей малой мощности: учебное пособие / В. Н. Дмитриев. – Ульяновск: УлГТУ, 2013. – 89 с.

4. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / *А.Э. Кравчик / М.М. Шлаф / В.И. Афонин / Е.А. Соболевская.* – М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с.
5. *А.И. Лиценко, В.А. Лесник.* Асинхронные машины с массивным ферромагнитным ротором. Киев: Наукова думка, 1974.
6. *Вольдек А.И.* Электрические машины: учебник / *А.И. Вольдек.* – Л.: Изд-во Энергия, 1978. – 832 с.
7. *Жуков А.А., Мозильников В.С.* Асинхронные электродвигатели с массивным и двухслойным роторами. Николаев, изд. НКИ, 1977. - 52 с.
8. Проектирование электрических машин: учебник / *И.П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин, Б.Ф. Токарев.* – М.: Высшая школа, 2005. – 767 с.
9. *Куцевалов В.М.* Асинхронные и синхронные машины с массивным ротором. – М.: Энергия, 1979, 160 с.
10. *Лиценко А.И.* Массивный ротор асинхронной машины. 1979

ПОВЫШЕНИЕ ЖЕСТКОСТИ ВНЕШНЕЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С ДРОБНОЙ ЗУБЦОВОЙ ОБМОТКОЙ

М.В. Абрамов

**Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, abramov_mark@bk.ru**

Научный руководитель: Приступ А.Г., к.т.н., доцент

В работе рассматривается способ увеличения жесткости внешней характеристики синхронного генератора с дробными зубцовыми обмотками. Высокая индуктивность дробных зубцовых отмоток негативно сказывается на внешней характеристике генератора, что приводит к значительному падению напряжения генератора при увеличении нагрузки. В статье представлен метод, направленный на уменьшение индуктивностей статорных дробных зубцовых обмоток за счет устранения нежелательных пространственных гармоник кривой распределения магнитного поля в воздушном зазоре электрической машины. Хотя технология рассмотрена на примере синхронного генератора, она также может быть применима к двигателям переменного тока для уменьшения нежелательных пространственных гармоник, которые возникают в существующих машинах с дробными зубцовыми обмотками.

The paper introduce a way to increase the rigidity of the synchronous generator load characteristics with fractional tooth windings. The high inductance of fractional tooth windings adverse affects the generator load characteristics, what is the reason of significant drop generator's voltage with increasing load. The article discusses the method aimed at reducing inductances of stator fractional tooth windings by eliminating undesirable space harmonics of the magnetic field distribution curve in machine's air gap. Although the technology is reviewed on the example of the synchronous generator, it can also be applied to AC motors to reduce undesirable space harmonics that occur in existing fractional-tooth machines.

Исследование было проведено на тяговом синхронном генераторе мощностью 315 кВт с числом полюсов $p = 16$. Для возбуждения электрической машины на роторе установлены неодимовые магниты, использование которых приводит к повышению производительности генератора за счет отсутствия электрических потереть на возбуждение и позволяет уменьшить вес и габариты машины за счет высоких энергетических свойств неодимовых магнитов. Особенностью конструкции генератора является применение дробной зубцовой обмотки с числом пазов на полюс и фазу $q = 3/8$.

Исследование формы распределения магнитного поля, создаваемого дробными зубцовыми обмотками в ВЗ, проводилось с использованием программного пакета FEMM 4.2. Для этого была создана модель генератора, ротор генератора был заменен сплошным цилиндром из электротехнической стали. В пазах статора были установлены проводники с номинальным значением тока. Модель генератора представлена на рисунке 1.

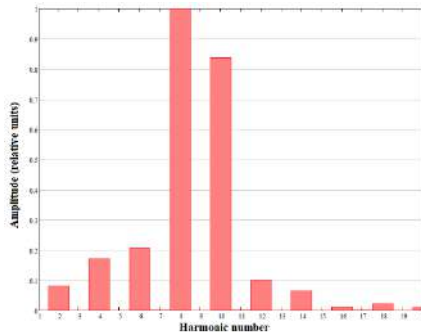


Рис. 2 – Кривая распределения индукции в воздушном зазоре генератора

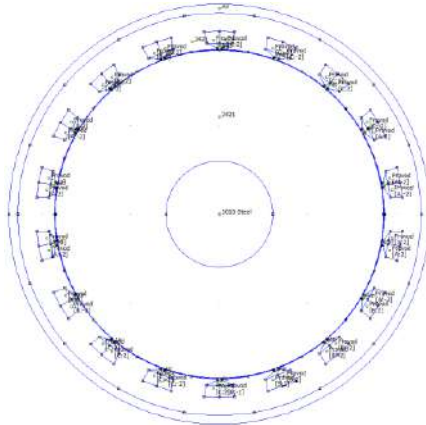


Рис 2 - Модель генератора для исследования магнитного поля

Кривая распределения индукции была получена вдоль средней линии ВЗ и разложена в ряд Фурье [4]. На рисунке 2 представлен гармонический состав функции распределения индукции в ВЗ.

Как видно из рисунка 2 для $q = 3/8$ рабочей является 8-ая гармоника, ее амплитуда максимальна по отношению к другим. Гармонический состав имеет ряд нежелательных пространственных гармоник что приводит к описанным ранее негативным эффектам. Наибольшие амплитуды соответствуют 10, 6, 4, 12, 2 и 14 гармоникам.

Внешняя характеристика генератора была построена с использованием программного пакета ANSYS Motor-CAD. Для различных значений нагрузки был произведен расчет и получены точки для построения характеристики, которая представлена на рисунке 5.

Номинальное изменение напряжение составило:

$$\Delta U_{\text{н\%}} = \frac{\Delta U_{\text{н}}}{U_{\text{н}}} \cdot 100 = \frac{300,2 - 220}{220} \cdot 100 = 36,364 \%$$

Устранения нежелательных пространственных гармоник позволит снизить индуктивность статорной обмотки. Этого можно добиться можно за счет создания дополнительной обмотки, магнитное поле которой не будет значительно уменьшать амплитуду рабочей гармоники, но позволит подавить действие нежелательных гармоник [2].

Данный метод можно свести к следующим этапам [3]:

- 1) Удвоить количество пазов в конструкции, $Z_1 = 36$

- 2) Разделить трехфазную обмотку на две трехфазные группы, (A1, B1, C1) и (A2, B2, C2).
- 3) Расположить обмотку (A2, B2, C2) со сдвигом на 180 механических градусов относительно основной обмотки (A1, B1, C1). Концы A1 и A2, B1 и B2, C1 и C2 подключаются последовательно однополярно, если количество пар полюсов четное, или с противоположной полярностью, если количество пар полюсов нечетное.

Основная обмотка укладывается в те же пазы, что изначально, а дополнительная укладывается в новые пазы со сдвигом. Число витков в каждой катушке уменьшается вдвое, при этом уменьшается необходимая площадь паза. Не смотря на уменьшение ширины зуба, уровень индукции в зубцах остается на том же уровне за счет уменьшения полного тока паза вдвое. При этом, общее число витков в статорной обмотке не изменится.

На рисунке 3 схематично изображены конструктивные изменения при реализации метода.

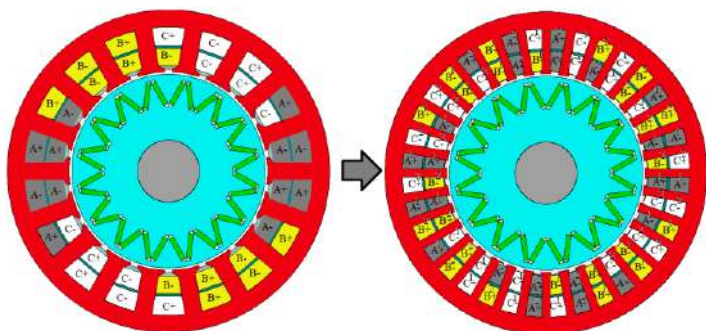


Рис.3 – Конструктивные изменения при реализации метода

На рисунке 4 представлен гармонический состав функции распределения индукции в воздушном зазоре после реализации методики, описанной выше. Из рисунка 4 видно, что нежелательные гармоник под номерами 10, 4, 6, 15 были устранены.

Для улучшенной машины была построена внешняя характеристика, на рисунке 5 представлено сравнение внешних характеристик исходного и модернизированного генератора.

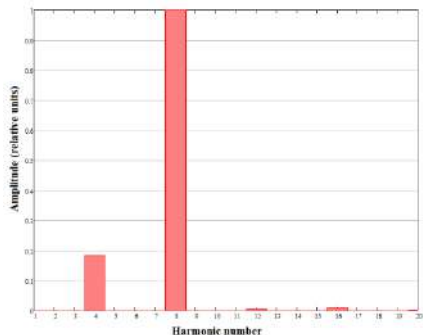


Рис.4 - Гармонический состав после реализации методики

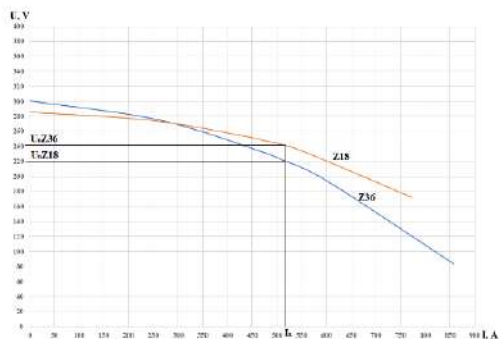


Рис.5 – Сравнение внешних характеристик

В результате применения метода, внешняя характеристика стала значительно жестче (Z36), желаемый результат был достигнут. В таблице 2 представлены индуктивности статорных обмоток генератора по продольной и поперечной осях и значение номинального изменения напряжения. Индуктивность статорной обмотки значительно снизилась, номинальное изменение напряжения уменьшилось в 2 раза.

Таблица 1 – Сравнение характеристик генераторов

	Z = 18	Z = 36
L_d, mH	0,1807	0,08653
L_q, mH	0,1769	0,1892
$\Delta U_{H\%}$	36,364	18,017

Результаты работы показали, что применение описанной методики привело к желаемым результатам. Генератор с улучшенной конструкцией обладает рядом значительных преимуществ по сравнению с машинами с классической дробной зубцовой обмоткой. Изменения позволили улучшить гармонический состав магнитного поля, устранить нежелательные пространственные гармоники и тем самым снизить индуктивности обмотки (за счет уменьшения индуктивности дифференциального рассеяния), что привело к улучшению внешней характеристики. Номинальное изменение напряжения генератора при этом уменьшилось в 2 раза.

Описанные в работе конструктивные изменения позволяют сохранить достоинства дробных зубцовых обмоток и при этом получить описанные выше преимущества. Методика может быть применена как к генераторам, так и к двигателям переменного тока с дробными зубцовыми обмотками с q отличным от $q = 3/8$.

Литература:

1. A.F. Shevchenko, A.G. Pristup. Elektricheskie mashiny s postoyannymi magnitami: uchebnoe posobie / – Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2016. – 64 s.c.

2. Babitskiy D.Yu. Uluchshenie formy MDS sinkhronnogo generatora s drobnymi zubtsovymi obmotkami: Master's dissertation / Faculty of Mechatronics and Automation of Novosibirsk State Technical University. – Novosibirsk, 2019. – 64 p.

3. Jiabin Wang, Vipulkumar I. Patel, and Weiya Wang. Fractional-Slot Permanent Magnet Brushless Machines with Low Space Harmonic Contents // Ieee transactions on magnetics // - 2014. -Vol. 50, NO.

4. M.V. Abramov, A.G. Pristup. Realizatsiya elektromagnitnogo vzbuzhdeniya v sinkhronnom generatore s drobnoy zubtsovoy obmotkoy // Nauka Tekhnologii Innovatsii 2020, Part 5, 30 now – 04 dec. 2020: Proceedings, - Novosibirsk, -P. 69-73.

ПРИМЕНЕНИЕ СДВИГА ЧАСТИ ОБМОТКИ СТАТОРА ДЛЯ ДРОБНОЙ ЗУБЦОВОЙ ОБМОТКИ С ЧИСЛОМ ПАЗОВ НА ПОЛЮС И ФАЗУ $q=4/11$

Д.Ю. Бабицкий, А.С. Лобачева

Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, babiczkij.2013@corp.nstu.ru

Научный руководитель: Шевченко А.Ф., д.т.н., профессор

Особенностью дробных зубцовых обмоток является гармонический состав магнитного поля, в котором присутствует ряд нерабочих гармоник, вызывающих негативные эффекты. На сегодняшний день существует ряд способов по улучшению гармонического состава магнитного поля, среди которых можно выделить сдвиг части обмотки статора. В настоящей работе проведено исследование по применению данного способа для дробной зубцовой обмотки с числом пазов на полюс и фазу $q=4/11$.

A specificity of fractional slot concentrated winding is magnetic field space harmonic content which consists of number of non-working harmonics that cause undesirable effects. There are a number of ways to improve the harmonic content of magnetic field, among which approach of stator shifting should be highlighted. Current work presents application of this approach for fractional slot concentrated winding with 4/11 number of slot per pole per phase.

Особенностью дробных зубцовых обмоток (ДЗО) с числом пазов на полюс и фазу $q < 1$ является то, что каждая катушка такой обмотки охватывает один зубец. Такое решение делает возможным выполнение электрических машин большой полюсности с ограниченным числом пазов, что позволяет уменьшить их габариты. Современные высококоэрцитивные редкоземельные магниты с высокой удельной магнитной энергией позволяют избавиться от электрических потерь в роторе, а также уменьшить его размеры. Совокупное применение двух данных технических решений позволяет получить в сравнении с классическими электрическими машинами следующие преимущества: повышенная энергоэффективность; меньший расход активных материалов; улучшенные массогабаритные показатели.

Однако необходимо иметь в виду особенности гармонического состава магнитодвижущей силы (МДС), создаваемой ДЗО, а именно наличие помимо рабочей гармоники как субгармоники, так и высших гармоник [1]. Данные нежелательные гармоники МДС приводят к появлению таких эффектов как: дополнительные потери в стали и постоянных маг-

нитах, возникновение радиальных сил, и, как следствие, магнитных шумов и вибраций, высокий уровень дифференциального рассеяния, приводящий к увеличению общей индуктивности обмотки, что необходимо учитывать во время проектирования электрической машины.

На сегодняшний день исследователями со всего мира представлен ряд способов улучшения гармонического состава МДС ДЗО. Можно выделить следующие варианты: использование магнитных барьеров в ярме и зубцах статора, применение четырехслойной обмотки, использование двух независимых трехфазных обмоток и сдвиг части обмотки статора. Среди них стоит отметить способ сдвига части обмотки статора, как показывающего лучшие результаты по улучшению характеристик электрической машины [2]. Описать способ сдвига части ДЗО статора можно следующим образом. Статор выполняется с удвоенным числом пазов. Обмотка разделяется на две равные части: первая укладывается по такой же схеме, что и обычная ДЗО, но с шагом 2, вторая же укладывается по тому же принципу, но с определенным пространственным сдвигом относительно первой половины a_A . Концепция сдвига части обмотки статора показана на рисунке 1. Однако, данный способ модификации ДЗО исследован только для обмотки с числом пазов на полюс и фазу $q=2/5$. В настоящей работе проведено исследование по применению сдвига части обмотки статора для ДЗО с числом пазов на полюс и фазу $q=4/11$, для которой рабочей является 11 гармоника МДС.

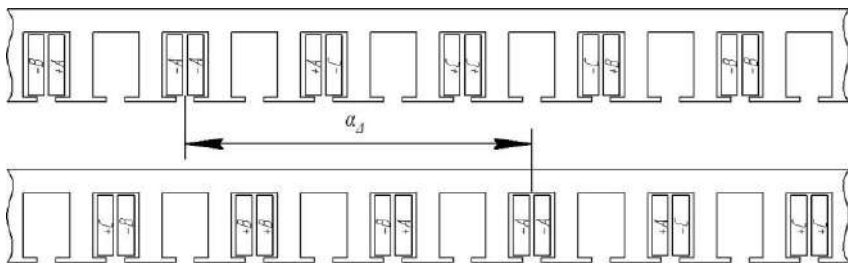


Рис.1 – Эскиз развертки электрической машины с применением сдвига части обмотки

При применении сдвига обмотки конечный гармонический состав МДС непосредственно зависит от угла сдвига между частями обмотки. Результирующий обмоточный коэффициент каждой гармоники можно записать как [3-5]:

$$k'_{об.v} = k_{об.v} \left| \cos \left(\frac{v\alpha_A}{2} \right) \right| \quad (1)$$

где ν - номер гармоники, $k'_{об,\nu}$ - обмоточный коэффициент ν -й гармоники итоговой обмотки, $k_{об,\nu}$ - обмоточный коэффициент ν -й гармоники обычной обмотки, α_d - сдвиг между двумя обмотками в геометрических градусах. Данная зависимость для ключевых гармоник представлена на рисунке 2. Для удобства величина сдвига представлена в зубцовых делениях τ . Анализируя эти соотношения можно выделить следующие варианты величины сдвига: 5τ , 9τ , 13τ , 17τ . Таким образом, необходимо определить изменение гармонического состава МДС при реализации разных вариантов сдвига обмотки.



Рис. 2 – Зависимость изменения обмоточного коэффициента ν -й гармоники от угла сдвига в зубцовых делениях

Исследование выбранных вариантов величины сдвига проводилось с использованием программного обеспечения, реализующего метод конечно-элементного анализа, FEMM. Для исключения влияния ротора на распределение магнитного поля, создаваемого обмоткой, он был заменен сплошным магнитопроводящим цилиндром. Полученное распределение магнитной индукции в воздушном зазоре анализировалось посредством разложения в ряд Фурье. Результаты моделирования представлены на рисунке 3.

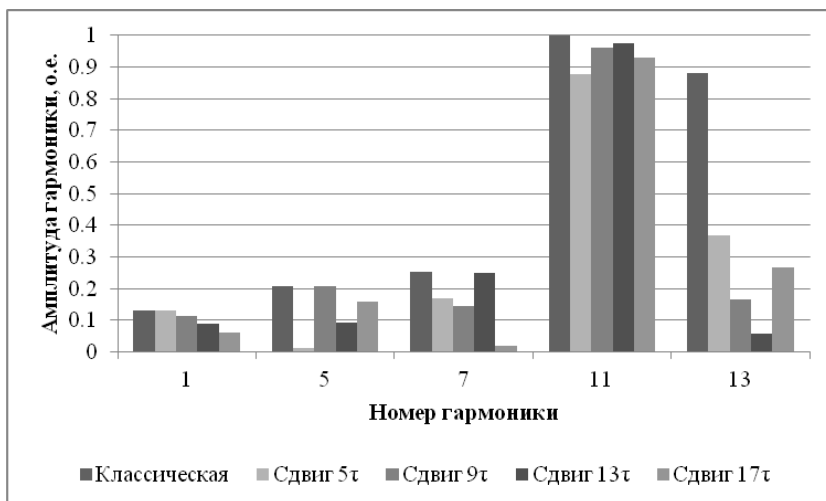


Рис. 3 – Амплитуды основных гармоник индукции магнитного поля в воздушно зазоре

Как отражено на рисунке 3, любой вариант модификации обмотки приводит к снижению рабочей гармоники, но для большинства вариантов сдвига это снижение менее 10%. Также необходимо отметить, что разные варианты сдвига обмотки приводят к уменьшению разных нежелательных гармоник. Следовательно, для применения определенного варианта сдвига части обмотки статора необходимо проводить дополнительные исследования по влиянию гармоник на характеристики электрической машины, разрабатываемой для конкретных условий работы.

Литература:

1. Shevchenko, A. F., and T. V. Chestyunina. "Analysis of magnetomotive forces of fractional-slot windings of electrical machines." Russian Electrical Engineering vol. 80, no.12, pp. 641-645, March 2010. doi: 10.3103/S1068371209120013.
2. Babitskii, D. Yu, et al. "Methods to Improve the Harmonic Composition of the Magnetic Field in Electric Machines with Fractional Slot Winding." Russian Electrical Engineering vol. 92, no. 6, pp. 320-325, Aug. 2021. doi: 10.3103/S1068371221060079.
3. P. B. Reddy, K. Huh and A. M. EL-Refaie, "Generalized Approach of Stator Shifting in Interior Permanent-Magnet Machines Equipped With Fractional-Slot Concentrated Windings," in IEEE Transactions on Industrial

Electronics, vol. 61, no. 9, pp. 5035-5046, Sept. 2014, doi: 10.1109/TIE.2013.2297515.

4. G. Dajaku and D. Gerling, "A Novel 24-Slots/10-Poles Winding Topology for Electric Machines," 2011 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2011, pp. 65-70, doi: 10.1109/IEMDC.2011.5994889.

5. P. B. Reddy, K. Huh and A. EL-Refaie, "Effect of stator shifting on harmonic cancellation and flux weakening performance of interior PM machines equipped with fractional-slot concentrated windings for hybrid traction applications," 2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2012, pp. 525-533, doi: 10.1109/ECCE.2012.6342776.

МЕТОДЫ РАСЧЁТА ХАРАКТЕРИСТИК СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ. КОНЦЕПЦИЯ «ИЗВЕСТНЫХ ТОЧЕК»

Г.О. Гейнрих, А.Ф. Шевченко, Г.Б. Вяльцев
Новосибирский государственный технический университет
г. Новосибирск, germangenrich@gmail.com

Работа посвящена выбору метода расчёта двигателя с постоянными магнитами. Заявленная проблема заключается в высоких требованиях к ресурсам ЭВМ и значительных затратах временного ресурса при расчётах наиболее распространёнными методами, а также в большом количестве допущений при расчётах. В качестве решения предлагается определить наиболее перспективный метод и внедрить его при составлении математической модели синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов.

This paper is concerned with the selection of a calculation method for a permanent magnet motor. The stated problem is high requirements to computer resources and significant time consumption of calculations by the most common methods, as well as a large number of assumptions in the calculations. As a solution, it is proposed to determine the most perspective method and implement it in the compilation of a mathematical model of a synchronous motor with permanent magnet excitation.

Синхронные двигатели с возбуждением от постоянных магнитов (СДПМ) на сегодняшний день – это наиболее перспективное решение в плане выбора электромеханического преобразователя в диапазоне ма-

лых и средних мощностей. Двигатели такого типа конструктивно просты и надёжны. Они имеют абсолютно жёсткие механические характеристики и не требуют затрат на возбуждение, обладают большой перегрузочной способностью и высоким быстродействием в переходных процессах.

До недавнего времени магнитоэлектрические двигатели не могли считаться предпочтительными, однако, появление высокоэрозионных магнитотвёрдых материалов, таких как NeFeB и SmCo и совершенствование аппаратной базы управления, связанное с развитием микропроцессорной техники и силовой полупроводниковой электроники, открыли новые перспективы для повсеместного использования СДПМ в различных областях.

В ряду электрических машин с постоянными магнитами особое место отведено машинам с дробными зубцовыми обмотками с числом зубцов на полюс и фазу $q < 1$. Кроме простоты конструкции и изготовления магнитоэлектрические двигатели с такими обмотками обладают такой отличительной особенностью, как высокий удельный момент. Пожалуй, по этому показателю им нет равных среди других типов двигателей. При перегрузке сила, снимаемая с единицы поверхности ротора статора, достигает значений 10 Нм/см^2 .

Расчёт и проектирование электрических машин является сложной, многогранной задачей. Развитие, накопленный опыт и определённые успехи в отрасли электромашиностроения сформировали довольно точные методики расчёта и определения характеристик, однако, говоря о синхронных машинах с постоянными магнитами, нельзя не отметить ряд конструктивных и технологических решений, которые нельзя отнести к традиционным. Например, для СДПМ рабочей гармоникой, как правило, является не первая, а некоторые из высших, таким образом в воздушном зазоре образуются несколько вращающихся электромагнитных полей. Сцепляется с полем ротора только одна из них, но нельзя пренебрегать существованием других. Также необходимо учитывать высокое насыщение участков магнитопровода машины, зависимость величины фазных токов от положения ротора, пульсации момента, особенности, характерные для постоянных магнитов, и прочие нюансы. Таким образом нельзя в полной мере говорить о применимости существующих методик расчёта синхронных машин к магнитоэлектрическим с дробнозубцовыми обмотками.

В виду таких сложностей при расчёте и моделировании принято использовать ряд идеализирующих допущений, в числе которых: предположение о гладком воздушном зазоре; учет только радиального синусоидального или трапецеидального распределения индукции в зазоре; от-

сутствие учета зубчатости магнитопроводов и насыщения стали магнитной цепи. Из-за этого невозможно окончательно определить характеристики разрабатываемой машины до проведения ходовых испытаний в различных режимах нагрузки, аварийных режимах работы. Кроме того, говоря о синхронных машинах с постоянными магнитами, как о составляющих быстродействующих, высокоточных позиционных систем электропривода, тем лучше, чем меньше подобных допущений было заложено.

Для того, чтобы охватить и учесть максимальное количество допущений и особенностей, в данной работе предлагается определить наиболее предпочтительную математическую модель магнитоэлектрической синхронной машины.

В основу современных программных продуктов, предназначенных для проектирования электрических машин и расчётов магнитного поля, заложено численное моделирование, которое базируется на методе конечных элементов. Используя такое программное обеспечение для расчётов, действительно, можно добиться высокой степени точности, определить промежуточные параметры, такие как: насыщение отдельных участков конструкции, магнитные потоки и прочие. Говоря о недостатках такого способа расчёта, нельзя не упомянуть требовательность к расчётной мощности ЭВМ и высокие временные затраты. Немалое время тратится даже, решая статическую полевою задачу при приемлемой плотности сетки элементов. Так как для полноценного исследования работы электрической машины требуется рассматривать несколько режимов работы в течение некоего времени, т.е. решать динамическую задачу, для этого расчёт производится в нескольких итерациях, и без того немалая его длительность на порядок возрастает. На практике, чтобы избежать таких времязатрат – понижается плотность сетки, в ущерб точности расчёта. Поэтому нельзя говорить о программных продуктах, базирующихся на методе конечных элементов, как о панацее.

Перспективным видится использование гибридного метода, сочетающего в себе расчёт методом конечных элементов и концепцию известных точек. Суть метода заключается в том, что, имея определённый набор данных, пригодных для использования в качестве начальных условий для системы дифференциальных уравнений, описывающих электрическое равновесие машины, можно с высокой степенью точности спрогнозировать дальнейшее поведение машины. Набор данных, в число которых входит: положение ротора, значения фазных токов, момент, приложенный к ротору, потоки – основные и рассеяния в определённый момент времени, имеет название «известная точка». Массив известных точек удобно находить при помощи, упомянутого выше, ме-

тогда конечных элементов и можно представлять в виде трёхмерных поверхностей или матриц. Далее, задаваясь небольшими отрезками времени, при помощи сплайновой интерполяции можно рассчитать дополнительные точки, описывающие дальнейшее течение работы двигателя.

Таким образом, расчёт данным методом можно разделить на два этапа. В первом – рассчитывается массив опорных (известных) точек, лишь однократно прибегнув к расчёту методом конечных элементов; во втором – относительно простой процесс интерполяции этих точек. После проделанной работы можно переходить к рассмотрению любых режимов работы машины. Помимо всего, наличие в конструкции синхронной магнитоэлектрической машины датчика положения ротора исключает время из списка переменных, влияющих на картину поля, что также упрощает расчёт.

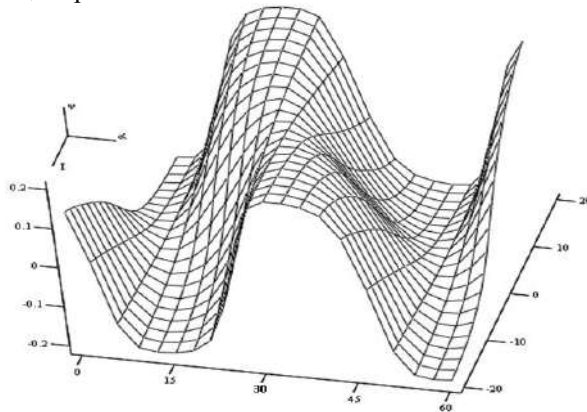


Рис. 1 – Пример массива известных точек, характеризующего потокосцепление обмотки статора

Сопряжённая модель машины с возбуждением от постоянных магнитов, составленная предложенным методом, позволяет существенно экономить ресурс ЭВМ, что делает ее значительно более доступной для широкого использования. Работы по автоматизации процессов расчёта в виде исполняемого компьютерного алгоритма активно велись на кафедре электромеханики НГТУ Г.Б. Вяльцевым. В настоящее время ведутся работы по изучению возможности интеграции алгоритма в систему электропривода для улучшения показателей при управлении синхронным двигателем с постоянными магнитами.

Литература

1. А. Ф. Шевченко, Г. Б. Вяльцев Расчет характеристик электрических машины при помощи известных точек, определенных методом конечных элементов // Электротехника, электромеханика и электротехнологии ЭЭЭ-2009: материалы четвертой научно-технической конференции с международным участием. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. - с.53-58

2. А. Ф. Шевченко, Г. Б. Вяльцев Сравнение возможностей аналитического и численного методов моделирования электрической машины // Электротехника. – 2011. – № 6. – С. 20а–24

3. Шевченко А. Ф. Многополюсные синхронные машины с дробными q меньше 1 зубцовыми обмотками с возбуждением от постоянных магнитов / А. Ф. Шевченко // Электротехника. – 2007. – № 9. – С. 3–9

УПРАВЛЯЕМЫЙ АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ МОЩНОСТЬЮ 15 КВТ ДЛЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ

И.С. Ермолов, З.С. Темлякова

**Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, van9-1998@mail.ru**

Работа посвящена выбору конструкторских решений для асинхронного двигателя мощностью 15 кВт, благодаря которым увеличатся его энергетические показатели. В процессе работы предлагается сделать обзор современных материалов активных частей электрических машин, сформировать выводы о целесообразности их применения для повышения энергоэффективности.

The paper is devoted to the choice of design solutions for an asynchronous motor with a power of 15 kW, due to its increased energy performance. In the process of work, it is proposed to review modern materials of active parts of electrical machines, to form conclusions about the appropriateness of their use to increase efficiency.

Внедрение управляемых электроприводов в различные отрасли промышленности и сельского хозяйства обуславливается к постоянно растущим требованиям к качеству технологических и производственных процессов.

Такое повсеместное использование сделало современный электро-

привод не только основной энергосиловой установкой, которая способна обеспечивать исполнительные механизмы механической энергией, но и средством управления технологическими процессами, так как задачи по реализации качества производственных процессов в настоящее время в большинстве случаев возлагаются на системы управления регулируемы электродвижениями в сочетании с системами технологической автоматизации.

Развитие математической теории машин переменного тока, создание усовершенствованных силовых полупроводниковых приборов и преобразователей на их основе, использование современных средств управления, включая микропроцессорные, позволили создать высококачественные и надежные системы регулируемых асинхронных электродвижений, которые становятся основным видом регулируемого электродвижения. Как указывается в [2], в 2002 г. на европейском рынке из общего числа продаваемых регулируемых электродвижений переменного тока составили 68 %, электродвижения постоянного тока — 15 %, механические и гидравлические электродвижения — 17%. Тенденция возрастания доли внедряемых регулируемых асинхронных электродвижений объективно сохранится и в дальнейшем, так как массовый регулируемый электродвижение может быть реализован только на базе асинхронных электродвижений. Это связано с тем, что в диапазоне мощностей до 100 кВт их производится в 40 — 50 раз больше, чем электродвижений постоянного тока [1].

Асинхронные электродвижения используются главным образом в режиме электродвижения. Это основной электродвижение, применяемый в промышленности, сельском хозяйстве и в быту. Асинхронные электродвижения являются электродвижениями для большинства электродвижений. Промышленное производство электродвижений в движение, главным образом, асинхронными электродвижениями. Асинхронные электродвижения потребляют около половины электродвижения, вырабатываемой в стране. При этом наибольшее количество электродвижения потребляют электродвижения мощностью до 10 кВт. Предельная мощность асинхронных электродвижений — несколько десятков мегаватт. Номинальные напряжения в асинхронных электродвижениях большой мощности доходят до 10 кВт. В индикаторных системах применяются асинхронные электродвижения мощностью от долей ватта до сотен ватт. Асинхронные электродвижения выпускаются единичными сериями в огромных количествах в большом диапазоне мощностей.

В генераторном режиме асинхронные электродвижения применяются редко. Для создания магнитного поля в асинхронной электродвижении (как и в трансформаторе) необходима реактивная мощность, которая потребляется из электродвижения (ее вырабатывают синхронные электродвижения [3]) или от других источ-

ников реактивной мощности (например, батареи конденсаторов). Это одна из особенностей асинхронных машин, которая ограничивает их применение в генераторном режиме.

Как и у любого другого типа машин, у асинхронного двигателя есть свои преимущества и недостатки.

К преимуществам можно отнести:

1. Асинхронный двигатель обладает наиболее простой конструкцией, в сравнении с другими типами машин. Это объясняется принципом их действия и использованием стандартной трёхфазной системой электроснабжения. Отсюда вытекает ещё одно достоинство –наиболее низкая цена.

2. Простота подключения. Достаточно просто подать напряжение на обмотки через коммутационный аппарат, для включения двигателя, благодаря тому, что в стандартной системе питания фазы сдвинуты на 120 градусов, вращающееся поле формируется без дополнительных преобразований.

3. Асинхронные двигатели считаются самыми надёжными и долговечными. Стоимость их обслуживания не высока и не представляет сложности.

К недостаткам относят:

1. Бросок тока при пуске. В машинах мощностью более 10кВт ток при пуске двигателя превышает номинальные значения в 4-6 раз в течении нескольких секунд. Это обстоятельство делает невозможным прямой пуск машины.

2. Пусковой момент. В силу электрических и механических переходных процессов в момент пуска двигатель обладает низким КПД и большой реактивностью. Из-за низкого пускового момента привод может не справиться с началом вращения тяжелых механизмов. Этот же недостаток приводит к нагреву двигателя при пуске. Отсюда возникает другая проблема – ограничение количества пусков в единицу времени.

3. Из-за конструктивных особенностей такие двигатели практически не производятся на напряжение питания менее 220 вольт. В типичной асинхронной машине магнитопровод состоит из двух частей: неподвижного цилиндрического статора и вращающегося цилиндрического ротора, который находится во внутренней полости (в расточке) статора. Радиальный зазор между статором и вращающимся ротором выполняется минимальным для лучшей магнитной связи между обмотками.

В пазах шихтованного сердечника ротора может быть размещена обмотка одного из двух типов. Обмотка первого типа – это такая же, как и на статоре, трехфазная пространственно-распределенная обмотка, со-

единяемая по схеме «звезда», начала фаз подсоединены к трем контактными кольцам, неподвижно закрепленным на валу, и вращающимся вместе с ротором. Кольца электрически изолированы друг от друга и от вала. Такой ротор называется фазным [3].

Обмотка другого типа, располагаемая в пазах ротора, называется беличьей клеткой. Для ее изготовления в пазы ротора заливается расплавленный алюминий и после охлаждения в пазах образуются алюминиевые стержни.

При использовании двигателей с фазным ротором можно снизить пусковой ток, тем самым увеличить пусковой момент, благодаря введению пусковых реостатов в цепь ротора. Однако, из-за усложненной конструкции и увеличения стоимости применение данных электродвигателей ограничено.

Для увеличения точности электромагнитного расчёта, проводимого при проектировании асинхронного двигателя, необходимо учесть влияние гармонического состава индукции в воздушном зазоре. Для определения рабочей гармоники и индукции в воздушном зазоре можно использовать встроенную функцию пакета *MathCAD FFT (Fast Fourier Transform* – быстрое преобразование Фурье), а также программу для формирования конечно-элементной модели в *2D - FEMM*.

Изначально формируется модель на участке, соответствующем воздушному зазору, который выделяется контуром. Расчет производится в режиме холостого хода при гладком роторе. Значения нормальной составляющей индукции в воздушном зазоре записываются в текстовый файл и используются как основной инструмент для гармонического анализа. После работы с полученным файлом в *MathCAD* получена диаграмма с амплитудами гармоник в воздушном зазоре.



Рис.1- Амплитуда гармоник в воздушном зазоре

При расчете потерь учитываются действующие значения амплитуд высших гармоник эквивалентной синусоиды, рассчитать его можно по формуле:

$$B = \sqrt{\left(\frac{B_{v1}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{B_{v2}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \dots + \left(\frac{B_{vm}}{\sqrt{2}}\right)^2}$$

Таким образом, при расчете потерь можно учесть добавочные потери (поверхностные, пульсационные) с учетом амплитуд высших гармоник.

Литература:

1. И.Я. Браславский Энергосберегающий асинхронный электропривод //Academa –2004– Москва
2. A. C.Technology Anticipated to Boost Sales in Variable Speed Drives Market //EPE Journal, 1996. - Vol. 6, № 2. - P. 7- 8. 78. Braslavsky I. Energy saving in electric drive // Proceeding of the 5-th international conference on unconventional and electrical systems. — Vol. 2. — Szczecin, 2001. - P. 235-238.
3. Забудский Е. И. Электрические машины. Асинхронные машины: учебное пособие для вузов / Е. И. Забудский. – М.: ООО «Мегаполис», 2017. – Ч. 2. – 304с.
4. Копылов И. П. Электрические машины: Учебник. – 5-е изд., перераб. – М.: Высшая школа, 2006.

ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ ПОГРУЖНОГО НЕФТЯНОГО НАСОСА

О.А. Жилин

**Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, oleg.zhilin.1998@mail.ru
Научный руководитель: Топорков Д.М., к.т.н., доцент**

В данной работе представлены результаты разработки высокоскоростного синхронного электродвигателя с постоянными магнитами мощностью 110 кВт и номинальной скоростью вращения 10000 об/мин для привода погружного нефтяного насоса. При разработке уделено отдельное внимание механическим расчетам, в том числе бандажной оболочки, предназначенной для крепления магнитов на роторе. Проведено моделирование теплового состояния двигателя в программной

среде ANSYS Motor-CAD. Исследовано влияние скручивания вала погружного электродвигателя на его развиваемый момент.

This paper presents results of designing a high-speed permanent magnet synchronous electric motor 110 kW power 10000 rpm for submersible oil pump. Special attention was also made on mechanical calculation, including the rotor sleeve for fixing permanent magnets. Thermal state of motor was simulated in ANSYS Motor-CAD software environment. The influence of shaft's torsion on motor torque was researched.

Сегодня в России основным способом механизированной добычи нефти является использование скважинных электроцентробежных насосов с приводом от погружного электродвигателя. Около 60% всех нефтяных месторождений оснащено такими установками, а доля добываемой нефти этим способом составляет более 75% от всего объема. Помимо этого, растет низкодебитный фонд нефтяных скважин с осложненными условиями добычи. Поэтому перед нефтяными компаниями остро стоит задача уменьшения габарита установок электроприводных центробежных насосов и повышения их энергоэффективности.

Одним из решений данного вопроса является замена погружных асинхронных на высокоскоростные синхронные двигатели с постоянными магнитами (вентильные), выступающие в качестве привода насоса [1]. Повышение частоты вращения позволяет спроектировать двигатель с меньшими габаритами, они имеют большую энергоэффективность, обладают большим моментом, способны работать в широком диапазоне частот вращения (приводит к возможности динамической оптимизации работы скважины). Также их применение позволяет снизить потери в подводящем кабеле за счет повышения напряжения питания самого электродвигателя. Регулирование скорости такого электродвигателя осуществляется с помощью бездатчиковой системы векторного управления.

Целью работы была разработка высокоскоростного синхронного электродвигателя с постоянными магнитами по заказу нефтедобывающей компании «Шлюмберге» в соответствии с их предоставленным техническим требованием, исходные данные которого приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Исходные данные для проектирования

Наружный диаметр корпуса, мм	69
Длина, мм	7000
Номинальная мощность, кВт	110
Номинальное напряжение, В	4000
Номинальная частота вращения/максимальная, об/мин	10000/12000
Температура пластовой жидкости, °С	170

Как можно заметить, при эксплуатации в скважине на габариты двигателя накладываются ограничения. Конструктивно погружные двигатели выполняют цилиндрической формы с малыми диаметрами и большой мощностью, что вызывает необходимость увеличивать их осевую длину.

Для учета всех конструктивных особенностей разработанного электродвигателя при моделировании картины магнитного поля использовался метод конечных элементов, который реализован в таком программном обеспечении, как ANSYS Motor-CAD. Это позволило выбрать наиболее подходящую геометрию двигателя (см. рисунок 1) и используемые в нем материалы, что с одной стороны будет обеспечивать требуемые параметры работы, а с другой удовлетворять условиям технологичности и механической прочности, т.к. сам электродвигатель, как говорилось ранее, имеет небольшие диаметральные размеры по сравнению с его длиной.

Важно отметить, что для обеспечения высоких технико-экономических показателей в данной разработке применен ряд технических решений, таких конструкция ротора с радиальным размещением магнитов, сосредоточенная обмотка на статоре, применяемые материалы (постоянные самарий кобальтовые магниты; вал электродвигателя из стали, способной магнититься) и другие. В результате чего был разработан двигатель мощностью 110 кВт и частотой вращения 10000 об/мин, который обеспечивает следующие показатели: КПД=91,4 % и $\cos\varphi=0,976$ о.е.

Наиболее ответственным узлом в данном электродвигателе, к которому было обращено особое внимание, являлась бандажная оболочка для крепления постоянных магнитов на роторе. С учетом высоких эксплуатационных температур была выбрана минимально возможная толщина, а также величина преднатяга [2], с которой бандаж должен сжаться на постоянные магниты, чтобы, с одной стороны, он удовлетворял условиям своей механической прочности и прочности используемых магнитов. А с другой – чтобы бандаж обеспечивал надежное крепление магнитов, не допуская их смещения.

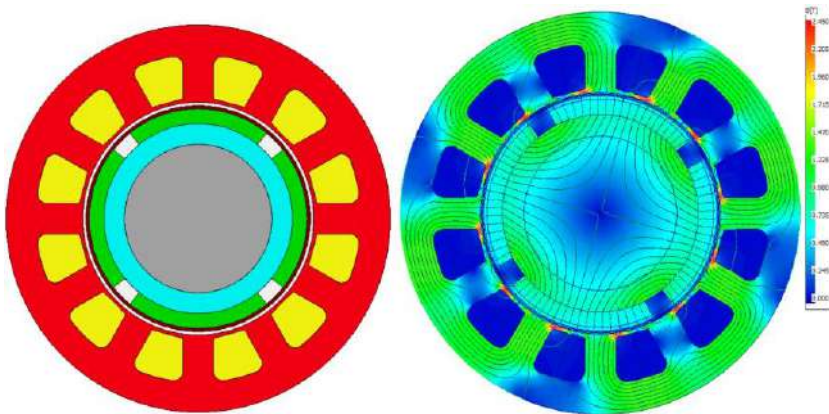


Рис. 1 – Эскиз поперечного сечения разработанного электродвигателя и картина распределения магнитного поля в нем

По условиям охлаждения данный двигатель располагается в обсадной колонне, где охлаждается за счет обтекания его корпуса пластовой жидкостью, скорость которой напрямую зависит от скорости вращения электродвигателя [3]. Для лучшей теплопроводности обмотки статора принято решение о ее компаундировании. По результатам моделирования теплового состояния электродвигателя в программном пакете ANSYS Motor-CAD на основании тепловой схемы замещения при скорости пластовой жидкости равной 0,5 м/с был получен меньший перегрев обмотки в среднем на 7-8 °С. Картина распределения температур в двигателе приведена на рисунке 2. Предельная рабочая температура электродвигателя ограничена изоляцией выбранного обмоточного провода электродвигателя, материалом бандажа и составляет 250 °С. Класс изоляции выбран завышенным с целью сохранения работоспособности двигателя ввиду возможных уменьшений скорости обтекаемой пластовой жидкости, а также возможных увеличений нагрузок.

При больших нагрузках в синхронных двигателях может возникать скручивание вала. В случае асинхронных двигателей скручивание не влияет на характеристики существенным образом. Однако, если двигатель синхронный (вентильный), то большой угол скручивания приводит к уменьшению развиваемого момента.

// TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering. – 2014. - Vol. 12, N 3. P. 1758 – 1763.

3. *Ивановский В.Н., Пекин С.С., Сабиров А.А.* Установки погружных центробежных насосов для добычи нефти. – М.: Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2002. – 256 с.

АКСИАЛЬНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ ДЛЯ ПРИВОДА ГОНОЧНОГО БОЛИДА

Р.О. Никулин, Д.М. Топорков

**Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, roma99352@gmail.com**

В данной работе представлены преимущества аксиального магнитоэлектрического двигателя, а также описан метод улучшения формы кривой М.Д.С. в воздушном зазоре.

This paper presents the advantages of an axial magneto electric motor, and also describes a method for improving the shape of the M.M.F. in the air gap.

Аксиальный двигатель с постоянными магнитами обладает высокими показателями момента и мощности, лучшими показателями материалоемкости и энергоэффективности в сравнении с классическими машинами, лучшими осевыми габаритами в сравнении с радиальными машинами. Однако помимо своих преимуществ аксиальный двигатель с постоянными магнитами имеет ряд недостатков: наличие пульсаций от постоянных магнитов, а также наличие высших и субгармоник магнитного поля, которые могут негативно отразиться на управлении спортивного болида. Поэтому актуальной становится задача по оптимизации параметров двигателя влияющих на управление болида.

Для решения поставленной задачи был выбран программный пакет ANSYS Twin Builder, позволяющий производить моделирование в 3-х мерной постановке задачи в модуле Maxwell 3D. Данный пакет позволяет с высокой точностью решать задачи в области электрических машин методом конечно элементного анализа.

Для исключения выше сказанных негативных эффектов был применен инновационный метод сдвига части обмотки статора, представленный на рисунке 1. Он заключается в том, что обмотка делится на две одинаковые части, которые смещаются друг относительно друга на

определенный угол, при этом количество зубцов удваивается, в результате чего уменьшаются зубцовые пульсации момента, а также уменьшаются амплитуды высших и суб-гармоник.



Рис. 1 – Общий принцип реализации сдвига части обмотки

В пакет Maxwell 3D была загружена модель двигателя, в которой были расставлены токи и материалы, а также произведен расчет поля. На рисунках 2 и 3 показан гармонический состав индукции магнитного поля в воздушном зазоре, для двух типов обмоток.

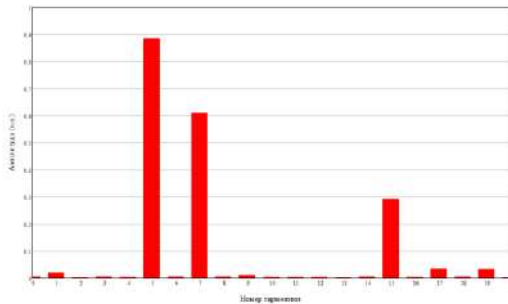


Рис. 2 – Гармонический состав индукции в воздушном зазоре классической обмотки $q=2/5$

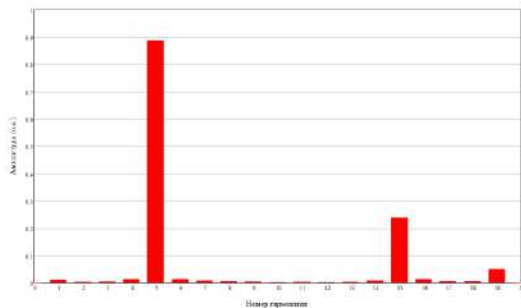


Рис. 3 – Гармонический состав индукции в воздушном зазоре улучшенной обмотки $q=2/5$

Для двигателя с улучшенной обмотки $q=2/5$ была построена угловая характеристика, представленная на рисунке 4, из которой видно, что максимальный момент равен 81 Нм, что удовлетворяет техническим требованиям – 75 Нм.

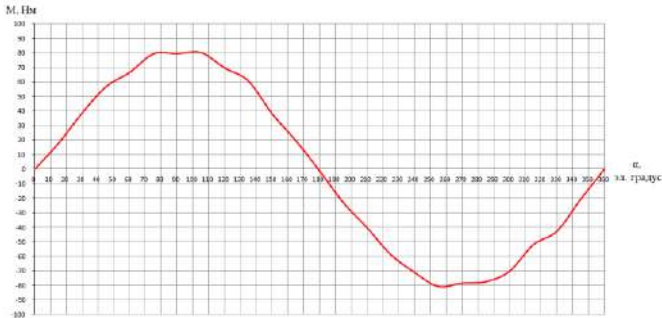


Рис. 4 – Угловая характеристика двигателя с улучшенной обмоткой $q=2/5$

Литература:

1. Щуров Н.И. Теория электрической тяги: Учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – 100 с.
2. Patel B. Reddy, Kum-Kang Huh, Ayman M. EL-Refaiе. Generalized Approach of Stator Shifting in Interior Permanent-Magnet Machines Equipped With Fractional-Slot Concentrated Windings// IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 61, NO. 9, SEPTEMBER 2014.

СИНХРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР С ВОЗБУЖДЕНИЕМ ОТ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ ДЛЯ ВЕТРОЭЛЕКТРОУСТАНОВКИ

М.Ю. Труханова, Л.Г. Шевченко

**Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, mariatruhanova55@gmail.com**

Научный руководитель: Шевченко Л.Г., к.т.н., доцент

В работе представлены различные способы получения энергии, преимущества ветроэнергетики, также осуществляется выбор типа генератора, который лучше подходит для ветроустановок, таковым

является синхронный генератор с возбуждением от постоянных магнитов и однозубцовыми обмотками на статоре.

The work selects the type of generator that is best suited for wind turbines, such as a synchronous generator with excitation from permanent magnets and single-pronged windings on the stator. Various methods of generating energy are presented, as well as the advantages of the selected generator in comparison with others.

Существует несколько видов источников энергии. Традиционные источники электрической энергии: тепловая ТЭС, энергия потока воды - ГЭС, атомная энергия - АЭС. Нетрадиционные источники электрической энергии, где невосполняемые энергоресурсы практически не тратаются: ветроэнергетика, приливная энергетика, солнечная энергетика.

Ветроэнергетика – это направление альтернативной энергетики, основанной на использовании возобновляемого источника энергии, которым является ветер. Ветрогенераторы преобразуют механическую мощность, вырабатываемую ветроколесом, в электрическую.

По цене производимой электроэнергии ветроустановки малой мощности уступают традиционным энергосистемам, если речь идет о районах с развитой структурой электросетей. Но есть зоны энергопотребления, для которых невыгодно строить линии электропередач или зоны с частыми отключениями электричества. Для таких зон экономически выгодно использование автономных ветровых установок.

В России такие ветровые зоны расположены на побережье Северного Ледовитого океана, а также на островах океана от Кольского полуострова до Камчатки. Также ветроэнергетические области расположены в районах Нижней и Средней Волги и Дона, на побережьях Каспийского, Охотского, Баренцева, Балтийского, Черного и Азовского морей. Отдельные зоны также расположены в Карелии, на Алтае, в Туве и на Байкале. В этих районах максимальная средняя скорость ветра всегда приходится на осенне-зимний период года, совпадающий с периодом максимальной потребности в электроэнергии и тепле. Около трети всего экономического потенциала ветроэнергетической отрасли в нашей стране сосредоточено на Дальнем Востоке, 14% – в Северном экономическом районе, около 16% – в Западной и Восточной Сибири.

ВЭУ имеют ряд преимуществ, основными из которых являются:

1. Практическая неисчерпаемость энергии ветра.
2. ВЭУ являются незаменимыми источниками энергии в районах, удаленных от централизованных.
3. Безопасность для природы и человека. Как и все альтернативные источники энергии, ветер экологически безопасен. Оборудование, пре-

образующее ветряную энергию, не создаёт выбросов в атмосферу, не является источником вредного излучения.

4. Для строительства ВЭУ можно выбрать земли, непригодные для хозяйственной деятельности.

5. Современные ВЭУ полностью автоматизированы и не требуют дежурного персонала. Монтируются и устанавливаются они очень быстро.

6. Перспективность. Ветроэнергетика находится только на середине своего пути. Потенциал данной отрасли не раскрыт на все 100%, а значит – всё ещё впереди.

Все вышеперечисленные преимущества ВЭУ способствуют тому, что интерес к ветроэнергетике с каждым годом повышается.

2020 год стал рекордным, как по количеству введённых объектов ветрогенерации, так и по общей мощности этих объектов. Всего, в 2020 году **на 8 объектах** было введено в эксплуатацию **282 ветроэнергетические установки**, их общая мощность составила **908 МВт**.

Схематично ветроэнергетическую установку (ВЭУ), работающую на автономную нагрузку, можно представить следующим образом (Рисунок 1):



Рис. 1 - Схема автономной ВЭУ.

Представленная на схеме автономная ВЭУ состоит из ветрогенератора, блока управления (контроллера), инвертора и аккумуляторной батареи.

Основной частью ВЭУ является электрический генератор. До последнего времени в качестве генераторов для ВЭУ применялись асинхронные генераторы (АГ) и синхронные генераторы (СГ) классического исполнения, генераторы постоянного тока. Однако данные виды генераторов обладают существенными недостатками. Основной из них – не соответствие частот вращения ветроколеса и генератора классического исполнения, что приводит к необходимости применения механического редуктора.

Поэтому выбор был сделан в пользу синхронного генератора с постоянными магнитами. Это многополюсный генератор, в котором многополюсность достигается применением однозубцовой обмотки с $q < 1$. Такой генератор может работать при низких скоростях вращения, что позволяет согласовать мощностные и скоростные параметры ветроколеса и генератора

Кроме того, дополнительно можно выделить следующие преимущества выбранного генератора:

1. упрощается технология изготовления;
2. уменьшается осевой размер машины за счет малых вылетов лобовых частей;
3. уменьшается расход обмоточной меди и уменьшает потери в обмотке статора за счет малой длины лобовых частей;
4. при одинаковой полюсности многополюсных электрических машин с классическими обмотками и с однозубцовыми дробными обмотками, последние имеют лучшие массогабаритные и энергетические показатели.

Многополюсный ротор с постоянными магнитами выполняется с тангенциальным размещением магнитов (коллекторного типа). Это позволяет добиться концентрации магнитного потока в воздушном зазоре, что, в свою очередь, позволяет уменьшить размеры магнита и улучшить массогабаритные показатели.

Данный тип генераторов целесообразно использовать для ВЭУ.

Литература:

1. Шевченко А. Ф., Приступ А. Г. Электрические машины с постоянными магнитами: учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – 60 с.

2. Ветроэнергетика, под редакцией Д. де Рензо. Перевод с англ. Под редакцией Я.И.Шефтера. М.Энергоатомиздат. 1982.

3. Шевченко А. Ф. Многополюсные синхронные машины с дробными q меньше 1 зубцовыми обмотками с возбуждением от постоянных магнитов[Текст] / А. Ф. Шевченко // Электротехника. - 2007. – №9. - С. 3-9.

АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ РАЗРАБОТКИ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ СИНХРОННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ С ДРОБНОЙ ЗУБЦОВОЙ ОБМОТКОЙ

А.Н. Царегородцев, А.Г. Приступ
Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, CaregorodcevAlex@yandex.ru
Научный руководитель: Приступ А.Г., к.т.н., доцент

В работе приведены преимущества и недостатки аналитических и численных методов расчета синхронных электрических машин с постоянными магнитами с дробными зубцовыми обмотками. Обозначены актуальные задачи расчета параметров таких машин. Обоснована необходимость разработки цифровой модели, позволяющей решить указанные задачи. Поставлена задача по оптимизации времени расчета данной модели.

The paper contains advantages and disadvantage of analytical and numerical methods for designing permanent magnet synchronous electric machines with fractional slot windings. The current issues of calculating such machines parameters are indicated. The necessity of the development of a digital model that allows solving the indicated issues has been substantiated. The problem was posed to optimize the computation time for this model.

Начало промышленного производства высококоэрцитивных постоянных магнитов, а также появление высокопроизводительных полупроводниковых устройств в последние десятилетия привело к расширению применения синхронных электрических машин с постоянными магнитами (СМПМ). Преимущество машин такого типа заключается в их высокой энергоэффективности и меньших размерах по сравнению с машинами постоянного тока и асинхронными машинами аналогичной мощности. Зачастую в СМПМ используются дробные зубцовые обмотки (ДЗО) с числом пазов на полюс и фазу $q < 1$. Каждая катушка такой обмотки, как правило, охватывает один зубец. Число пазов в СМПМ с ДЗО обычно незначительно отличается от числа полюсов, что позволяет выполнять многополюсные машины в относительно небольших габаритах. Кроме того, ДЗО проще в намотке и имеет меньший вылет лобовых частей по сравнению с классическими обмотками с $q > 1$. Несмотря на широкое распространение СМПМ с ДЗО до сих пор не существует общепринятой методики их проектирования и исследования.

Традиционные, аналитические методы проектирования электрических машин основаны на принятии массы упрощающих допущений, что, с одной стороны, позволяет ускорить процесс расчета, а, с другой

стороны, не всегда позволяет обеспечить достаточную точность и достоверность результатов расчета, особенно СМПМ с ДЗО.

Очевидно, что наибольшую точность расчета процессов электро-механического преобразования энергии можно обеспечить путем расчета электромагнитного поля в активном объеме преобразователя. В настоящее время существует достаточно большое количество программ численного моделирования электромагнитных полей, как правило реализующих метод конечных элементов. Хотя многие из этих программных пакетов предлагаются как инструмент для проектирования электро-механических преобразователей, на практике оказывается, что они решают только некоторые частные задачи, не позволяя напрямую получать параметры и характеристики, непосредственно интересующие электро-механика-проектировщика. Также следует отметить, что наиболее мощные программные пакеты трехмерного моделирования для своего применения требуют существенных временных и вычислительных ресурсов, что в ряде случаев ограничивает их использование для решения практических задач электромеханики.

При этом возникают следующие задачи, связанные с численным моделированием: расчет развиваемого момента и его пульсаций; определение индуктивностей обмоток; определение добавочных потерь при нагрузке.

Решение этих задач требует построения адекватных расчетных моделей для численного моделирования и выбора эффективных алгоритмов их применения для повышения точности и увеличения скорости моделирования при поисковых расчетах электрических машин.

Расчет вращающего момента электродвигателя или тормозного момента генератора требует проведения численного моделирования магнитного поля при ряде угловых положений ротора. При этом, с одной стороны, увеличение числа рассмотренных положений явно увеличивает точность расчета момента и его пульсаций, а с другой стороны, существенно влияет на время численного моделирования. Поэтому стоит задача минимизации количества расчетных точек, используемых при численном моделировании, которое зависит от полюсности машины, количества зубцов и типа применяемой обмотки, без снижения требуемой точности расчета.

В принципе применение методов численного моделирования при расчетах электрических машин, в частности метода конечных элементов, требует выбора оптимальных размеров сетки, при построении сеточной модели. На эти параметры завязаны, с одной стороны, скорость расчетов, а с другой – получаемая точность результатов. Очень часто задачей построения сеточной модели для конкретного устройства занимается автоматически работающий построитель сетки, который не всегда учитывает специфику конструкции и принципа действия устрой-

ства. Поэтому стоит задача настройки параметров сетки с целью получения достаточной для практики точности при сокращении времени расчета.

Задача расчета индуктивностей обмоток синхронной машины, как правило, сводится к расчету индуктивностей L_d и L_q , которые затем применяются для определения рабочих характеристик машины и управления ее работой. При этом, как правило, полагается, что при вращении ротора индуктивности в диапазоне от L_d до L_q изменяются по гармоническому закону и практически не зависят от тока обмотки. В реальных машинах указанные индуктивности могут существенно зависеть от режима работы и изменяться по несинусоидальному закону в функции положения ротора. Дополнительно в машинах с дробными зубцовыми обмотками, имеющих сравнительно высокую индуктивность дифференциального рассеяния, стоит задача учета влияния этой индуктивности на эквивалентную индуктивность обмотки.

Еще одной задачей, требующей адекватной обработки результатов численного моделирования, является задача расчета добавочных потерь при нагрузке, вызываемых нерабочими пространственными гармониками магнитодвижущей силы дробных зубцовых обмоток. Расчет этих потерь сводится в итоге к необходимости определения гармонического состава изменения магнитной индукции в элементах конструкции машины. Наиболее точный метод решения этой задачи – численное моделирование магнитного поля машины при различных угловых положениях ротора и соответствующих им значениях токов в обмотке. Решение этой задачи также требует адекватного построения численной расчетной модели, сочетающей в себе как требуемую точность расчета, так и достаточную скорость расчета, необходимую при расчете большого количества вариантов при проведении проектного расчета машин.

Традиционно принято считать, что активная часть проектируемого электромеханического преобразователя симметрична, а применяемые в ней материалы – однородны. Однако, вследствие ограниченной точности применяемого на производстве оборудования, реальные электрические машины могут обладать несимметрией, например, обусловленной эксцентриситетом ротора, приводящим к неравномерности ширины воздушного зазора. Также в реальной машине остаточные индукции отдельных постоянных магнитов могут различаться. Такие вероятные отклонения могут заметно влиять на характеристики электрической машины, поэтому расчётная модель должна иметь возможность их учёта при проектировании.

Таким образом, современные технологии компьютерного моделирования позволяют существенно повысить точность расчета электрических машин. Это особенно важно при проектировании синхронных машин с постоянными магнитами с дробными зубцовыми обмотками, рас-

чет которых с использованием традиционных методик может приводить к существенным неточностям. В то же время, при использовании численных методов возникает задача оптимизации расчетных алгоритмов в виду их большой ресурсоемкости. В разрабатываемой цифровой модели планируется учесть обозначенные особенности расчеты электрических машин.

Литература:

1. Шевченко А.Ф. Многополюсные синхронные машины с дробными q меньше 1 зубцовыми обмотками с возбуждением от постоянных магнитов // Электротехника. – 2007. – №9. – С. 3-9.
2. Вяльцев Г.Б. Математическая модель синхронной электрической машины с постоянными магнитами с дробными зубцовыми обмотками: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.01. – Новосибирск, 2013. – 193 с.
3. Нго Ф. Расчет индуктивностей синхронного двигателя с инкорпорированными постоянными магнитами // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2017. – №2(60). – С. 133-146.
4. Математическая модель синхронного генератора ветроэнергетической установки малой мощности / Ю.А. Макаричев, Ю.В. Зубков, А.С. Ануфриев, В.П. Певчев // Вестник СамГТУ. Технические науки. – 2017. – №3(55). – С. 66-74.

МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ СИНХРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР ДЛЯ АВТОНОМНОГО ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА БАЗЕ МИКРОГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Д.А. Ясюкевич, Л.Г. Шевченко

Новосибирский государственный технический университет,

г. Новосибирск, DaryaYasya@gmail.com

Научный руководитель: Шевченко Л.Г., к.т.н., доцент

В работе кратко описана рациональность использования микроГЭС, перечислены ее преимущества, представлена примерная схема микроГЭС и описан принцип ее действия. Обоснован выбор и преимущества синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов для микроГЭС.

The paper briefly describes the advantages and expediency of using micro-hydroelectric power plants, presents an approximate scheme of micro-hydroelectric power plants and

describes the principle of its operation. The choice and advantages of a synchronous generator with excitation from permanent magnets for micro hydroelectric power plants are substantiated.

В России к малой гидроэнергетике относят бесплотинные гидроэлектростанции (ГЭС), мощность которых не превышает 30 МВт, а мощность единичного гидроагрегата составляет менее 10 МВт. Такие ГЭС, в свою очередь, делятся на:

- микро-ГЭС (мощностью от 1.5 до 100 кВт);
- малые ГЭС (мощностью от 100 кВт до 30 МВт).

Примеры малых ГЭС в России: Республика Тыва – МГЭС установленной мощностью 168 кВт; Республика Алтай – МГЭС мощностью 400 кВт; Камчатская область — ГЭС-1 мощностью 1.7 МВт на реке Быстрая, каскад Толмачевских ГЭС.

Микро- и малые ГЭС играют большую роль в энергоснабжении отдаленных районов, являющихся энергодефицитными и занимающих до 40% территории России. Развитие малой гидроэнергетики в регионах обеспечивает:

- Создание собственных региональных генерирующих мощностей и снижение дефицита электроэнергии в регионе;
- Надежное электроснабжение качественной электроэнергией населенных пунктов в удаленных районах и на конечных участках магистральных линий электропередачи;
- Достижение экономической и социальной стабильности в населенных пунктах, которые до настоящего времени не подключены к единой энергетической системе;
- Снижение дотационности регионов, связанной с закупкой и завозом топлива в труднодоступные районы.

Основными преимуществами использования микроГЭС являются:

- Снижение потерь электроэнергии вследствие приближения энергоисточника к потребителю;
- Уменьшение негативного влияния на окружающую среду по сравнению с крупными ГЭС;
- Возможность использования в круглогодичном цикле работы.

Перечень потенциальных источников энергии для малой гидроэнергетики необычайно широк. Это небольшие реки, ручьи, естественные перепады высот на озерных водосбросах и на оросительных каналах ирригационных систем.

Подсчитано, что энергетический потенциал малой гидроэнергетики в России превышает потенциал таких возобновляемых источников энергии, как ветер, солнце и биомасса вместе взятых.

Малая гидроэнергетика имеет лучшие показатели в экономическом плане, является наиболее экологически безопасным способом получения электроэнергии и, следовательно, малая энергетика является наиболее экономичным решением энергетических проблем для территорий зон децентрализованного электроснабжения, которые составляют более 70% территории России. Это значительно дешевле и выгоднее, чем строительство линий электропередач или эксплуатация дизельных установок.

МикроГЭС — это установка, предназначенная для преобразования кинетической энергии воды в электричество.

Примерная схема микроГЭС представлена на рисунке 1.

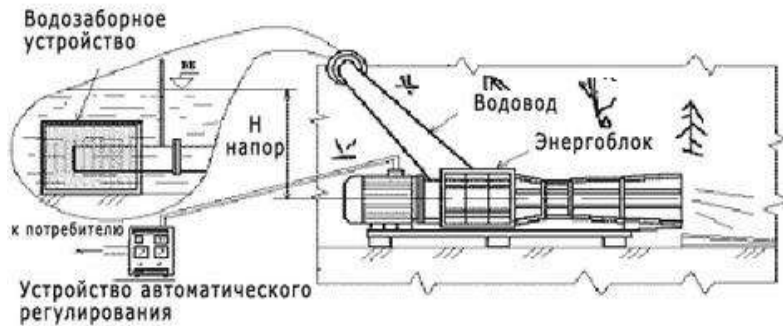


Рис. 1 - Общая конструкция МикроГЭС

Принцип действия микроГЭС: под действием напора потоки воды устремляются в требуемом направлении, в створе их движения монтируется турбина, на лопасти которой и поступает энергия движущихся водных масс. Эта кинетическая энергия воды преобразуется турбиной во вращательное движение, которое передается на вал генератора. С вала генератора переменный ток поступает на устройство автоматического регулирования, которое может включать выпрямитель и стабилизатор напряжения. Затем, как правило, через инвертор энергия поступает к потребителю.

Основой электрической части микроГЭС является электрический генератор.

При проектировании генераторов для микроГЭС необходимо согласование мощностных и скоростных параметров гидротурбины и генератора. Главная особенность заключается в том, что приводная гидротурбина имеет частоту вращения 100...800 об/мин. При использовании классического генератора необходимо применение механического ре-

дуктора. Наличие механического редуктора – это увеличение установленной мощности, эксплуатационных расходов и снижение ресурса работы, что сильно снижает надежность гидроустановки. Исходя из этого желательно, чтобы генератор, непосредственно сочлененный с гидротурбиной, был бы низкоскоростным.

В последнее время всё большее распространение в автономных электростанциях, в том числе и в микроГЭС, получают низкоскоростные синхронные генераторы с возбуждением от постоянных магнитов.

В данной работе предлагается применить для микроГЭС низкоскоростной синхронный генератор с постоянными магнитами, который разрабатывается на кафедре «Электромеханика» в НГТУ.

Основными преимуществами предлагаемого в данной работе синхронного генератора по сравнению с серийными электрическими генераторами являются:

1. Отсутствие мультипликатора. Низкая скорость достигается за счет использования однозубцовой обмотки с $q < 1$, которая позволяет выполнить генераторы многополюсными.

2. Выбранный генератор при одинаковой полноте с серийными генераторами имеет лучшие массогабаритные и энергетические показатели.

3. Использование в качестве возбуждения постоянных магнитов позволило избежать скользящих контактов в генераторе и, как следствие, повысить надежность микроГЭС.

Выбор генератора такого типа рационален для работы альтернативных возобновляемых источников энергии, в данном случае микроГЭС. Их преимуществами являются небольшие размеры, низкая стоимость и легкость в эксплуатации.

Литература:

1. Шевченко А. Ф., Приступ А. Г. Электрические машины с постоянными магнитами: учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – 60 с.

2. Генераторы для ветровых, малых гидравлических и приливных электростанций : сборник / Ю.М. Голоднов, А.В. Пиковский ; Науч. ред. И.А. Лабунец; ВИНТИ. - Москва : ВИНТИ, 1992. - 100 с. : ил. - (Итоги науки и техники, ISSN 0208-0672. Серия Нетрадиц. и возобновляемые источники энергии ; Т.3)

3. Многополюсные синхронные машины с дробными однозубцовыми обмотками. Часть 1. Основы теории и конструкции. Методическое руководство. Новосибирск, 1995.-39с

ВОПРОСЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ С ДРОБНЫМИ ЗУБЦОВЫМИ ОБМОТКАМИ ДЛЯ ПРИЛИВНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

И.Л. Попов

**Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, select12345@yandex.ru**

Научный руководитель: Топорков Д.М. к.т.н., доцент

В данной статье приведена краткая информация о текущем состоянии и перспективах развития приливной энергии, а также затронуты вопросы проектирования и моделирования синхронных генераторов для нужд приливных электростанций

The article provides brief information on the current state and prospects for the development of tidal energy, and also touches upon the design and modeling of synchronous generators for the needs of tidal power plants.

Энергия – одно из основных понятий естественных наук, которое определяет сущность энергетики как способа деятельности по получению, преобразованию и использованию энергии в интересах человека.

В этом смысле энергетика представляет собой основу всех других форм жизнедеятельности людей и цивилизационного процесса.

Современный мир невозможно представить без энергетической системы. Более того, развитие экономики, современного общества, улучшение экологической ситуации напрямую зависят от развития энергетической системы всего мира.

Рост количества потребляемой энергии в данный момент носит экспоненциальный характер и за последние 50 лет количество потребляемой энергии человечеством увеличилось почти втрое, причем более 75% всей энергии добывается путем преобразования углеводородов и ядерного распада.

Экспоненциальный рост потребления энергии обусловлен ростом количества населения на Земле и повышением уровня жизни, из-за чего общество стало потреблять гораздо больше ресурсов. Очевидно, что количество населения только растет, мировая экономика с каждым годом развивается, поэтому объективных причин для снижения темпов роста потребления нет.

На сегодняшний день большая часть мировой электроэнергии вырабатывается из ископаемого топлива. Помимо экономических проблем, потребление ископаемого топлива загрязняет окружающую среду и ускоряет глобальное потепление. По данным United States (U.S) International Energy Outlook 2016 (IEO2016) (EIA), в 2012 году почти

67,2% выработки мировой электроэнергии было произведено за счет ископаемого топлива (угля, нефти и природного газа). Согласно тому же исследованию, на долю возобновляемых источников энергии приходилось всего 21,9% мировой элетроэнергии.

Возобновляемые источники энергии имеют огромные экономические и экологические преимущества. «Зелёная» энергия отличается большим количеством и разнообразием, обладает огромным потенциалом. Следовательно, при правильном использовании возобновляемые источники энергии могут в конечном итоге обеспечить энергетическую безопасность для стран по всему миру, сократить выбросы парниковых газов и, возможно, остановить глобальное потепление, которое является одной из ключевых проблем XXI века. В результате наблюдается глобальная тенденция к использованию большего количества возобновляемых источников энергии, и ожидается, что доля альтернативной энергетики в мировом производстве электроэнергии увеличится в следующие десятилетия.

Существует огромный потенциал возобновляемых источников энергии, которые хранятся в океанах. Более 70% поверхности Земли покрыто океанами, и они действуют как крупнейшие солнечные коллекторы и улавливают тепловую энергию от солнца, гравитационное притяжение луны вызывает приливы и отливы, а ветер порождает волны. По сравнению с другими возобновляемыми источниками энергии, источники энергии океана имеют ряд важных преимуществ, которые включают изобилие, доступность, высокий коэффициент загрузки, меньшее воздействие на окружающую среду и предсказуемость поведения источника.

Приливная энергия - это тип возобновляемой энергии, который обусловлен разницей высот между приливом и отливом (Polis et al., 2017). В общем случае, приливная энергия отличается высокой плотностью энергии, низким воздействием на окружающую среду и высокой предсказуемостью (El Tawil et al., 2017). Впервые приливная энергия была использована в Европе для работы зерновых мельниц более 1000 лет назад (EIA, 2017b). Сегодня она в основном используется для производства электроэнергии.

Многие возобновляемые источники энергии имеют переменчивый характер. Исключение составляют приливные течения. Приливы являются абсолютно предсказуемыми источниками энергии (Chen and Liu, 2017), потому что они обусловлены астрономическими колебательными гравитационными силами и синусоидальный характер этих сил создает преимущество перед другими возобновляемыми источниками энергии, такими как океанские волны, солнце и ветер (Marta-Almeida et al., 2017).

На данный момент в России существует одна действующая приливная электростанция, расположенная в Мурманской области в заливе Кислая губа в Баренцевом море – Кислогубская ПЭС. Станция имеет два генератора мощностью 0,2 МВт и 1,5 МВт. Относительно малая мощность станции обусловлена тем, что она является экспериментальной и не предназначена для промышленной выработки электроэнергии. Главный смысл существования станции – опробование нового оборудования и технологий и наработка опыта в эксплуатации такого вида электростанций, для успешного дальнейшего проектирования и применения более мощных приливных станций.

Станция была построена в 1968 году и изначально имела один гидроагрегат мощностью 0,2 МВт. В 2007 году была проведена реконструкция – был установлен второй гидроагрегат мощностью 1,5 МВт и заменена турбина первого гидроагрегата. В данный момент станция функционирует с двумя гидротурбинами нового типа – ортогональными. Данные турбины являются уникальной разработкой ПО “Севмаш”. Особенностью турбины является ее высокий КПД (порядка 72%) и возможность работать как при приливе, так и при отливе, причем в обоих случаях турбина вращается в одном направлении со скоростью 37,5 об/мин. На станции планируется проведение еще одной реконструкции: на этот раз планируется замена гидрогенераторов.

В данный момент станция функционирует с двумя синхронными генераторами: БГ-200-4-ОМ4 (для турбины с мощностью 0,2 МВт) и СГП-1500-6,3-1200 (для турбины с мощностью 1,5 МВт). Данные электрические машины не являются индивидуальной разработкой для Кислогубской ПЭС. Очевидно, что генераторы приводятся во вращение посредством мультипликатора. Наличие механической передачи повышает стоимость системы, снижает её КПД, надежность и приводит к ряду других, менее серьезных, недостатков. На станции планируется проведение очередной реконструкции, в ходе которой существующие гидрогенераторы будут заменены на специально спроектированные машины. Очевидно, что для повышения технико-экономических показателей, генератор должен иметь прямой привод. Принимая во внимание низкую скорость вращения гидротурбины, проектирование такого генератора с обмоткой классического типа приведет к негативным последствиям в виде измельчения зубцово-пазовой зоны, ухудшению массогабаритных показателей и т.д.

Проектирование данного генератора с дробной-однозубцовой обмоткой позволит исключить вышеперечисленные негативные факторы, так как в таких обмотках каждая катушка охватывает один зубец статора, что позволяет проектировать машины с большим количеством

поллюсов при относительно малом диаметре расточки. Также, более меньшие вылет и длина лобовых частей в таких обмотках позволяет улучшить технико-экономические показатели изделия, относительно машин с классическим типом обмоток.

Применение генератора с дробной-однозубцовой обмоткой на Кислогубской ПЭС позволит избежать использование мультипликатора, что, несомненно, положительно отразится на надежности, КПД и технико-экономических показателях станции. Однако, возможно ли осуществить работу такого генератора напрямую с сетью (без использования инвертора) – сложный вопрос, на который невозможно дать точный ответ, не проводя исследований, экспериментов. Наиболее очевидным путем для нахождения ответа на данный вопрос является проведение моделирование работы такого генератора параллельно с сетью с помощью современного программного обеспечения (Matlab, PSCAD и т.д.).

Литература:

1. Mehmet Melikoglu. Current status and future of ocean energy sources: A global review. Ocean Engineering. 2016
2. Шевченко А. Ф. Многополюсные синхронные машины с дробными q меньше 1 зубцовыми обмотками с возбуждением от постоянных магнитов [Текст] / А. Ф. Шевченко // Электротехника. - 2007. – №9. С. 3-9.
3. Ю.Г. Бухгольц, А.В. Комаров, А.Ф. Шевченко, Л.Г. Шевченко Многополюсные синхронные машины с дробными однозубцовыми обмотками часть 2; Новосибирский государственный технический университет. – Новосибирск, 1996
4. Ю.Г. Бухгольц, А.В. Комаров, А.Ф. Шевченко, Л.Г. Шевченко Многополюсные синхронные машины с дробными однозубцовыми обмотками часть 2; Новосибирский государственный технический университет. – Новосибирск, 1996

ТОРМОЗНЫЕ МОМЕНТЫ ДВИГАТЕЛЯ С ЛЕНТОЧНОЙ НАМОТКОЙ

А.А. Трубачев

Национальный исследовательский Томский политехнический
университет, г. Томск, aat64@tpu.ru

Научный руководитель: Долгих А.Г., к.т.н., м.н.с.

Настоящая работа содержит результаты численных исследований тормозных моментов, полученных для двигателя с ленточной намоткой статора.

This work contains the results of numerical studies of the braking torques obtained for a tape winding stator motor.

Важной характеристикой, определяющей работу электродвигателя, является механическая характеристика, связывающая развиваемый на валу момент и частоту вращения ротора. Существенное влияние на вид механической характеристики оказывают моменты, снижающие момент на валу по мере увеличения частоты вращения. Физическая природа таких моментов может быть разнообразной [1]. Особый интерес вызывают моменты электрического происхождения. В первую очередь отметим момент от действия противоЭДС, наводимой в обмотке якоря. Несмотря на то, что такой момент тормозящим не называют, в данной работе он рассматривается таковым по причине его действия на развиваемый момент. Суть эффекта уменьшения момента заключается в том, что в сосредоточенных проводниках якорной обмотки наводится противоЭДС, направленная встречно приложенному напряжению питания; при этом уменьшается ток в цепи якоря и, как следствие, уменьшается развиваемый момент. Настоящая работа содержит результаты, полученные в рамках исследования двигателя с ленточной намоткой статора [2]. Эффект действия ЭДС вращения в данном случае проявляется в несколько ином виде, т.к. рассматриваются не сосредоточенные проводники традиционной обмотки, а пластины, по которым протекают распределенные токи. Уменьшение развиваемого момента происходит не за счет уменьшения напряжения питания, а за счет взаимодействия в теле намотки распределенных токов от источника питания и ЭДС вращения. Кроме того, в теле ленточной намотки (массивном медном стакане) возникают вихревые токи, создающие демпфирующие моменты. Отметим, что часть результатов, относящихся к оценке моментов от действия ЭДС вращения и действия вихревых токов, полученных авторами, носят оригинальный характер. Результаты исследований предпо-

лагается использовать при разработке методики расчета и проектирования двигателя с ленточной намоткой статора.

На первом этапе исследований был проведен расчет коэффициента демпфирования от действия вихревых токов, используя различные методики, подробно описанные в [3, 4]. Для выполнения расчета модель исследуемого двигателя с ленточной намоткой была упрощена и представлена в виде системы с одной парой полюсов (рис.1). Постоянный магнит с внешним магнитопроводом образует магнитную систему ротора. В воздушном зазоре магнитной цепи расположена ленточная намотка, представленная в виде медного стаканчика. Характер распределения индукции в пределах полюсного деления представлен также на рисунке 1 справа.

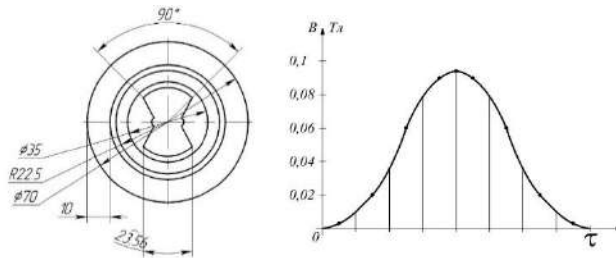


Рис. 1 – Модель исследуемого двигателя с ленточной намоткой

Расчет коэффициента демпфирования от действия вихревых токов проводился по формулам (1, 2) [3, 4]

$$K_{o1} = \frac{4B^2 h^3 R^2 p \delta}{\tau_1 (1 + \frac{h^2}{\tau_1^2}) \rho} \ln \frac{\tau_1}{l} \quad [\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}], \quad (1)$$

$$K_{o2} = \frac{B^2 h^2 D^2 \delta p}{\rho \pi} \ln \left[1 + \frac{\pi b}{2(a+h)} \right] \quad [\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}], \quad (2)$$

где h – активная длина стаканчика (осевая длина магнитной системы); B – магнитная индукция в зазоре; R – радиус стаканчика; D – диаметр стаканчика в м; p – число пар полюсов ротора; δ – толщина стаканчика; τ_1 – полюсное деление; ρ – удельное электрическое сопротивление материала стаканчика; l – расстояние между краями двух смежных полюсов; a – расстояние между полюсами.

Все необходимые для расчета величины представлены в таблице 1.

Таблица 1

h , м	B , Тл	R , м	p	δ , м	τ_1 , м	ρ , Ом·м ² /м	l , м	b , м	a , м
0,05	0,094	0,023	1	0,005	0,031	$1,68 \cdot 10^{-8}$	0,024	0,0234	0,024

Расчет показал, что величина коэффициента демпфирования в обоих случаях одинакова $K_{\delta 1} = K_{\delta 2} = 1,727 \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}$.

Тормозной момент, вызванный наведением ЭДС вращения в элементах катушки (стаканчика) можно определить, используя методику [2]. Момент, создаваемый двигателем с ленточной катушкой, определяется следующим образом

$$M = p \cdot N \cdot \Delta^2 \left(N + \frac{2r_0}{\Delta} \right) \cdot \sum_{i=1}^n B_i \cdot D_i .$$

В данном случае p – число пар полюсов магнитной системы двигателя, N – число витков катушки, Δ – толщина проводящей ленты, r_0 – радиус первого витка катушки (радиус гильзы), B_i – среднее значение индукции на i -ом элементе катушки; D_i – интеграл поперечных компонент токов, наведенных в элементе тела катушки. Преобразуем приведенное выражение

$$M = p \cdot N \cdot \Delta^2 \left(N + \frac{2r_0}{\Delta} \right) \cdot \sum_{i=1}^n B_i \cdot D_i = p \left(N^2 \cdot \Delta^2 + \frac{2r_0 \cdot N \cdot \Delta^2}{\Delta} \right) ,$$

Учтем, что $\Delta \cdot N = \delta$ – активная толщина катушки (стаканчика). В итоге

$$M = p \cdot \delta \left(\delta + 2r_0 \right) \sum_{i=1}^n B_i \cdot D_i . \quad (3)$$

Учитывая геометрию рассматриваемого устройства, где $p=1$, $\delta=0,005$ м; $r_0=(0,035/2)$ м, получим

$$M = 0,005(0,005 + 0,035) \sum_{i=1}^n B_i \cdot D_i = 2 \cdot 10^{-4} \sum_{i=1}^n B_i \cdot D_i .$$

Развертку катушки в пределах полюсного деления делим на 8 равных элементов. Средние значения индукции приведены в таблице 3, где также приведены величины, необходимые для дальнейших расчетов.

Таблица 2

i	1	2	3	4	5	6	7	8
B_i , Тл	$6 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-2}$	$9 \cdot 10^{-2}$	$9 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-3}$
e_i , 10^{-5} В	1,2	4	12	18	18	12	4	12
D_i , А	5,66	18,84	56,32	84,46	84,46	56,32	18,84	5,66
$B_i \cdot D_i$,	0,034	0,376	3,378	7,6	7,6	3,378	0,376	0,034

Разность потенциалов, которая наводится на краях элемента, определяется как

$$e_i = B_i \cdot h \cdot r_{cp} \cdot \omega,$$

где $h=0,05$ м – длина стаканчика; $r_{cp}=0,04$ м; ω – частота вращения ротора, 1/с.

В таблице приведены значения e_i , которые рассчитаны для частоты вращения ротора $\omega=1$ 1/с.

Значения разности потенциалов прикладываются следующим образом: на нижнем крае элемента выставляется значение равное нулю, на верхнем – рассчитанная величина e_i . Затем проводится решение задачи с помощью COMSOL и определяются значения интегралов D_i . В нижней строке таблицы приведены значения произведений $B_i \cdot D_i$, сумма которых равна $\Sigma B_i \cdot D_i = 20,78$ Тл·А. Следовательно, тормозящий момент, вызываемый наведением ЭДС вращения при $\omega=1$ 1/с, равен

$$M = 2 \cdot 10^{-4} \cdot 20,78 = 4,156 \cdot 10^{-3} \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

При других частотах вращения разность наводимых потенциалов пропорциональна величине ω , при этом пропорционально изменяется и величина интеграла D_i . В итоге можно указать что

$$M = 4,156 \cdot 10^{-3} \cdot \omega, \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Коэффициент демпфирования для рассмотренного устройства $k_d = 4,156 \cdot 10^{-3}$ Н·м·с.

В настоящее время проводятся численные исследования влияния вихревых токов в ленточной намотке на механическую характеристику двигателя при вращении ротора магнита с помощью программного продукта конечноэлементного моделирования COMSOL Multiphysics, интерфейса Rotating Machinery, Magnetic модуля AC/DC.

Проведенные численные исследования показали, что результаты расчета коэффициента демпфирования по формулам, представленным в

[2, 3] и с помощью COMSOL имеют один порядок. Вероятнее всего близким к реальности является результат, полученный с помощью COMSOL, так как в данном случае используются данные о распределении индукции вдоль воздушного зазора.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 20-79-00055).

Литература:

1. Сергеев П.С., Виноградов Н.В., Горяинов Ф.А. Проектирование электрических машин – М: Энергия, 1969. – 632 с.
2. Долгих А.Г., Мартемьянов В.М. Механическая характеристика моментного двигателя с ленточной намоткой статора // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2021. – №1 (64). – С. 37-42.
3. Бабаева Н.Ф. Расчет и проектирование элементов гироскопических устройств. – М: Машиностроение, 1967. – 480 с.
4. Браславский Д.А., Логунов С.С., Пельпор Д.С. Авиационные приборы. – М: Машиностроение, 1964. – 740 с.

МЕХАНИЧЕСКИЙ ЗАТВОР ДЛЯ ЛАЗЕРНЫХ УСТАНОВОК

**А.С. Мырзахметов, С.С. Мырзахметов, В.Г. Дю
Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники
г. Томск, ayanmyr@yandex.kz**

Теоретические и экспериментальные исследования кристаллов в настоящее время является актуальным научным направлением. Одна из важнейших задач при экспериментальных исследованиях – формирование импульсов светового излучения определенной длительности, для изучения релаксационных процессов. Решение этой задачи требует создания затворов, обеспечивающих необходимую выдержку. В этой работе мы описываем проблемы и реализацию механического затвора. Был сконструирован макет такого затвора на основе платы Arduino UNO и сервопривода. У затвора есть параметры, настроив которые можно получить желаемую выдержку, которая задается программным кодом. Апробация и экспериментальное исследование подтверждает адекватность выбранных методов и подходов.

Theoretical and experimental studies of crystals are currently a topical scientific trend. One of the most important tasks in experimental studies is to

form pulses of light radiation of a certain duration in order to study relaxation processes. The solution of this problem requires the creation of shutters that provide the necessary shutter speed. In this work, we describe the problems and implementation of a mechanical shutter. A mock-up of such a shutter was constructed based on an Arduino UNO board and a servo drive. The shutter has parameters, by adjusting which you can get the desired shutter speed, which is set by the software code. Testing and experimental research confirms the adequacy of the chosen methods and approaches.

В настоящее время приборы оптики, такие как, лазеры, светодиоды, фотодиоды и другие, используются в различных областях науки, техники и народного хозяйства. Это достигается благодаря фундаментальным исследованиям в области фотоники и материаловедении. Перед исследовательскими группами стоит задача изучить сложные оптические эффекты и процессы, кристаллографические понятия. Для этого проводится множество экспериментов, что в свою очередь может требовать создания уникальных механизмов.

Наша проектная группа работает с кристаллом $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}:\text{Fe}+\text{Cu}$, импульсным лазером с длиной волны 1053 нм и лазерным модулем с длиной волны 650 нм [1]. При помощи процесса генерации второй гармоники [2], длина волны, излучаемая импульсным лазером, сокращается до 526,5 нм. Пучки лазеров перекрещиваются внутри кристалла и попадают на фотодиоды, откуда сигнал идет на осциллограф. В данном эксперименте потребовался затвор для излучения импульсного лазера, с выдержкой порядка 100 мс. Это нужно для возникновения фотоиндуцированного поглощения в кристалле [3].

В качестве затвора использовался механизм из фотоаппарата ФЭД-3, но из-за сложности в настройке было решено собрать собственный механизм, который был бы удобен в настройке, и выполнял действия автоматически.

Окончательная конструкция разрабатываемого затвора получилась следующей: к плате Arduino UNO, для которой был написан и загружен программный код, подключен сервопривод. При подаче питания вал сервопривода с разметочной лентой поворачивается на определенный угол и время, которое указано в программе, а затем возвращается обратно на исходное положение (рис.1). Механизм повторяет это действие пока подключен к сети питания.

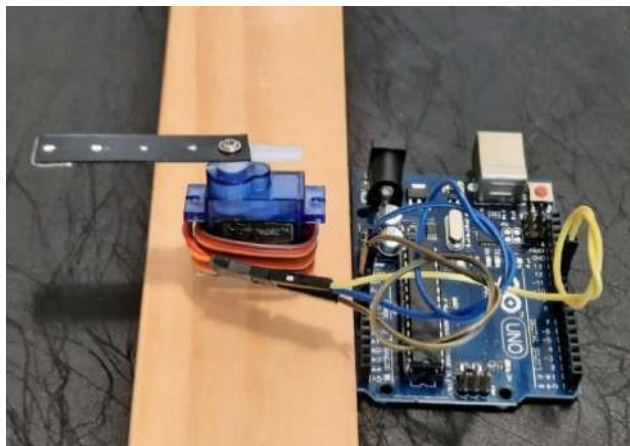


Рис. 1 – Фотография затвора

Затвор имеет следующие характеристики:

- L – расстояние от оси вращения;
- r – половина ширины полосы;
- $\Delta\varphi$ – угол между первым и вторым положением вала;
- t_{on} – время в течение которого вал находится в положении 1 (пропускает излучение);
- t_{off} – время в течение которого вал находится в положении 2 (препятствует излучению);
- ω – скорость вращения сервопривода.

Полная выдержка затвора может быть описана как:

$$T' = t_{on} + (t_{\Delta\varphi} - 2t_r) \quad (1)$$

где $t_{\Delta\varphi}$ – время, за которое точка, расположенная на расстоянии L от оси вращения преодолевает путь длиной S_φ со скоростью ω ; t_r – время, за которое точка, расположенная на расстоянии L от оси вращения преодолевает путь длиной S_r со скоростью ω ; S_φ – путь который проделывает точка на расстоянии L от оси вращения на $\Delta\varphi$ угол; S_r – путь который проделывает точка на расстоянии L от оси вращения на угол

$$\Delta\varphi_r = \frac{r}{L}.$$

Преобразовав (1), можно получить формулу для выдержки затвора:

$$T' = t_{on} + \left(\frac{2\Delta\varphi}{\omega} - \frac{4r}{L\omega} \right) \quad (2)$$

Корректность выражения (2) была подтверждена в ходе выполнения эксперимента. Схема установки представлена на рис. 2, где: 1 – лазер; 2 – затвор; 3 – фотодиод; 4 – осциллограф.

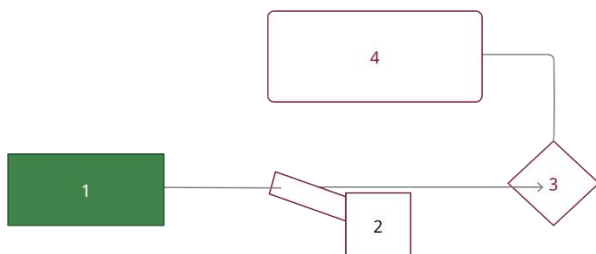


Рис. 2 – Схема экспериментальной установки

Экспериментальная установка обладала следующими параметрами $L = 4$ см; $r = 0,5$ см; $\Delta\varphi = 30^\circ = 0,52$ рад; $t_{on} = 150$ мс; $t_{off} = 2000$ мс; $\omega = 8,75$ рад/с, в соответствии с выражением (2) $T' \approx 150,06$ мс. Это согласуется с результатами эксперимента (рис.3).



Рис. 3 – Результаты измерений длительности импульса

Подобная конструкция затвора позволяет эффективно выставлять нужное время выдержки, и не требует сложной настройки. В ходе эксперимента удавалось получить выдержку до 25 мс. Подобный затвор, благодаря своей простоте, может использоваться вместе со светочувствительными пленками.

Стоит отметить, что корректность эксперимента зависит от качества установки затвора: необходимо обеспечить перпендикулярность разметочной ленты пучку лазера, а сам пучок должен быть строго направлен на метку, изображенную на ленте.

Был разработан эффективный механический затвор на основе платформы Arduino UNO для лазерных установок. Данный затвор легок в настройке с помощью программного обеспечения, в отличие от классических механизмов, которые требуется вручную заряжать и выставлять выдержку и позволят получать выдержку от 25 мс. Разработанный затвор может быть использован для изучения релаксационных процессы в различных кристаллах, например, оценивать на сколько меняется коэффициент пропускания до и после кратковременного излучения [4]. Предсказывается что использование затвора помогут доказать возможность увеличения быстродействия устройств динамической голографии на основе кристаллов ВТО, облученных светом из зеленой области спектра [1].

Литература: .

1. Колегов А. А. и др. Адаптивная интерферометрия, использующая динамические отражательные голограммы в кубических фоторефрактивных кристаллах //Квантовая электроника. – 2011. – Т. 41. – №. 9. – С. 847-852.
2. Бурсиан Э. В. Сегнетоэлектрики в нелинейной оптике //Соросовский образовательный журнал. – 2001. – №. 8. – С. 98-102.
3. Акрестина А. С. и др. Фото-и термоиндуцированные явления в кристаллах класса силленитов. – 2014.
4. Войцеховский А. В. и др. Оптика полупроводников: учебное пособие. – 1987.

**Секция ЭЛЕКТРОПРИВОД И АВТОМАТИКА ПРОМЫШЛЕННЫХ
УСТАНОВОК И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ**

**РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАБОЧЕГО МЕСТА
ОПЕРАТОРА АЛЮМИНЕВОГО ПРОКАТНОГО СТАНА**

С.А. Бурманов

**Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, burmanov99@bk.ru**

Научный руководитель: Котин Д.А., к.т.н., доцент

В настоящее время на металлургических предприятиях основными задачами, решение которых способствует повышению прибыльности и конкурентоспособности этих предприятий, являются следующие: повышение качества продукции; рациональное использование металла; экономия потребляемых ресурсов, энергосбережение и экологичность производства. Пути решения таких задач являются комплексная автоматизация теплотехнических процессов, а также создание и внедрение автоматизированных систем управления (АСУ) производствами металлургического предприятия и АСУ предприятием в целом. В работе рассматривается вариант разработки автоматизированного рабочего места (АРМ) оператора алюминиевого прокатного стана.

At present, at metallurgical enterprises, the main tasks, the solution of which contributes to increasing the profitability and competitiveness of these enterprises, are the following: improving the quality of products; rational use of metal; saving consumed resources, energy saving and environmental friendliness of production. The ways of solving such problems are the integrated automation of heat engineering processes, as well as the creation and implementation of automated control systems (ACS) for the production of a metallurgical enterprise and the ACS for the enterprise as a whole. The paper considers a variant of the development of an automated workstation (AWP) for an operator of an aluminum rolling mill.

Информационно-измерительные и управляющие системы, их компонентная база и применяемые информационные технологии по сбору и обработке производственной информации и принятию технико-экономических решений должны осуществлять достоверный контроль за параметрами технологического оборудования и качеством продукции, а также управление ними, на различных этапах производства, осуществлять диагностику режимов функционирования и технического

состояния оборудования, производить эффективное ситуационное управление техпроцессами и отдельными агрегатами, осуществлять поддержку стратегического планирования и выработку адекватных управляющих воздействий на различных иерархических уровнях систем автоматизации управления техпроцессами (САУ ТП) и АСУ, контроль рассогласования в линиях обратных связей и корректировку (адаптацию) используемых моделей и алгоритмов [1].

Отсюда можно выделить общие принципы отображения информации на экране рабочей станции оператора:

- статических изображений, представляющих, например, мнемосхемы технологического процесса;
- числовых значений параметров, например, уровни, расходы, давления технологического процесса;
- столбчатых изображений аналоговых параметров, например, уровни жидкостей в резервуарах. При этом величина столбика соответствует реальному значению параметра;
- цветовой окраски оборудования, в зависимости от его режима работы и состояния;
- графиков изменения параметров во времени;
- таблиц хозрасчетных параметров;
- текстовых сообщений о событиях в системе или состоянии технологического оборудования.

Все эти способы представления информации, как правило, комбинируются.

В системе принята следующая цветовая гамма:

- Черный цвет – используется для отображения неисправных датчиков или механизмов;
- Серый цвет - используется для отображения параметров, значение которых в данный момент не используется или не достоверно, либо для отображения остановленных насосов, закрытых отсечных клапанов;
- Зеленый цвет - нормальное значение параметра; формирование разрешающей команды; технологический агрегат исправен и включен, отсечной клапан открыт;
- Желтый цвет - используется для предупредительной сигнализации значений параметров, вывода предупреждающих сообщений; технологический агрегат (насос, клапан) заблокирован;
- Красный цвет - используется для аварийной сигнализации значений параметров и вывода сообщений о неисправностях или авариях в системе.

Дополнительно с предупредительной и аварийной цветовой сигнализацией может использоваться признак мигания. Одновременно с аварийной цветовой сигнализацией формируются звуковые сигналы [3].

Рабочее место оператора включает в себя операторскую станцию (Рисунок 1) и состоит из: монитора, системного блока и устройств для управления программой - клавиатуры и манипулятора «мышь». Верхний уровень должен состоять из компьютера АРМа сменного мастера, который обеспечивает оперативное отображение технологических параметров, их хранение в архиве для последующего анализа, а также ввод значений технологических уставок. Верхний и нижний уровни должны быть объединены между собой технологической сетью [2].

Верхний уровень системы должен обеспечивать возможность подключения проектируемой системы управления прокатным станом к существующей технологической сети.



Рис.1 – операторская станция

Загрузка программного обеспечения происходит в следующей последовательности:

1. Автоматически загружается операционная система. По окончании загрузки автоматически происходит регистрация в Windows. Если автоматическая регистрация не произошла, необходимо зарегистрироваться в системе, ввести имя и пароль;

2. Далее автоматически загружается оболочка проекта в случае, если проект автоматически не загрузился, необходимо обратиться к специалисту службы АСУ ТП или открыть WinCCExplorer самостоятельно, выполнив команду ПУСК/ SIMATIC/ WinCC/ WinCCExplorer. Если после открытия проекта не произошло автоматического запуска необходимо в WinCCExplorer выполнить команду File/ Activate.

3. По окончании загрузки на дисплее отображается экран системы по умолчанию. Далее производится опрос состояния технологического оборудования, и формируются соответствующие сообщения. После того, как начинают функционировать кнопки переключения экранов, система готова к работе.

В заключение хотелось бы отметить, что такой вид компоновки системы позволяет обеспечивать решение всех функциональных задач с требуемой точностью. Разработанная система максимально использует типовые алгоритмы, входящие в состав математического обеспечения вычислительного комплекса (сбор и обработка сигналов, вычисление функций и т. д.).

Литература:

1. Александров А. Г., Паленов М. В. Состояние и перспективы развития адаптивных ПИД-регуляторов в технических системах // Автоматика и телемеханика. – 2014. – №. 2. – С. 16-30.

2. Балюта С. Н., Балюта С. М., Valuta S. N. Идентификация механических параметров главного привода прокатной клетки широкополосного стана горячей прокатки с использованием генетических алгоритмов // Промелектро. – 2019. – №. 4. – С. 37-44.

3. Блинцов В.С., Блинцов С.В., Волянская Я.Б., Волянский С.М., Костенко Д.В. Стенд для экспериментальных исследований эффективности нейронетких регуляторов электроприводов постоянного тока // Электроприводы переменного тока: Труды международной четырнадцатой научно-технической конференции. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2007. – 295-298 с.

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЯГОВЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ АВТОНОМНОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

В.Н. Бутенко

Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, butenko8679@yandex.ru

Научный руководитель: Сидоров А.А., д.т.н., профессор

В настоящее время все больше стоит вопрос об экологических проблемах и замены привычных нам двигателей внутреннего сгорания. Уже никого не удивить гибридными транспортными средствами. Но полное электрифицирование автомобиля находится на начальной стадии, ввиду отсутствия всей инфраструктуры для обеспечения заряда батарей.

Currently, there is an increasing question of environmental problems and the replacement of the usual internal combustion engines. No one will be surprised by hybrid vehicles. But the complete electrification of the car is at an early stage, due to the lack of all the infrastructure to ensure battery charge.

В процессе рулевого управления транспортного средства, согласно модели рулевого управления Аккермана, доступное движение транспортного средства показано на рисунке 1 – угол поворота рулевого колеса с внутренней и внешней передней стороны, соответственно – угол поворота автомобиля. L и W – колесная база и ширина колеи автомобиля соответственно R – радиус поворота транспортного средства.

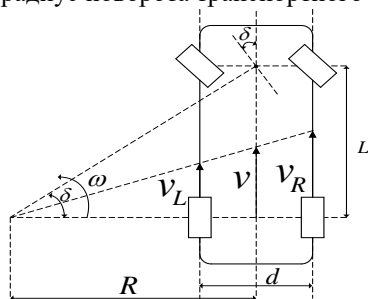


Рис.1 – геометрия поворота автомобиля, где δ – угол поворота; L – колесная база автомобиля; d – колея автомобиля; R – радиус поворота; V_L и V_R – линейные скорости левого и правого колес соответственно; V – линейная скорость автомобиля; ω – угловая скорость автомобиля при повороте.

Сигналы задания на скорость правого и левого двигателей формируются в зависимости от величины сигнала угла поворота δ и сигнала задания $\omega_{зад}$ на общую скорость движения. По данным сигналов текущих скоростей $\omega_{л}$ и $\omega_{п}$ вычисляется величина средней скорости ω_V , далее вычисляется величина $\Delta\omega$, на которую должны отличаться скорости правого и левого двигателей при повороте, далее сигнал задания $\omega_{зад}$ изменяется на величину $\Delta\omega$ с соответствующими коэффициентами, которые равны $K_1=-0.5$, $K_2=0.5$ (рисунок 2). Зависимость $\Delta\omega=f(\delta, \omega_V)$ будет получена из анализа геометрии поворота транспортного средства

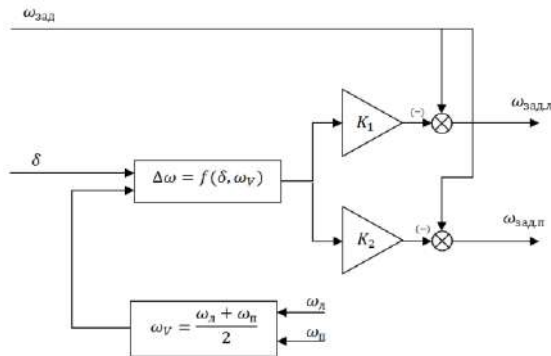


Рис.2 – структурная схема электронного дифференциала

Получив необходимые зависимости, происходит переход к моделированию. Структурная схема электронного дифференциала на рисунке 3:

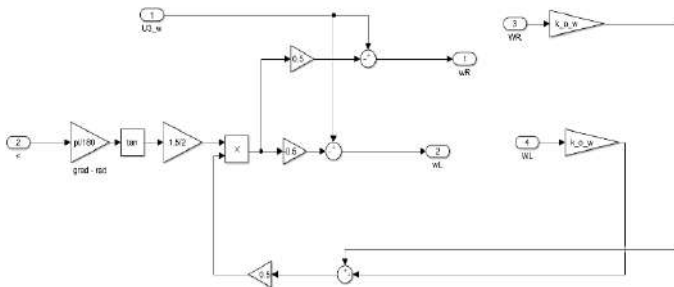


Рис.3 – структурная схема блока Electric differential в программе MATLAB

Было выполнено моделирование системы управления в MATLAB Simulink. Результаты моделирования показали, что при выбранных настройках регуляторов достигаются хорошие показатели качества переходного процесса по скорости при повороте, а именно: малая величина перерегулирования, благодаря чему сохраняется управляемость транспортного средства, а также малое время регулирования, что говорит о том, что система быстро реагирует на изменение угла поворота руля. Результаты можно увидеть ниже на рисунке 4.

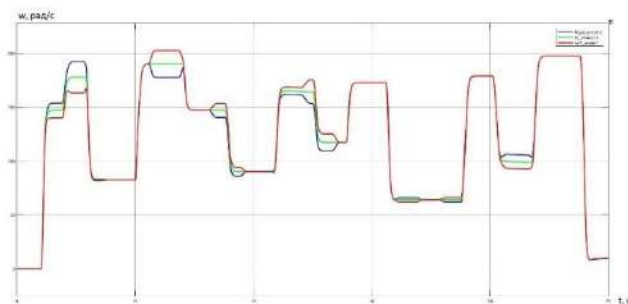


Рис. 4 – Результаты моделирования системы управления

Для синтеза полученной системы ЭП одного колеса был выбран классический метод системы подчиненного регулирования. Далее были синтезированы регуляторы тока и скорости, с различной настройкой, подходящей под конкретные индивидуальные задачи. СПР обеспечивает требуемые как статические, так и динамические показатели. Для второго приводного двигателя производится аналогично первому. Результаты моделирования показали, что при настройке система имеет малое время регулирования, что говорит о том, что система быстро реагирует на изменение угла поворота руля, а также обладает как статической, так и динамической точностью, что дает возможность полностью контролировать болид на трассе.

Литература:

1. Ключев В.М. Теория электропривода: учебник для вузов. Изд. первое. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 560 с. (Изд. второе – 1998; Изд. третье – 2001).
2. Панкратов В.В. Автоматическое управление электроприводами: учеб. пособие/ В.В. Панкратов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. – Часть I. Регулирование координат постоянного тока. – 200 с.с.

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ БЕЗДАТЧИКОВЫМ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

А.И. Васильева

Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, masterpiece.show@gmail.com
Научный руководитель: Кучер Е.С., к.т.н, доцент

На сегодняшний день асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором (АД КЗР) имеют широкое применение. Однако идентификация параметров данных машин довольно часто является затруднительной. Более того, включение в конструкцию различных датчиков может быть слишком трудоемко или нежелательно. При этом для реализации системы автоматического управления двигателем, необходима информация о состоянии скорости вращения ротора АД КЗР и электромагнитном моменте. В связи с этим появляется необходимость использовать специальные вычислительные алгоритмы и реализующие их устройства, имеющие обобщенное название «наблюдатели».

Today, asynchronous electric motors with a short-circuited rotor (EM SCR) are widely used. However, the identification of the parameters of these machines is quite often difficult. Moreover, the inclusion of various sensors in the design may be too time consuming or undesirable. At the same time, for the implementation of automatic control of the system, information is required on the state of the rotor speed of the EM SCR rotor and the electromagnetic moment. In this regard, it becomes necessary to use special computational algorithms and devices that implement them, which have a generalized name "observers".

Путем математических преобразований систем уравнений, описывающих электромагнитные процессы в электродвигателе, было получено математическое описание и структурная схема АД в неподвижной системе координат (α, β) , изображенные на рис. 1 и рис. 2.

$$\begin{cases} L_{sc} \cdot \dot{I}_s = -R_s \cdot I_s - \frac{L_m}{L_r} \cdot \dot{\psi}_r + U_s \\ \dot{\psi}_r = \frac{L_m \cdot R_r}{L_r} \cdot I_s + \omega_r \cdot D \cdot \psi_r - \frac{R_r}{L_r} \cdot \psi_r \end{cases}$$
$$M_e = p_n \cdot \frac{L_m}{L_r} \cdot I_s^T \cdot D \cdot \psi_r,$$
$$J \dot{\omega} = M_e - M_c$$

Рис. 1 – Математическое описание АД
в неподвижной системе координат (α, β)

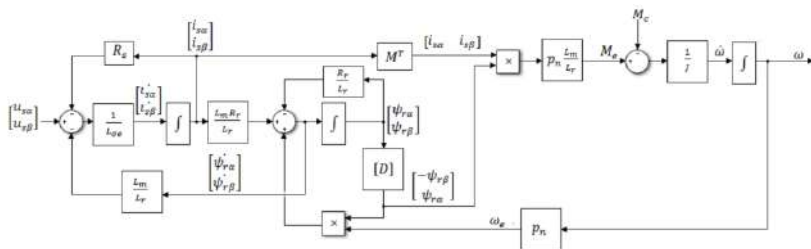


Рис. 2 – структурная схема модели АД в неподвижной системе координат (α, β)

Затем, в цифровом пакете MATLAB Simulink было произведено моделирование АД в неподвижной системе координат (α, β) .

На рисунке 3 и рисунке 4 приведены графики переходных процессов $\omega(t)$ и $M_e(t)$. В момент времени $t = 0$ с электродвигатель запускается в режиме холостого хода. В момент времени $t = 1$ с к валу разогнавшегося электродвигателя прикладывается номинальный момент нагрузки $M_c = M_n$, в момент времени $t = 1.6$ с момент снимается.

ω , рад/с



Рис. 3 – График переходных процессов скорости вращения вала $\omega(t)$ АД



Рис. 4 – график переходных процессов электромагнитного момента $M_e(t)$ АД

По представленным результатам выполненного цифрового моделирования были сделаны следующие выводы:

1. Графики переходных процессов скорости вращения вала и электромагнитного момента АД имеют типовую форму для АД с КРЗ. Установившиеся значения момента и скорости вращения вала в номинальном режиме и в режиме холостого хода соответствуют значениям, рассчитанным выше. Из этого следует, что параметрический и структурный синтез модели АД в осях (α, β) выполнен корректно.

2. Во время пуска двигателя наблюдаются броски по электромагнитному моменту, а значит и по току статора, а также высокая колебательность переходных процессов по скорости вращения вала и электромагнитного момента. После приложения номинального момента нагрузки скорость вращения вала АД снижается и не соответствует номинальной рассчитанной выше скорости.

3. В целях повышения качества и точности регулирования АД для его эффективного использования в технологическом процессе, необходимо синтезировать систему управления электроприводом, которая будет обеспечивать необходимое для заданных технических требований качество переходных процессов.

На рисунках 5 и 6 представлены графики переходных процессов $\omega(t)$ и $M_e(t)$. В момент времени $t = 0$ с электродвигатель запускается в режиме предварительного намагничивания. В момент времени $t = 0,5$ с двигатель запускается в режиме холостого хода. В момент времени $t = 0,8$ с к валу разогнавшегося электродвигателя прикладывается номинальный момент нагрузки $M_c = M_n$.

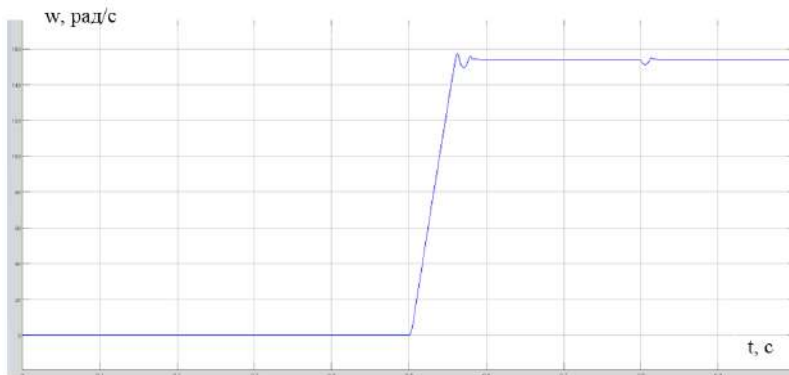


Рис. 5 – график переходных процессов скорости вращения вала $\omega(t)$ САУ АД в СПР



Рис. 6 – график переходных процессов электромагнитного момента $M_e(t)$ САУ АД в СПР

По результатам проведенного цифрового моделирования можно сделать следующие выводы:

При пуске электродвигателя отсутствуют броски по электромагнитному моменту благодаря введению этапа намагничивания при пуске. Однако у переходного процесса по электромагнитному моменту сохраняется высокая колебательность при выходе в установившейся режим, а также присутствует высокое перерегулирование. По общему виду переходных процессов и значениям переменных скорости и электромагнитного момента в установившихся режимах, полученных при синтезе системы по паспортным данным, можно сделать вывод, что параметрический и структурный синтез САУ АД методом СПР выполнен корректно.

Также было проведено моделирование с параметрическими и сигнальными возмущениями. Результаты моделирования показали, что введение возмущений негативно влияет на переходный процесс по скорости при переходе из режима ХХ в номинальный режим, а именно: при введении сигнальных возмущений и комбинированно сигнальных и параметрических электродвигатель не выходит в установившийся режим работы, так как скорость начинает стремиться к нулю. Введение параметрических возмущений никак не повлияло на качество переходного процесса. Синтез системы векторного управления АД методом СПР, позволяет получить переходные процессы по скорости вращения ротора и по потокоцеплению ротора, соответствующие

стандартным настройкам, однако при введении возмущений показатели качества регулирования АД ухудшаются.

По причине того, что АД является нестационарным объектом управления, в случае предъявления к приводу повышенных требований качества регулирования, существует необходимость систему векторного управления АД, которая будет являться малочувствительной к параметрическим и сигнальным возмущениям, которая и которая будет настраивать параметры системы векторного управления двигателем под вносимые параметрические возмущения.

Задачи для следующего этапа исследования:

- синтезировать наблюдатель скорости вращения ротора и вектора потокосцепления ротора АД по принципу адаптивной системы с эталонной моделью (АСЭМ);
- На основе АСЭМ синтезировать систему управления, компенсирующую сигнальное возмущение.
- сравнить свойства синтезированных систем векторного управления бездатчикового АД.

Литература:

1. Панкратов В.В. Специальные разделы современной теории автоматического управления: учеб. пособие /В.В. Панкратов, Е.А. Зима, О.В. Нос. — Новосибирск: НГТУ, 2007. — 220с.
2. Калачев Ю. Н. Наблюдатели состояния в векторном электроприводе / Ю.Н. Калачев – Москва: 2015. – 80 с.
3. Кравчик. А. Э. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник/ А. Э. Кравчик, М. М. Шлаф, В.И. Афонин, Е.А. Соболенская. – М.: Энергоиздат, 1982 – 504 с.
4. Кучер Е.С., Котин Д.А. Адаптивные алгоритмы бездатчикового управления асинхронными электроприводами: учеб. пособие / Е.С. Кучер, Д.А. Котин. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. – 152 с.
5. Аристов А.В., Бурулько Л.К., Паюк Л.А. Математическое моделирование в электромеханике: учеб. пособие / А.В. Аристов, Л. К. Бурулько, Л.А. Паюк. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – 155с.
6. Панкратов В.В., Котин Д.А. Адаптивные алгоритмы бездатчикового управления асинхронными электроприводами подъемно-транспортных механизмов: учеб. пособие / В.В. Панкратов, Д.А. Котин. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. – 143 с.
7. Панкратов, В.В. Автоматическое управление электроприводами. Часть I. Регулирование координат электроприводов постоянного тока: учеб. пособие /В.В. Панкратов. — Новосибирск: НГТУ, 2013. — 215с.

РАЗРАБОТКА БЛОКА УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА БАЗЕ МИКРОСХЕМЫ ТИПА SOC

Е.И. Горлов, С.Ю. Фарафонов
Сибирский государственный университет
телекоммуникаций и информатики,
г. Новосибирск, e.grlv@mail.ru

Научный руководитель: Фарафонов С.Ю., старший преподаватель

В данной статье рассматривается вопрос разработки образца универсального блока управления оборудованием на базе микросхемы типа «Система на кристалле» с использованием внешнего ОЗУ DDR3.

In this article, the question of developing a sample of a universal equipment control unit based on a chip of the "System on a Chip" type with external DDR3 RAM.

В современном технологическом оборудовании для автоматизации процессов повсеместно применяют IBM совместимые компьютеры, которые обладают рядом значительных недостатков при применении их в данных целях.

А именно:

1) Избыточная вычислительная мощность – для большинства задач, применяемых в данных установках (банкоматы, терминалы самообслуживания, стойки информации) производительности IBM оборудования слишком много.

2) Обширные геометрические размеры – материнские платы такой аппаратуры имеют крупные габаритные размеры, что усложняет их интеграцию в используемые установки. А также модульная конструкция увеличивает габаритные параметры.

3) Высокая стоимость данных устройств – недостаток, вытекающий из первого, переплата за неиспользуемую производительность.

Разрабатываемая установка должна устранить вышеперечисленные недостатки. Для этого нужно удовлетворить следующие требования: одноплатная конструкция, использование SOC микросхемы и Linux-совместимой операционной системы.

На текущий момент промышленность выпускает множество микросхем типа SOC. Но проблема заключается в том, что открытой документации на эти микросхемы нет, её можно получить только, заказав крупную партию микросхем у завода-изготовителя, что проблематично

для малых конструкторских бюро. Исключение составляет китайская компания «Aliwinner», на некоторые модели их микросхем документация находится в открытом доступе. Поэтому для разработки блока управления наш выбор пал на данную компанию, а конкретно на их SOC Aliwinner A13.

Aliwinner A13 является функционально законченной SOC и требует лишь, установки внешнего модуля оперативной памяти типа DDR3.

Так как протокол передачи данных DDR3 является высокоскоростным, то при трассировке микросхемы оперативной памяти необходимо контролировать волновое сопротивление микрополосковых линий; оно должно составлять 50 Ом, это является наиболее важным критерием.

Так же был проведен эксперимент в ходе которого была спроектирована печатная плата с контролем длин микрополосковых линий, ведущих к ОЗУ, но без контроля импеданса. В результате эксперимента Aliwinner A13 запустилась и даже определила внешнюю микросхему оперативной памяти, но не смогла корректно с ней взаимодействовать, что привело к полной неработоспособности платы. Из этого был сделан вывод что наиболее важно проконтролировать волновое сопротивление печатной платы, а не длину трасс (при небольшом расстоянии ОЗУ от системы на кристалле).

На заводе-изготовителе печатных плат есть возможность выбора из нескольких «стеков» платы с различной толщиной prepreg и основы, и различной диэлектрической проницаемостью. При проектировании блока управления был сделан выбор в пользу стека JLC2313. Его параметры:

- 1) Диэлектрическая проницаемость – 4.05;
- 2) Толщина prepreg – 0,1 мм;
- 3) Толщина проводника – 0,035 мм.

Используя для расчета волнового сопротивления программу «TXLINE 2003-microstrip» произвели расчет. По результатам расчета ширина необходимой нам трассы составила 0,17 мм. Полученные значения были использованы в разработке и изготовлении тестовой печатной платы (Рис.1).

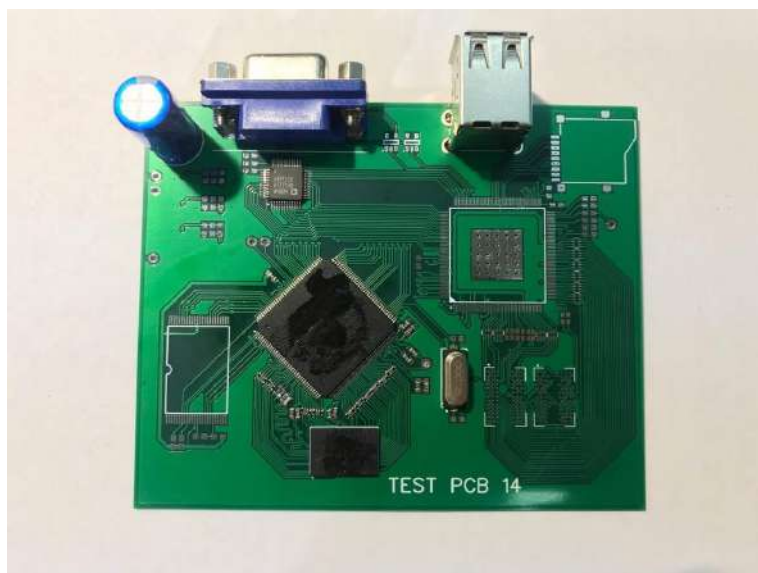


Рис.1 – внешний вид разработанной тестовой платы

В результате работы была сделана макетная плата. Полученный опыт в дальнейшем будет использован для проектирования и изготовления серийного образца, который можно будет применять для решения обширного круга задач в области управлением технологическим оборудованием. В текущий момент проводится эксперимент по использованию 2-ух и более микросхем ОЗУ, необходимых для применения в более требовательных к вычислительным мощностям задач.

Литература:

1. Allwinner technology [Электронный ресурс] – URL: <https://www.allwinnertech.com> (Дата обращения: 13.11.2021).
2. Sunxi [Электронный ресурс] – URL: https://linux-sunxi.org/Main_Page (Дата обращения: 13.11.2021).
3. Белоус А.И., Мерданов М. К., Шведов С.В. СВЧ-электроника в системах радиолокации и связи. Техническая энциклопедия. Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2016. – 688 с

РАЗРАБОТКА УЧЕБНО-НАУЧНОГО СТЕНДА НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

В.А. Горников

**Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, slava98mail.ru@mail.ru**

Научный руководитель: Котин Д.А., к.т.н., доцент

В данной работе предлагается концепция учебно-научного стенда, включающего в себя два типа двигателя переменного тока. Приведена схема предполагаемой лабораторной установки. В соответствии с приведенной схемой выбрано электрооборудование. Спроектирована 3D модель стенда. Рассмотрены направления дальнейших исследований

This paper proposes the concept of an educational and scientific stand, which includes two types of AC motor. The circuit of the proposed laboratory setup is shown. In accordance with the given circuit, electrical equipment was selected. 3D model of the stand was designed. Directions for future research were considered.

В настоящее время материально-техническая база учебных заведений оснащена в основном не самым современным учебно-лабораторным оборудованием, обладающим схожими функциональными возможностями. Результатом отсутствия должной материальной базы является неподготовленность студентов к практической деятельности по окончании высшего учебного заведения. Поэтому оснащение лабораторных аудиторий современным лабораторным оборудованием, которое находит применение в производственной практике, является на сегодняшний день актуальной задачей.

Для формирования концепции новой лабораторной установки необходимо произвести анализ текущего технического оснащения лабораторных аудиторий.

В ходе анализа были выявлены следующие проблемные места:

- 1) схожие функциональные возможности оборудования;
- 2) использование однотипных двигателей.

Следствиями из этих проблем являются:

- 1) анализ однотипных экспериментальных данных;
- 2) недостаточные знания о других типах двигателей, об их различиях.

На сегодняшний день асинхронные двигатели (АД) применяются в подавляющем большинстве случаев благодаря своей надежности (отсутствие щеточно-коллекторного узла), простоте конструкции и обслуживания, а также низкой стоимостью и сравнительно малым затратам на эксплуатацию. Такой двигатель является приоритетной

целью для изучения и разработки новейших алгоритмов управления, позволяющих повысить надежность и снизить стоимость всего электропривода (ЭП).

Синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ) обладают абсолютно жесткими механическими характеристиками, небольшой инерцией при значительном моменте, а также лучшими энергетическими и массогабаритными показателями по сравнению с асинхронными двигателями той же мощности. С развитием частотно-регулируемого электропривода (ЧРЭП) удалось улучшить показатели регулирования скорости СДПМ. Также конструкция данных типов двигателей упрощается, а стоимость постепенно снижается. В связи с этим область применения СДПМ постоянно расширяется и в перспективе данные двигатели могут стать заменой АД в некоторых отраслях промышленности [1,2].

Таким образом, сравнение АД и СДПМ является весьма актуальной и перспективной задачей.

Учитывая все вышесказанное, в целях улучшения уровня технического оснащения лабораторных аудиторий предлагается спроектировать учебно-научный стенд, включающий в себя как АД, так и СДПМ. В основе концепции данного стенда лежит сравнительный анализ двух типов двигателей переменного тока. Предлагается осуществить оценку диапазона регулирования скорости, КПД при различных сигналах задания на частоту вращения, а также показателей качества при переходных процессах таких, как время регулирования и перерегулирование. На основе полученных данных студентам предлагается сделать вывод об эффективности применения того или иного типа двигателя для различных механизмов.

Для осуществления поставленной задачи необходимо выполнить следующие действия:

1. Разработать электрическую схему предполагаемого учебно-научного стенда;
2. В соответствии с приведенной схемой подобрать конкретные модели электрооборудования;
3. Основываясь на габаритных чертежах выбранного электрооборудования, спроектировать 3Д модель лабораторной установки (стенда);
4. Создать модели выбранных электродвигателей в среде Matlab Simulink;
5. Анализ результатов и создание технической документации для выполнения лабораторных работ на стенде.

В соответствии с первым пунктом плана была составлена электрическая схема учебно-научного стенда (Рисунок 1).

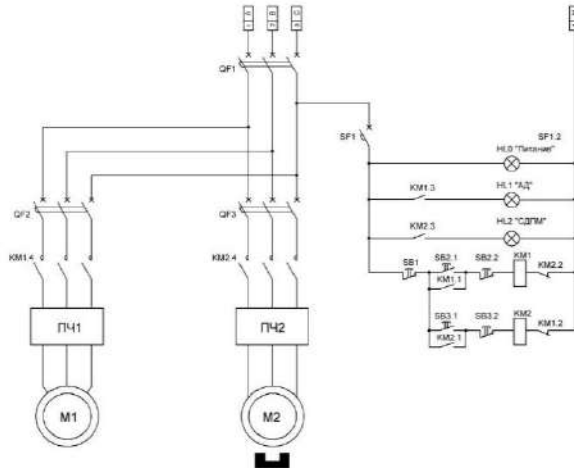


Рис.1 – Схема учебно-научного стенда

Согласно второму пункту плана для каждого элемента схемы было выбрано электрооборудование. Перечень выбранных моделей представлен в таблице 1 [3].

Основываясь на габаритных чертежах, для выполнения третьего пункта была спроектирована 3Д модель учебно-научного стенда (Рисунок 2).



Рис.2 – 3Д модель учебно-научного стенда

Таблица 1 – Электрооборудование для стенда

Обозначение на схеме	Расшифровка	Выбранная модель	Кол-во, шт
M1	Асинхронный двигатель	АИР71А2	1
M2	Синхронный двигатель	СМР50М	1
ПЧ1	Преобразователь частоты для М1	CONTROL-A310 380В 3Ф 0,75кВт 2,3А	1
ПЧ2	Преобразователь частоты для М2	ПЧ CONTROL- Н800 380В 3Ф 0,75-1,5кВт 3,4 А	1
QF1-QF3	Автоматические выключатели для силовой цепи	ВА47-29 3Р 2А 4,5кА D	3
SF1	Автоматический выключатель для цепи управления	ВА47-29 1Р 0,5А 4,5кА С	1
HL0-HL2	Индикаторные лампы	Индикатор LAY5- BU64	3
KM1, KM2	Контакты	КМИ-10911 9А 230В/АС3 1НО	2
SB1	Кнопка	KE-021.2.К	1
SB2, SB3	Кнопки	ВКИ-216 3Р 10А 230/400В	2

Таким образом, при выполнении поставленных задач удалось достичь следующих целей:

1. Схема учебно-научного стенда позволила понять принцип работы лабораторной установки и подобрать необходимое электрооборудование;

2. Подобранный электрооборудование делает возможным создание стенда для его эксплуатации в лабораторных условиях;

3. Для визуальной оценки будущей лабораторной установки, а также для оценки занимаемого пространства по габаритным чертежам была спроектирована 3Д модель предполагаемой установки.

В дальнейшем планируется выполнить сравнительный анализ переходных процессов АД и СДПМ в программе Matlab Simulink и получить данные о показателях качества переходных процессов.

Далее на основе полученных данных необходимо будет сформулировать описание стенда, цели и задачи для лабораторной работы (составить техническую документацию).

Литература:

1. Петухов С. В., Кришьянис М. В. Электропривод промышленных установок: учебное пособие / сост. С. В. Петухов, М.В. Кришьянис. – Архангельск: Изд-во С(А)ФУ, 2015. – 303 с.

2. Забудский Е.И. Электрические машины. Ч. 3. Синхронные машины: учебное пособие для вузов. – Москва: МГАУ, 2008. - 195 с.

3. Беляев А.В., Выбор аппаратуры, защит и кабелей в сетях 0,4 кВ: учебное пособие. – Спб.: ПЭИПК, 2008. – 230 с.

РАЗРАБОТКА ГРАФИЧЕСКОГО ОПЕРАТОРСКОГО ПУЛЬТА НА БАЗЕ МИКРОСХЕМЫ ТИПА СИСТЕМЫ НА КРИСТАЛЛЕ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ОБОРУДОВАНИЕМ

Д.Е. Гришанин, Д.Е. Сердюк

**Сибирский государственный университет
телекоммуникаций и информатики,
г. Новосибирск, super.daniil2@yandex.ru**

Научный руководитель: Фарафонов С.Ю., ст. преподаватель

В данной статье рассматривается вопрос разработки многофункционального устройства НМИ (Human-Machine Interface), которое является важнейшей частью современных систем автоматизации для управления технологическим оборудованием.

This article discusses the development of a multifunctional device HMI (Human-Machine Interface), which is the most important part of modern automation systems for controlling technological equipment.

Сегодня мир автоматизации не представить без операторских панелей. Надежная и экономичная аппаратная часть, универсальное программное обеспечение и общие стандарты драйверов в совокупности с современными операционными системами реального времени это основные особенности, которые прочно удерживают позиции технологии в автоматизации. Но проблемой в проектировании таких устройств является отсутствие открытой технической документации на интегральную микросхему на базе которых можно построить операторскую панель.

Решением данной проблемы является система на кристалле от производителя Allwinner модель V3s, потому что она имеет: низкую стоимость, открытую техническую документацию, различные блоки аудио и видео обработки и интегрированную оперативную память в отличие от других микроконтроллеров на базе которых построены другие операторские панели.

Система на кристалле Allwinner V3s отличается компактностью, экономичностью и эффективностью работы для решения поставленных задач.

Технические характеристики системы на кристалле Allwinner V3s представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Технические характеристики Allwinner V3s

CPU	ARM Cortex-A7 @ до 1.2 ГГц
Память	64 Мб DDR2
Хранилище операционной системы	SD 2.0, eMMC 4.41, SPI NAND Flash
Наличие аудио кодека	Есть
Наличие блока видео обработки	Есть
Наличие видео входа/выхода	Есть
Периферия	<ul style="list-style-type: none"> •LRADC/SPI/TWI/UART/PWM •USB 2.0 OTG •EMAC+PHY
Наличие драйвера ISP	Есть
Операционная система	Linux Debian 8

Так как система на кристалле Allwinner V3s выполняет функции целого устройства, нам остаётся только подсоединить жидкокристаллический дисплей на тонкопленочных транзисторах, нужные нам интерфейсы. Главным требованием для корректной работы Allwinner V3s является формирование необходимых питающих напряжений таких как:

1. +1,2В – питание CPU;
2. +1,8В – питание встроенной памяти DDR2;
3. +3В – питание аналоговых частей таких как система и кодек для обработки видеоизображения;
4. +3,3В – питание портов ввода вывода.

Структурная схема общей работы устройства показана на рисунке 1.

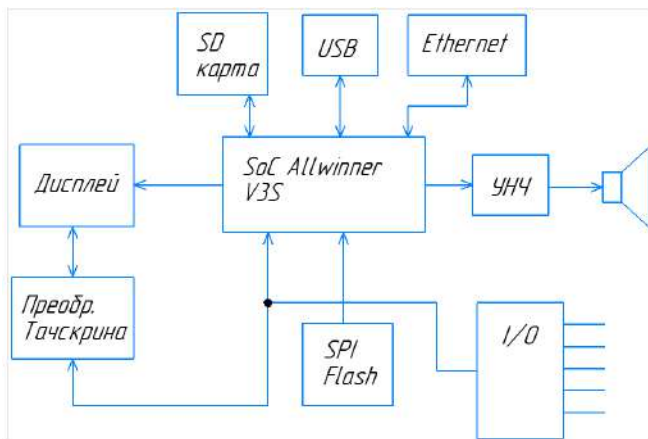


Рис.1 – структурная схема графического операторского пульта

Питание реализовано через внешний источник питания 12-24В. Входное питающее напряжение предварительно поступает на понижающий импульсный преобразователь, где из входного напряжения 12-24В формируется стабильное напряжение +5В.

Для формирования питающих напряжений используются микросхемы DC-DC преобразователей. Они формируют питание для системы на кристалле, LCD-дисплея, усилителя низкой частоты, микросхемы преобразователя тачскрина, карты памяти, разъёма Ethernet и микросхемы расширителя портов ввода вывода. Особенностью дисплея является то, что для его запуска и работы требуется формировать определенные питающие напряжения такие как: +3,3В; +10,4В; +18В и -7В.

Для защиты системы на кристалле от воздействия статического электричества на выводах разъёма IDC-40 было принято решение использовать стабилитронные сборки MMBZ5V6ALT1G. Трассировка печатной платы не является проблемой так как система на кристалле имеет тип корпуса 128-контактный eLQFP. Внешний вид платы управления показан на рисунке 2.

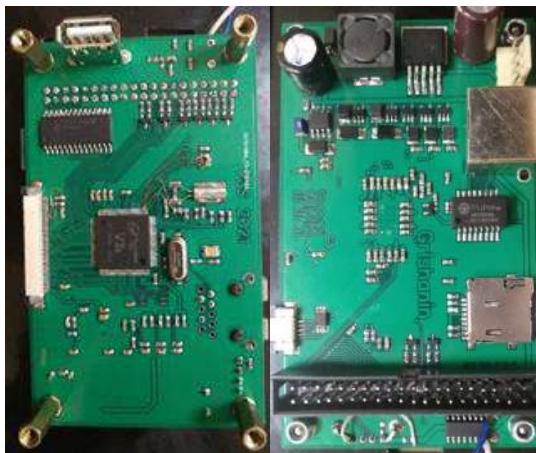


Рис.2 – Управляющая плата

Основание операторского пульта сделано из плоской стальной пластины, где с помощью стальных рамок центрируется и удерживается LCD дисплей и тачскрин относительно выреза в панели. Все детали устройства крепятся на металлическую панель при помощи стандартных винтов. Для крепления в шкафу управления проделывается прямоугольное отверстие размерами 220 x 240 x 33 мм. Операторская панель фиксируется в технологическом оборудовании с помощью крепежных отверстий.

Внешний вид разработанного графического операторского пульта показан на рисунке 3.



Рис.3 – Собранное устройство

Разработанный графический операторский пульт способен управлять технологическим оборудованием и выводить нужную информацию о состоянии с помощью микросхемы расширителя портов ввода\вывода в различных промышленных установках. Также он имеет ряд преимуществ по сравнению с аналогичными устройствами:

1. Низкая стоимость
2. Хорошая производительность
3. Практичная установочная глубина
4. Экономичное потребление энергии

Где бы ни работало это устройство – в крупных промышленных системах или в отдельных применениях – графический операторский пульт выделяется среди промышленных компьютеров.

Литература:

1. SUNXI [Электронный ресурс] – URL: https://linux-sunxi.org/Main_Page (Дата обращения: 06.11.2021).
2. Немудров В., Мартин Г. Системы-на-кристалле. Проектирование и развитие. – М.: РИЦ «Техносфера», 2004. – 216 с. – (Мир электроники).
3. Приходько Д.Д. Lichee Pi Zero – одноплатный компьютер на базе Allwinner V3S [Электронный ресурс] – URL: <https://servernews.ru/949022> (Дата обращения: 06.11.2021).

ОПТИМИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА РЕГУЛИРОВАНИЯ ДАВЛЕНИЯ НА ВЫХОДЕ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ГАЗОВОГО КОМПРЕССОРА

К.Г. Губская

Новосибирский государственный технический университет,

г. Новосибирск, henia.gubskaya@yandex.ru

Научный руководитель: Кавешников В.М., к.т.н., доцент

Рассматривается механизм возникновения помпажа в система «центробежный компрессор - сеть». На основании теории Грейтцера разрабатывается модель системы регулирования давления на выходе центробежного газового компрессора в процессе получения сжиженного природного газа (СПГ) с учетом явления помпажа.

The mechanism of the surge in the “centrifugal compressor - network” system is considered. Based on Greitzer’s theory, a model of a pressure control system at the outlet of a centrifugal gas compressor in the process of obtaining

liquefied natural gas (LNG) is being developed, taking into account the phenomenon of surging.

Энергетическая промышленность в современном мире развивается быстрыми темпами [2]. Сегодня природный газ в сжиженном виде является, одним из самых перспективных направлений развития энергетики в мире, так как он обладает рядом преимуществ по сравнению с другими видами топлива и сырья, а также является более чистым источником энергии.

Для обеспечения стабильной работы, рынок СПГ требует решений высокой надежности, основанных на новейших технологиях. Ключевым элементом, обеспечивающим непрерывное производство СПГ, является центробежный компрессор. Как правило, он выполняет многоступенчатое сжатие природного газа для его последующего хранения и транспортировки.

В системах, где основным элементом является центробежный компрессор возможно возникновение явления помпажа (режима газодинамической неустойчивости). При этом возникают интенсивные колебания давления, расхода газа изменяются от максимального до минимального и даже отрицательного значений, все это приводит к возрастанию динамических нагрузок на основные опорные узлы компрессора [4]. В результате резко снижается надежность и ресурс всей системы в целом, а в отдельных случаях помпаж может привести к разрушению машины.

Впервые помпаж был обнаружен в стационарных установках [3], а его возникновение было связано с положительным наклоном характеристики компрессора:

$$P = (d\Psi / d\Phi), \quad (1)$$

где Ψ – степень сжатия газового потока компрессором, Φ – расход газа через компрессор. Позже данная гипотеза была подтверждена на основе упрощенных уравнений газовой системы: явление помпажа возникает при положительной производной характеристики компрессора, а при уменьшении величины производной интенсивность помпажа ослабевает.

Согласно принятой теории Мура и Грейтцера [1, 3], для возникновения помпажа, а также для поддержания помпажных автоколебаний необходимо, чтобы наклон характеристики компрессора P превысил определенный положительный предел $P > P_{\text{крит}} > 0$. Графики статических и динамических характеристик, а также линия помпажа показаны на рисунках 7 и 8 соответственно. Следует отметить, что на

возникновение помпажа влияют не только процессы, происходящие внутри самого компрессора, но и условия сети. При этом большое значение приобретают такие параметры как: характеристика сети:

$$\Phi_C = (d\Psi_{op} / d\Phi), \quad (2)$$

где Ψ_{op} – степень сжатия в дросселе; объем камеры за компрессором (ресивера) V_p и характеристика компрессора (Π) в области неустойчивости.

По результатам изучения работ Мура и Грейтцера было составлено математическое описание центробежного компрессора с учетом явления помпажа [3]:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \Phi &= \frac{1}{l_C} (\Psi_C(\Phi) - \Psi), \\ \frac{d}{dt} \Psi &= \frac{1}{4B^2 l_C} (\Phi - \Phi_C), \end{aligned} \quad (3)$$

где Φ – расход воздуха через компрессор, Ψ – степень сжатия воздушного потока компрессором, B – параметр Грейтцера, $l_C = l_{m.вс.} + l_k + l_{m.н.}$, $l_{m.вс.}$ – длина трубы на всасывания, l_k – длина компрессора, $l_{m.н.}$ – длина трубы на нагнетании компрессора, Φ_C – расход сети, $t = \frac{U_\tau}{R}$ – относительное время, где U – тангенциальная скорость в среднем диаметре, R – средний радиус компрессора, τ – реальное время, $\Psi_C(\Phi)$ – газодинамическая характеристика компрессора:

$$\Psi_C(\Phi) = \Psi_{C0}(\omega) + H(\omega) \times \left[1 + \frac{3}{2} \left(\frac{\Phi}{W(\omega)} - 1 \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{\Phi}{W(\omega)} - 1 \right)^3 \right] \quad (4)$$

$\Psi_{C0}(\omega)$ – сжатие при отсутствии расхода; W – полуширина газодинамической характеристики $W = k_w \omega$, H – полувысота

газодинамической характеристики. $H = k_H \omega^2$; k_H, k_W – конструктивные коэффициенты компрессора; ω – скорость вращения компрессора.

После подстановки (4) в первое уравнение системы (3) последняя преобразуется к виду:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d}{dt} \Phi &= \frac{1}{l_c} \left(\Psi_{c0}(\omega) + H(\omega) \times \left[1 + \frac{3}{2} \left(\frac{\Phi}{W(\omega)} - 1 \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{\Phi}{W(\omega)} - 1 \right)^3 \right] - \Psi \right), \\ \frac{d}{dt} \Psi &= \frac{1}{4B^2 l_c} (\Phi - \Phi_c), \end{aligned} \right. \quad (5)$$

На основании математического описания (уравнения 3...5) разрабатывается модель центробежного газового компрессора с учетом явления помпажа (Рисунок 1) в замкнутой по давлению системе регулирования с применением ПИД-регулирования в среде MatLab. Для уточненного учета свойств газов, а также особенностей конструкции компрессоров используется раздел Gas библиотеки Simscape, которая содержит базовые элементы газовых систем такие, как трубы, резервуары, преобразователи энергии, а также датчики и источники давления.

В магистерской диссертации на основании проведенных исследований и полученных результатов планируется решение следующих задач:

Расширение исследований причин возникновения и развития помпажных явлений (влияние вида семейства статических напорных характеристик, геометрических параметров компрессора, условий на входе и на выходе системы и т.д.).

Использование аппарата определения автоколебаний в нелинейных системах (фазовые траектории, фазовый портрет и др.) для синтеза регулятора предотвращения помпажа.

Синтез предиктивного регулятора ухода от помпажа.

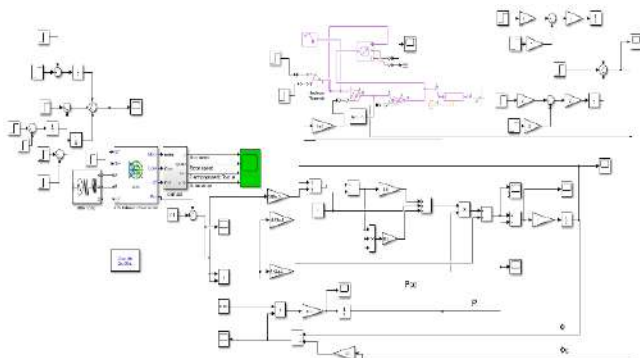


Рис. 1 – математическая модель системы автоматического регулирования с учетом явления помпажа

Литература:

1. Грейтцер Е.М. Помпаж и вращающийся срыв в осевых компрессорах / Е. М. Грейтцер // Труды американского общества инженеров-механиков. Энергетические установки. – 1988. – Т. 86, № 3. – С. 67-85.

2. Майорец М., Симонов К. Сжиженный природный газ – будущее мировой энергетики. – М.: Альпина Паблишер, 2013 - 360 с.

3. Moore F.K. A theory of post-stall transients in an axial compressor systems: Part J – Development of equations / F.K. Moore, E.M. Greitzer // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. – 1986. – Vol. 108. – P. 68–76. – Mode of access: https://www.researchgate.net/publication/3732471_A_Moore-Greitzer_axial_compressor_model_with_spool_dynamics. – Title from screen.

4. Taylor E. S. The centrifugal compressor. Aerodynamic of turbines and compressor / E. S. Taylor. – N.Y: Princeton University Press, 1964. - 88 P.

ЧАСТОТНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДЛЯ ПИТАНИЯ ОДНОФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

С.Ю. Еремочкин, Д.В. Дорохов, А.А. Жуков
Алтайский государственный технический
университет им. И.И. Ползунова,
г. Барнаул, s.eremochkin@yandex.ru

Научный руководитель: Стальная М.И., к.т.н., профессор

Однофазный асинхронный электропривод получил широкое распространение в средствах малой механизации бытового назначения, что объясняется простотой эксплуатации и низкой стоимостью однофазных двигателей. В то же время, для запуска однофазных двигателей в большинстве случаев применяется схема питания, содержащая фазосдвигающие конденсаторы. Конденсаторный способ запуска имеет ряд недостатков, которых лишены устройства, выполненные на основе полупроводниковых элементов. В связи с этим актуальной задачей является разработка полупроводниковых преобразователей для питания однофазных асинхронных электродвигателей.

A single-phase asynchronous electric drive is widely used in small-scale household appliances, which is explained by the ease of operation and low cost of single-phase motors. At the same time, in most cases, a power circuit containing phase-shifting capacitors is used to start single-phase motors. The capacitor starting method has a number of disadvantages, which are lacking in devices based on semiconductor elements. In this regard, an urgent task is the development of semiconductor converters for supplying single-phase induction motors.

Однофазные асинхронные двигатели находят широкое применение в бытовых устройствах, промышленных аппаратах малой механизации, станках для обработки древесины, металла, пластика, применяются для привода транспортеров, подъемников, кормоизмельчителей, бетоносмесителей. Также однофазный электропривод широко используются в установках сельскохозяйственной отрасли, применяясь в зернопогрузчиках, кормораздатчиках, зернодробилках, насосных станциях для полива, вентиляторах.

Широкое распространение однофазных двигателей объясняется их низкой стоимостью, надежностью, простотой эксплуатации, а также тем, что для питания используется однофазная сеть, получившая широкое распространение в бытовом хозяйстве [1].

При этом, применяются устаревшие и не эффективные способы питания от сети, в основном это конденсаторный пуск, который имеет ряд недостатков:

- невозможность осуществления реверса двигателя;
- большие габариты конденсаторов;
- при перепадах температуры емкость конденсаторов может уменьшаться;
- пусковой конденсатор после запуска необходимо отключать, что создает сложности при эксплуатации.

При достижении электродвигателем номинальной скорости также прекращается подача питания на пусковую обмотку статора и к сети остается подключенной только рабочая. Таким образом, в статоре создается не вращающийся, а пульсирующий магнитный поток. По этой причине КПД однофазных электродвигателей при работе с использованием пусковых конденсаторов имеет относительно низкие значения.

В то же время, применение устройств запуска на основе полупроводниковых элементов способствует наиболее эффективному и энергосберегающему питанию однофазных асинхронных двигателей [2, 3]. Кроме того, полупроводниковые устройства обладают меньшими по сравнению с конденсаторами размерами, а также позволяют осуществлять реверс двигателя.

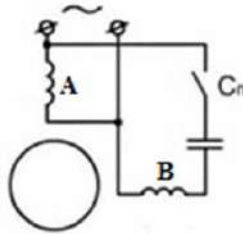


Рис.1 – схема запуска однофазного электродвигателя при использовании пускового конденсатора

На кафедре «Электротехника и автоматизированный электропривод» Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова разработан полупроводниковый редуктор, ведомый сетью, для регулирования скорости однофазного двухобмоточного асинхронного электродвигателя. На рисунке 2 представлена принципиальная электрическая схема устройства [4].

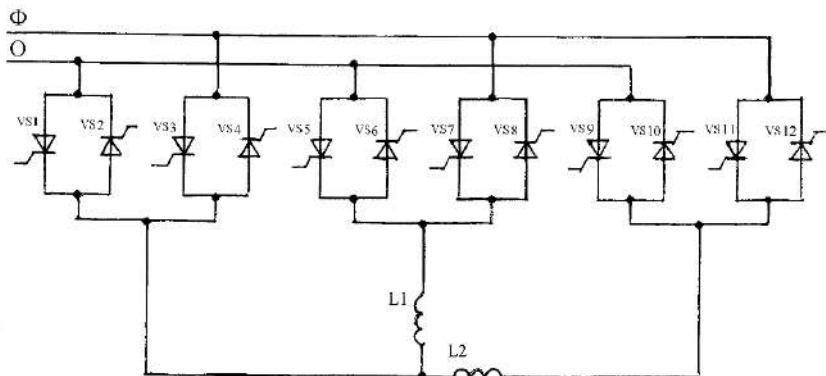


Рис. 2 – принципиальная электрическая частотного преобразователя

Принципиальная электрическая схема устройства содержит двенадцать тиристоров, которые попарно объединены в шесть полупроводниковых ключей. Каждый полупроводниковый ключ одним выводом подключен к питающей сети, а другим – к статорным обмоткам двигателя. Коммутация тиристоров происходит по определенному алгоритму, что позволяет дискретно регулировать скорость электродвигателя на пониженной частоте.

С целью исследования характеристик электропривода было проведено имитационное моделирование в программе MATLAB Simulink, в результате которого получены значения коэффициента полезного действия при работе с пусковым конденсатором и с разработанным частотным преобразователем.

Параметры однофазного асинхронного электродвигателя, используемые при моделировании работы электропривода, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры электродвигателя

Параметр	Значение
Номинальная мощность, Вт	90
Номинальное напряжение питания обмотки статора, В	220
Номинальная частота вращения, об/мин	1380
Частота питающего напряжения, Гц	50
Номинальный коэффициент полезного действия, %	48

Результаты исследования приведены на рисунке 3.

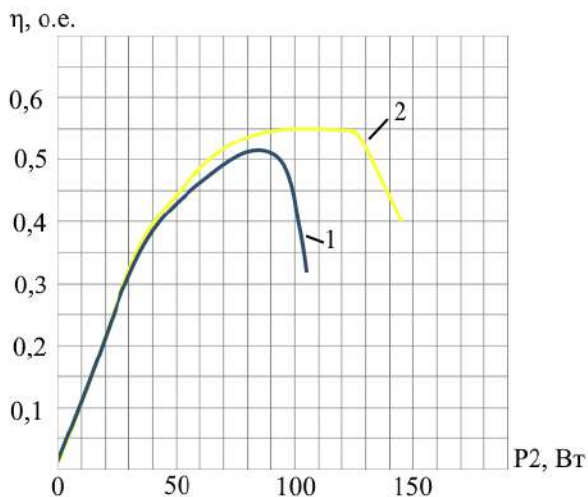


Рис. 3 – совмещенные характеристики зависимости КПД от мощности на валу двигателя: 1 – для конденсаторного запуска; 2 – для запуска с помощью частотного преобразователя

Из рисунка 3 видно, что КПД электродвигателя при работе с частотным преобразователем на 8% больше, чем при конденсаторном запуске от однофазной сети.

Таким образом, разработанный частотный преобразователь может быть использован в электроприводе бытовых устройств для запуска и работы однофазного асинхронного двигателя.

Литература:

1. Еремочкин С.Ю., Дорохов Д.В. Однофазный частотный регулятор скорости для запуска и работы трехфазного электродвигателя от однофазной сети // Инновационное развитие техники и технологий в промышленности (ИНТЕКС-2021): Сборник материалов Всероссийской научной конференции молодых исследователей с международным участием – Москва, 2021. – С. 181-185.

2. Халина Т. М., Стальная М. И., Еремочкин С. Ю. Система управления однофазнотрехфазным транзисторным реверсивным коммутатором, ведомым однофазной сетью // Известия горского государственного аграрного университета. – 2012. – Т. 49. – №3. – С. 300-304.

3. Полупроводниковое устройство бесконденсаторного запуска однофазного двухмоточного асинхронного двигателя: патент 207552

Российская Федерация: МПК H02P 1/42, 25/04 / С.Ю. Еремочкин, Д.В. Дорохов; заявитель и патентообладатель Еремочкин Сергей Юрьевич. – № 2021113982; заявл. 18.05.2021; опубл. 01.11.2021, Бюл. № 31.

4. Полупроводниковый редуктор, ведомый сетью, для регулирования скорости однофазного двухобмоточного асинхронного электродвигателя: патент 2439774 Российская Федерация: МПК H02P 27/16 / М.И. Стальная, О.А. Орлов, И.Е. Таланов, А.А. Скорняков; заявитель и патентообладатель Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. проф. образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова». – № 2010130583/07; заявл. 20.07.2010; опубл. 10.01.2012, Бюл. № 1.

ШИРОКОПОЛОСНЫЙ ТРЕХФАЗНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ ДЛЯ ПИТАНИЯ ТРЕХФАЗНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ОТ ОДНОФАЗНОЙ СЕТИ

**С.Ю. Еремочкин, Д.В. Дорохов
Алтайский государственный технический
университет им. И.И. Ползунова,
г. Барнаул, s.eremochkin@yandex.ru**

Научный руководитель: Стальная М.И., к.т.н., профессор

В настоящее время актуальной является проблема выбора способа запуска и работы трехфазного электродвигателя от однофазной сети, что обусловлено широким распространением однофазной системы электроснабжения. Запуск двигателя с использованием фазосдвигающих конденсаторов имеет множество недостатков, в то время как полупроводниковые преобразователи способны выполнять значительно большее количество функций и лишены недостатков конденсаторного способа запуска. В связи с этим разработка новых устройств на основе полупроводниковых элементов имеет большие перспективы.

Currently, the problem of choosing a method for starting and operating a three-phase induction motor from a single-phase network is urgent, which is due to the widespread use of a single-phase power supply system. Starting a motor using phase-shifting capacitors has many disadvantages, while semiconductor converters are capable of performing much more functions and are devoid of the disadvantages of a capacitor starting method. In this regard, the development of new devices based on semiconductor elements has great prospects.

В настоящее время в системах автоматизированного электропривода широкое распространение получили трехфазные асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором [1, 2]. Данный тип двигателей имеет относительно простую конструкцию и, как следствие, высокую надежность и низкую стоимость [3]. Трехфазные двигатели применяются преимущественно в электроприводах сельскохозяйственных электрифицированных машин, не требующих высокой точности регулирования: в зернодробилках, насосных станциях, доильных аппаратах, пилорамах и т.д. [4].

Для питания трехфазного двигателя необходимо подключение трех фаз питающей сети. При отсутствии трехфазной сети, что характерно для отдаленных районов сельской местности, работа электропривода также возможна и от одной фазы, для чего применяются различные способы подключения. Наиболее распространенный способ подключения трехфазного электродвигателя к однофазной сети основан на введении в цепь обмотки статора фазосдвигающего конденсатора. При тяжелом пуске параллельно рабочей емкости также подключается пусковой конденсатор, который затем выводится из цепи питания. При этом, существуют различные варианты подключения конденсатора, часть из которых представлена на рисунке 1.

Конденсаторный способ запуска имеет ряд недостатков:

- подбор емкости конденсатора требует математических вычислений, а также профильных знаний в сфере энергетики;
- при использовании пускового конденсатора после запуска его необходимо отключать, что создает дополнительные сложности при эксплуатации;
- срок службы бумажных конденсаторов составляет около 5000 часов, следовательно, их необходимо периодически менять.

Таким образом, недостатки конденсаторного способа запуска трехфазного двигателя от однофазной сети создают значительные трудности при эксплуатации.

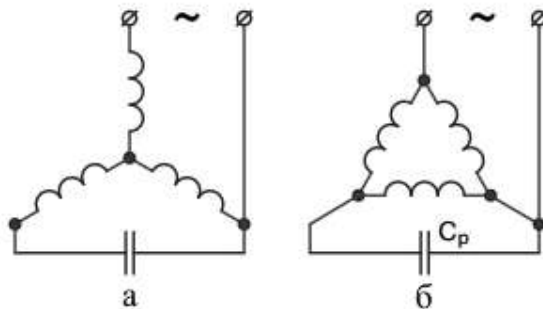


Рис.1 – Конденсаторный запуск трехфазного электродвигателя от однофазной сети
 а) при соединении обмоток статора по схеме «звезда»;
 б) при соединении обмоток статора по схеме «треугольник»

Альтернативой конденсаторному способу запуска является применение полупроводниковых преобразователей. Устройства на основе полупроводниковых элементов имеют ряд преимуществ:

- при правильной эксплуатации значительно более долгий срок службы по сравнению с конденсаторами;
- возможность регулирования скорости двигателя в широком диапазоне;
- простота эксплуатации: как правило, устройство содержит уже готовый алгоритм работы, программирование не требуется. Остается только подключить двигатель.

Кроме того, коэффициент полезного действия двигателя при питании посредством полупроводникового преобразователя значительно выше, чем при конденсаторном запуске. Следовательно, становится актуальной разработка полупроводниковых устройств для работы трехфазных двигателей от однофазной сети.

На кафедре «Электротехника и автоматизированный электропривод» Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова разработан широкополосный трехфазный преобразователь частоты, ведомый однофазной сетью переменного тока, для питания трехфазного асинхронного электродвигателя, принципиальная электрическая схема которого приведена на рисунке 2 [5].

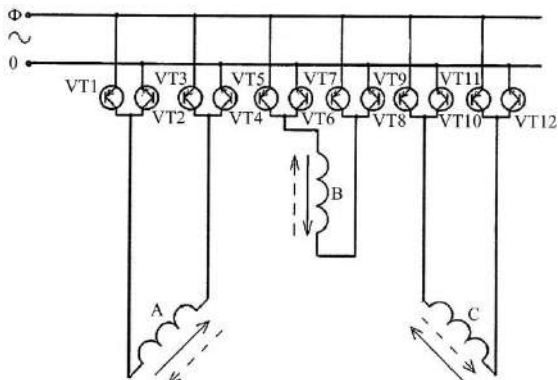


Рис. 2 – Принципиальная электрическая схема широкополосного трехфазного преобразователя частоты

Силовая часть устройства содержит 12 биполярных транзисторов, попарно подключенных к началам и концам статорных обмоток двигателя, что позволяет осуществлять регулирование скорости в широком диапазоне. Питание подается на обмотки по определенному алгоритму, тем самым обеспечивая создание вращающегося магнитного поля статора.

Для проверки работоспособности устройства в среде имитационного моделирования MATLAB Simulink был проведен компьютерный эксперимент, в котором исследовался КПД асинхронного двигателя при работе с широкополосным трехфазным преобразователем и при конденсаторном запуске.

Для моделирования параметров электропривода использовался асинхронный двигатель, имеющий следующие паспортные данные:

- номинальная мощность на валу – 90 Вт;
- номинальное напряжение питания обмотки статора – 220 В;
- синхронная частота вращения – 1500 об/мин ;
- частота питающего напряжения – 50 Гц;
- номинальный коэффициент полезного действия – 55%.

Результаты эксперимента представлены на рисунке 3.

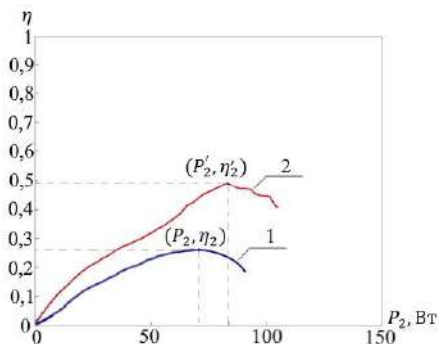


Рис. 3 – совмещенные характеристики зависимости КПД от мощности на валу двигателя:

1 – для конденсаторного запуска; 2 – для запуска с помощью широкополосного трехфазного преобразователя

Из рисунка 3 видно, что КПД электродвигателя при работе с широкополосным трехфазным преобразователем практически в два раза выше, чем при конденсаторном запуске от однофазной сети.

Таким образом, разработанное устройство может быть использовано в электроприводе различных сельскохозяйственных электрифицированных машин для питания трехфазного асинхронного электродвигателя от однофазной сети.

Литература:

1. Еремочкин С.Ю., Дорохов Д.В. Полупроводниковый преобразователь для запуска трехфазного электродвигателя от однофазной сети // Автоматизация и энергосбережение в машиностроении, энергетике и на транспорте: материалы XV междунар. науч.-техн. конф. – Вологда: Вологодский государственный университет, 2021. – С. 91-96.

2. Еремочкин С.Ю., Дорохов Д.В. Однофазный частотный регулятор скорости для запуска и работы трехфазного электродвигателя от однофазной сети // Инновационное развитие техники и технологий в промышленности (ИНТЕКС-2021): Сборник материалов Всероссийской научной конференции молодых исследователей с международным участием – Москва, 2021. – С. 181-185.

3. Халина Т. М., Стальная М. И., Еремочкин С. Ю. Система управления однофазнотрехфазным транзисторным реверсивным коммутатором, ведомым однофазной сетью // Известия горского

государственного аграрного университета. – 2012. – Т. 49. – №3. – С. 300-304.

4. Еремочкин С.Ю., Дорохов Д.В. Реверсивный полупроводниковый коммутатор запуска трехфазного асинхронного короткозамкнутого электродвигателя от однофазной сети // Энерго- и ресурсосбережение - XXI век: Материалы XVIII междунар. науч.-практ. конф. – Орёл: Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, 2020. – С. 43-48.

5. Широкополосный трехфазный преобразователь частоты, ведомый однофазной сетью переменного тока, для питания трехфазного асинхронного электродвигателя: патент 118486 Российская Федерация: МПК H02M 5/297 / М.И. Стальная, С.Ю. Еремочкин; заявитель и патентообладатель Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. проф. образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова». – № 2011152933/07; заявл. 23.12.2011; опубл. 20.07.2012, Бюл. № 20.

ВЕКТОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ БЕЗ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НАМАГНИЧИВАНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

В. А. Елاناкова, И. А. Ильенков

**Новосибирский государственный технический университет
Научный руководитель: Симаков Г. М., д.т.н., профессор**

The paper considers a variant of the parametric synthesis of the rotor flux linkage regulator without preliminary magnetization of the induction motor. An approach to optimization in terms of speed of motor torque control is considered, and a method of structural-parametric linearization of a two-channel system for generating motor torque is presented.

В настоящее время всё большее распространение получают системы электропривода переменного тока на базе асинхронного двигателя. В большинстве случаев система векторного управления строится для предварительно намагниченного электропривода. В данной статье рассмотрен синтез системы векторного управления асинхронным двигателем без предварительного намагничивания. Предложен метод векторного управления электроприводом с асинхронным электродвигателем без предварительного намагничивания. Метод основан на выравнивании быстродействия каналов управления

двухканальной системы и введение нелинейного регулятора типа звена деления, что позволит преобразовать нелинейную структуру в линейную. В качестве регулятора потокосцепления выбран ПИД-регулятор. В статье рассматривается вариант параметрического синтеза регулятора потокосцепления ротора без предварительного намагничивания асинхронного двигателя. Рассмотрен подход к оптимизации с точки зрения скорости управления крутящим моментом двигателя и представлен метод структурно-параметрической линеаризации двухканальной системы генерации крутящего момента двигателя. Введение нелинейного регулятора типа звена деления позволило преобразовать нелинейную структуру в линейную. Выбор в качестве выходной координаты момента двигателя позволяет существенно упростить математическую модель асинхронного двигателя. Во вращающейся системе координат момент двигателя может быть сформирован по нелинейной двухканальной структуре. Для оптимизации по быстродействию управления моментом двигателя необходимо выровнять инерционность каналов управления моментом и добиться пропорционального изменения потокосцепления ротора и поперечной составляющей тока статора. В статье была рассмотрена структурно-параметрическая линеаризация двухканальной схемы формирования момента с помощью заведения обратной связи по поперечной составляющей тока статора и использовании в системе звена деления. Был предложен вариант параметрического синтеза ПИД-регулятора потокосцепления ротора без предварительного намагничивания ротора. Результаты синтеза подтверждены цифровым моделированием.

Литература:

1. А.Б. Виноградов, Векторное управление асинхронным электроприводом, Иваново: Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина, 2008.
2. Г.М. Симаков, Системы автоматического управления электроприводов металлорежущих станков, Новосибирск: изд. НГТУ, 2007.
3. Г.Г. Соколовский, Электроприводы переменного тока с частотным регулированием, Москва: изд. Академия, 2006.
4. Г.М. Симаков, Ю.П.Филошов, Энергоэффективное управление электроприводом переменного тока, Новосибирск: изд. НГТУ, 2016, с.20

АЛГОРИТМ БЫСТРОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ

Н.Д. Ерещенко

Новосибирский государственный технический университет,

г. Новосибирск, niker217@mail.ru

Научный руководитель: Котин Д.А., к.т.н., доцент

Для обеспечения согласованной работы различных устройств, а так же точного выполнения математических операций, необходима точная расшифровка входного сигнала. Очевидно, что для его детального анализа наиболее удобно разложить его на составляющее и проанализировать совокупность более простых сигналов. Эта задача решается путем применения преобразования Фурье.

To ensure the consistent operation of various devices, as well as the accurate execution of mathematical operations, an accurate decoding of the input signal is necessary. Obviously, for its detailed analysis, it is most convenient to decompose it into components and analyze a set of simpler signals. This problem is solved by applying the Fourier transform.

Преобразование Фурье – это семейство математических методов, основанных на разложении исходной непрерывной функции от времени на совокупность базисных гармонических функций (в качестве которых выступают синусоидальные функции) различной частоты, амплитуды и фазы. Из определения видно, что основная идея преобразования заключается в том, что любую функцию можно представить в виде бесконечной суммы синусоид, каждая из которых будет характеризоваться своей амплитудой, частотой и начальной фазой[1].

Иными словами преобразование Фурье позволяет преобразовать функцию времени $f(t)$ в функцию частоты $F(\omega)$.

Связь функции и ее Фурье-образа, определяется равенством

$$F(\omega) = \int f(t)e^{-i\omega t} dt \quad (1)$$

Так как мы говорим о сигналах, то более предпочтительной будет частота в герцах[2]. Для преобразования зависимости проведем замену $\omega = \nu \cdot 2\pi$, тогда преобразование Фурье примет вид.

$$F(\omega) = \int f(t)e^{-i\nu 2\pi t} dt \quad (2)$$

На входе в устройство сигнал из функции превращается в матрицу значений состояния сигнала, взятых с одинаковой частотой, т.е. происходит дискретизация сигнала[2].

В таком случае мы переходим от интеграла к ряду

$$F(k) = \sum_{n=0}^{N-1} f(n)e^{-i\frac{2\pi}{N}nt}, \text{ где } k = 0 \dots N - 1 \quad (3)$$

Дискретное преобразование Фурье (далее ДПФ) N отсчетов сигнала $f(n), n = 0 \dots N - 1$ (в общем случае комплексного) ставит в соответствие N комплексных спектральных отсчетов $f(k), k = 0 \dots N - 1$ [3]. Для нахождения одного спектрального отсчета требуется N операций комплексного умножения и сложения. Следовательно, для реализации ДПФ потребуется N^2 операций комплексного умножения и сложения, что является весьма большой нагрузкой на процессор вычислительного устройства и сказывается на задержке результатов разложения относительно входного сигнала[3].

Для упрощения поставленной задачи, как и ранее мы можем разбить существующую матрицу на 2 более простых, что уменьшит количество операций в 2 раза. Таким образом, если $N = 2^L$, мы можем уменьшить число операций в 2^{L-1} раз, т.е. до $\frac{N^2}{2^{L-1}} = \frac{2^{2L}}{2^{L-1}} = 2^{L+1} = 2N$, такой подход называется быстрым преобразованием Фурье (далее БПФ)[4].

Алгоритм быстрого преобразования Фурье, был реализован в среде TwinCAT, а также была оценена точность проводимых вычислений.

Зададим на входе сумму 3 синусоид, пусть несущей частотой будет 50 Гц. Тогда разобьем ее период на 32 значения, что даст нам разложение на 32 частоты с шагом 50 Гц, однако в разложении учитываются как положительные, так и отрицательные частоты. Как известно синусоида, взятая с противоположной по знаку частотой и сдвигом на половину периода, будет полностью совпадать с исходной по мгновенным значениям. Исходя из этого, половина полученных значений не несёт смысловой нагрузки, те из 32 точек мы получаем разложение на 16 гармоник, где $\nu = 0 \dots (16 - 1) \cdot 50 = 0 \dots 750$ Гц.

Входные характеристики синусоид представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Входные характеристики синусоид

№ \ Величина	A	φ	ν
1	100	70	50
2	50	30	250
3	10	150	350

Рассмотрим полученные значения фаз и амплитуд (рисунки 1 и 2 соответственно).

```

E: S_gref_fi
-----
S_gref_fi[0] = 90
S_gref_fi[1] = 70
S_gref_fi[2] = 142.9444
S_gref_fi[3] = 50.00252
S_gref_fi[4] = 22.5
S_gref_fi[5] = 30
S_gref_fi[6] = 45.66443
S_gref_fi[7] = 150
S_gref_fi[8] = 54.46233
S_gref_fi[9] = 109.9831
S_gref_fi[10] = 50.71908
S_gref_fi[11] = 153.444
S_gref_fi[12] = 67.49398
S_gref_fi[13] = 57.6953
S_gref_fi[14] = 65.85946
S_gref_fi[15] = 124.992
    
```

Рис. 1-Матрица значений фаз базисных гармоник

```

E: S_gref_A
-----
S_gref_A[0] = 2.146767e-006
S_gref_A[1] = 100
S_gref_A[2] = 8.356465e-007
S_gref_A[3] = 2.052898e-006
S_gref_A[4] = 1.10135e-006
S_gref_A[5] = 49.88989
S_gref_A[6] = 2.148815e-006
S_gref_A[7] = 10.00001
S_gref_A[8] = 1.025477e-006
S_gref_A[9] = 2.790616e-006
S_gref_A[10] = 1.131802e-006
S_gref_A[11] = 8.148197e-006
S_gref_A[12] = 4.561941e-007
S_gref_A[13] = 3.448043e-006
S_gref_A[14] = 3.17923e-007
S_gref_A[15] = 2.328216e-005
    
```

Рис. 2-Матрица значений амплитуд базисных гармоник

Как видно по результатам вычислений амплитуды найдены с точностью до 4 знака после запятой (позиции 1, 5 и 7), фазы же были определены без погрешностей.

Однако можно наблюдать присутствие побочных гармоник, но значения их амплитуд стремятся к нулю, а значит и их влияние можно не учитывать.

Добавим во входной сигнал помехи, амплитуда которых не будет превышать амплитуду несущей гармоники. В таком случае получим следующие значения (Рисунки 3 и 4).

```

S_graf_f
...S_graf_f[0] = 90
...S_graf_f[1] = 63.86022
...S_graf_f[2] = 43.45333
...S_graf_f[3] = 71.27168
...S_graf_f[4] = 71.38174
...S_graf_f[5] = 22.88729
...S_graf_f[6] = 144.5777
...S_graf_f[7] = 144.4308
...S_graf_f[8] = 90
...S_graf_f[9] = 154.355
...S_graf_f[10] = 83.59859
...S_graf_f[11] = 142.5318
...S_graf_f[12] = 143.278
...S_graf_f[13] = 22.9251
...S_graf_f[14] = 19.15398
...S_graf_f[15] = 30.81054

```

Рис. 3-Матрица значений фаз базисных гармоник с помехами

```

S_graf_A
...S_graf_A[0] = 101.25
...S_graf_A[1] = 95.38953
...S_graf_A[2] = 2.649905
...S_graf_A[3] = 7.79368
...S_graf_A[4] = 14.98939
...S_graf_A[5] = 58.33353
...S_graf_A[6] = 5.485325
...S_graf_A[7] = 24.55495
...S_graf_A[8] = 12.5
...S_graf_A[9] = 5.425381
...S_graf_A[10] = 11.11954
...S_graf_A[11] = 13.4671
...S_graf_A[12] = 2.851405
...S_graf_A[13] = 8.863407
...S_graf_A[14] = 4.900857
...S_graf_A[15] = 13.56155

```

Рис. 4-Матрица значений амплитуд базисных гармоник с помехами

Из новых результатов можно наблюдать снижение точности определения амплитуд заданных гармоник и увеличение влияния остальных базисных синусоид. Самое большое отклонение (146%) у гармоники с частотой 150 Гц и амплитудой, равной 10. Это связано с тем, что амплитуда шумов многократно превышает значение амплитуды данной гармоники, а именно в 10 раз.

На значения фаз же шумы повлияли не так сильно, здесь самое большое отклонение имеет гармоника с частотой 250 Гц и составляет 24%.

В заключение можно сделать вывод, что написанная программа по БПФ имеет достаточно высокие показатели точности и устойчивости к помехам и во многом определяется размерностью используемого типа данных.

Литература:

1. Опенгейм А., Шаффер Р. Цифровая обработка сигналов. Москва, Техносфера, 2012. 1048 с. ISBN 978-5-94836-329-5
2. Рабинер, Л., Гоулд, Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. Москва, Мир, 1978. 848 с.

3. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов СПб, Питер, 2002.
4. Лапинова С.А., Саичев А.И. Учебно-методический материал по программе повышения квалификации “Применение современных информационно-телекоммуникационных систем и технологий для обработки сигналов различной природы”. Нижний Новгород, 2006, 89 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЕТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕСПЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Д.Т. Кожуганова

**Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, kozhuganova.2016@stud.nstu.ru
Научный руководитель: Кавешников В.М. к.т.н., доцент**

Разработка беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) – одно из наиболее перспективных направлений развития современной гражданской и военной авиации. Данная работа позволит более детально исследовать характеристики БПЛА и выявить его слабые и сильные стороны. Тем самым усовершенствовать аппарат и расширить область его применения.

Изучив одну из научных статей по механике и машиностроению Булата П.В. и Минина О.П. можно сделать вывод, что одним из самых перспективных направлений в области летательных аппаратов с коротким взлетом и посадкой является разработка аэродинамических схем построенных по типу «летающее крыло» малого удлинения и большой строительной высоты. В общем случае «летающее крыло» - разновидность схемы «безхвостка» с редуцированным фюзеляжем, роль которого играет крыло, несущее все агрегаты, возможно и экипаж, а также полезную нагрузку. Особенностью «летающих крыльев», по сравнению с другими типами БПЛА, является отсутствие фюзеляжа, а также больших плоскостей управления, что снижает удельную массу планера и дает возможность существенно увеличить массу полезной нагрузки или запас топлива. Для военного применения очень важно, что формы такого самолета легко оптимизировать для снижения эффективной площади рассеяния и радиолокационной заметности самолета. Можно отметить ряд преимуществ, по сравнению с пилотируемой авиацией, которые были выявлены в результате анализов и опытов. Основные из них: значительное снижение габаритных характеристик; возможность применения бортового радиолокационного

оборудования и различного вооружения; приближение к цели на близкое расстояние и тд.

Целью данной работы является повышение эффективности потребления энергии. Необходимо определить факторы влияющие на эксплуатацию БПЛА.

В рамках программы исследований были проведены измерения аэродинамических характеристик БПЛА. Использование аэродинамической схемы «летающее крыло» может обеспечить и требования по обеспечению малой заметности, и потребные аэродинамические характеристики. Рассчитав бистатические диаграммы ЭПР (эффективная площадь рассеяния), было выяснено, что распределение поверхностных токов демонстрирует вклад передней кромки крыла при падении волны по нормали к кромке. Диаграммы эффективной площади рассеяния (ЭПР), характеризующей радиолокационную заметность аппарата, рассчитаны методом физической оптики для варианта моностатической локации. Результаты расчетов показывают, что заострение передней кромки крыла приводит к существенному снижению аэродинамического качества БПЛА. В связи с этим рационально рассмотреть влияние на снижение эффективной площади рассеяния БПЛА радиопоглощающих покрытий.

Благодаря исследованию характеристик БПЛА было показано насколько важно строение кромки крыла, которое в дальнейшем обеспечивает благоприятные условия при эксплуатации аппарата. Для задач связанных с преодолением зоны противовоздушной обороны, предпочтительно использование беспилотных аппаратов, выполненных по аэродинамической схеме «летающее крыло», обладающих малым уровнем заметности и потребным значением аэродинамического качества. Были определены факторы влияющие на снижение аэродинамического качества БПЛА, которые в дальнейшем будут учтены в корректировке аппарата. Самым главным недостатком схемы БПЛА данного типа, является небольшое удаление плоскостей управления от центра масс, что обуславливает их низкую эффективность, делает беспилотник очень неустойчивым, рыскливым в полете.

На данном уровне развития науки и техники создание БПЛА типа «летающее крыло» является осуществимой задачей.

«Летающие крылья» будут в дальнейшем приносить пользу человечеству. Их можно использовать при борьбе с контрабандой и нарушителями границы нашего государства. Для пограничной службы (патрулирования), тушение лесных пожаров и тд.

Литература:

1. Артанов В.В., Бейчук Д.Д. Перспективные беспилотные летательные аппараты // Сб. статей Всерос. молодеж. науч.-практ. конф. «Авиамашиностроение и транспорт Сибири». Иркутск: Изд-во ИрНИТУ, 2016. С. 169–172.

2. Говорков А.С. Параметры объектов производственной системы при проектировании технологического процесса сборки // Наука. Промышленность. Оборона: труды XI Всерос. науч.-техн. конф. 2010. С. 123–127.

3. Гусейнов А.Б., Трусов В.Н. Проектирование малозаметных летательных аппаратов. - М.: Изд-во МАИ, 2014. - 288 с.

4. Чьен Х.В., Лаврентьева М.В. Определение состава базирующих элементов сборочного приспособления при сборке авиационного изделия // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2013. № 11 (82). С. 74–80.

5. Зарицкий А.К., Говорков А.С. Практическое применение модуля Routingelectrical системы NX при проектировании электрожгутов беспилотного летательного аппарата // Авиамашиностроение и транспорт Сибири: сб. статей V Всерос. науч.-практ. конф. 2015. С. 58–66.

ОПАСНОСТЬ ВЗЛОМА И ОТКАЗА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

И.Д. Конусов

**Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, konusovid@icloud.com**

Научный руководитель: Панкрац Ю.В., к.т.н., доцент

В тезисах рассматривается проблема взлома систем управления беспилотных микролетных аппаратов, а также важность создания моделей обеспечивающих бесперебойную работу систем управления микролетными аппаратами.

The paper deals with the problem of hacking control systems for unmanned micro air vehicles, as well as the importance of creating models that ensure uninterrupted operation of control systems for micro air vehicles.

Современное развитие систем автоматического управления системами различных аппаратов все чаще приводит к полной автоматизации и все меньшего вмешательства в управление аппаратами

со стороны людей. Данный факт применим и к системам управления беспилотными летательными аппаратами.

В последние годы автономные беспилотные летательные аппараты (БЛА), оснащенные бортовыми датчиками, вызвали большой интерес и получили широкое распространение во многих сферах применения, таких как поиск и спасение, геодезия и инспекция, точное земледелие и аэрофотосъемка, различные хобби людей, доставка товаров и военная деятельность [1]. Для того чтобы обеспечить управляемый полет с 6 степенями свободы (3-осевая позиция и 3-осевая ориентация), необходима типичная датчиковая система микролетного аппарата, которая состоит из датчиков ориентации и положения, использующаяся для осуществления обратной связи с контроллером полета [2], [3]. Благодаря технологии микроэлектро-механических систем (МЭМС) большинство современных микролетных аппаратов используют инерциальные измерительные блоки ИИБ основанные на МЭМС для определения положения, которые учитывают ограничения по размеру, весу и мощности при проектировании и производстве таких транспортных средств. [2]. Инерциальные измерительные блоки могут поддерживать больше, чем просто определение положения и управление транспортным средством. Многие измерения параметров этих ИИБ, включая 3-осевые ускорения кузова транспортного средства, 3-осевые угловые скорости тела и иногда 3-осевое магнитное поле, также использовались для компенсации ошибок или сбоев в определении положения для повышения надежности системы [4]. С точки зрения безопасности полетов и системной безопасности такая сильная зависимость от ИИБ обеспечивает четкую цель для состязательных атак [5 - 8].

В настоящее время, методологии состязательных атак, нацеленных на инерциальные измерительные блоки микролетных аппаратов, быстро развиваются, что определенно является проблемой в разработке аппаратов. Недавние исследования состязательных атак показали, что многие широко используемые инерциальные измерительные блоки уязвимы для атак, связанных с их физическими характеристиками. Обычные подходы, основанные на избыточности, неэффективны против таких атак, потому что избыточные инерциальные измерительные блоки имеют одинаковые или похожие физические уязвимости. На сегодняшний день атаки, нацеленные на инерционные измерительные блоки, не ограничиваются традиционным взломом в киберпространстве [5], [6], но постепенно используют физические уязвимости датчиков для создания более эффективных и скрытых атак [7], [8]. Как показано в [7], Сон и другие успешно нарушили работу дронов, используя акустический

шум заданных частот, чтобы вызвать резонанс ИИБ, что привело к отказу датчика. Триппел и другие аналогичным образом манипулировали показаниями ИИБ и продемонстрировали возможность получить полный контроль над транспортным средством и ввести его в заблуждение [8]. Эти современные атаки вызывают отказы датчиков и создают проблему для двух основных аспектов отказоустойчивой конструкции датчиков: обнаружение и изоляция ошибок, и восстановление после сбоев.

В работе [9] представляется новое отказоустойчивое решение для сценариев со взломом инерциальных измерительных блоков, использующее отдельную информацию о местоположении и курсе полета для восстановления состояний до отказа. Вместо добавления дополнительных альтернатив ИИБ для восстановления, предлагаемый метод призван минимизировать любые модификации существующей системы и программы управления. Но при прочих равных предложенный метод имеет объективные проблемы связанные с операционным возможностями систем встраиваемых в микролетные летательные аппараты.

Что касается прямой индикации неисправности, то прошлые исследования интересовали обнаружение аномалий в состоянии транспортных средств, что обычно не эквивалентно указанию отказа датчика физического местоположения. Для микролетного летательного аппарата различные сбои/атаки датчиков могут вызывать схожие нарушения состояния полета, например, подергивание во время полета может происходить либо из-за ошибки инерционного измерительного блока, либо из-за неисправного датчика положения. Эта неоднозначность затрудняет точное определение источника отказа и может ввести в заблуждение предыдущие, основанные на состоянии, методы прямой индикации неисправности, выполняющие неправильную изоляцию в некоторых представляющих интерес сценариях отказа датчика. В последнее время в углубленных исследованиях учитывались прямые индикации неисправности сенсорного оборудования путем диагностики дрейфа и аномального шума показаний сенсора [10]. Эти подходы, основанные на обработке сигналов, обычно требуют определенной модели измерений датчика, такой как функция корреляции или частотный спектр, чтобы помочь в оценке и обнаружении неисправностей. Такими методами сложно охватить произвольные условия и сценарии полета.

Для восстановления после сбоев резервирование ранее считалось адекватной стратегией борьбы с выходом из строя датчиков. Однако резервных датчиков недостаточно, когда транспортное средство сталкивается с некоторыми атаками на общие физические уязвимости

микроэлектро-механических систем инерционных измерительных блоков, поскольку избыточные инерционные датчики будут подвергаться тем же пагубным последствиям резонанса от внешнего возбуждения. Каждый отдельный ИИБ может выйти из строя из-за акустической атаки, использующей их резонансные частоты. Еще одним потенциальным решением этой проблемы могло бы стать добавление различных типов резервных датчиков с существенно разными физическими характеристиками. Однако, учитывая ограничения по размеру, весу и мощности БЛА и ограничения использования добавленных датчиков, такие как условия освещенности для визуальных датчиков, реализация этих альтернатив может по-прежнему показывать ограниченную производительность.

Сложившиеся недостатки и уязвимости систем управления микролетными летательными аппаратами предьявляют тренд на создание систем, имеющих большие показатели качества, а также защищенности от взлома. Важность данных разработок состоит в том, что в современном мире, область применения беспилотных летательных аппаратов выходит за границы их использования в военных целях, когда речь идет о конкретных опасностях для жизни и здоровья граждан во время военных операций. В настоящее время, в связи с эпидемиологической ситуацией в мире, все чаще можно увидеть на улицах мегаполисов тесты систем доставки с использованием беспилотных летательных аппаратов. Во многих городах Запада эта система начала набирать популярность, но вопрос безопасности таких систем до сих пор остается открытым, из-за того, что пути следований беспилотных летательных аппаратов в городской местности проходят непосредственно над головами жителей города. В ходе выхода из строя систем управления аппарат весом в среднем 500 граммов (без груза) несет огромную опасность для жизни людей и сохранения в целостности их имущества.

Литература:

1. T. Tomic, K. Schmid, P. Lutz, A. Domel, M. Kassecker, E. Mair, I. L. Grixa, F. Ruess, M. Suppa, and D. Burschka Toward a fully autonomous uav: Research platform for indoor and outdoor urban search and rescue // IEEE robotics & automation magazine. – 2012. – Vol. 19, N. 3. – P. 46–56.
2. R. Mahony, V. Kumar, and P. Corke Multirotor aerial vehicles: Modeling, estimation, and control of quadrotor // IEEE robotics & automation magazine. – 2012. – Vol. 19, N. 3, P. 20–32.
3. J. Zhang and S. Singh Loam: Lidar odometry and mapping in realtime in Robotics // Science and Systems. – 2014. – Vol. 2, P. 9.

4. J. Svacha, K. Mohta, M. Watterson, G. Loianno, and V. Kumar Inertial velocity and attitude estimation for quadrotors // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2018, P. 1–9.
5. A. Kim, B. Wampler, J. Goppert, I. Hwang, and H. Aldridge Cyber attack vulnerabilities analysis for unmanned aerial vehicles// Infotech@ Aerospace 2012, 2012, p. 2438.
6. A. Y. Javaid, W. Sun, V. K. Devabhaktuni, and M. Alam Cyber security threat analysis and modeling of an unmanned aerial vehicle system// Homeland Security (HST), 2012 IEEE Conference on Technologies for. IEEE, 2012, P. 585–590.
7. Y. M. Son, H. C. Shin, D. K. Kim, Y. S. Park, J. H. Noh, K. B. Choi, J. W. Choi, and Y. D. Kim Rocking drones with intentional sound noise on gyroscopic sensors// 24th USENIX Security symposium. USENIX Association, 2015.
8. T. Trippel, O. Weisse, W. Xu, P. Honeyman, and K. Fu Walnut: Waging doubt on the integrity of mems accelerometers with acoustic injection attacks // IEEE European Symposium on Security and Privacy (EuroS&P). IEEE, 2017, P. 3–18.
9. Z. Tu, F. Fei, M. Eagon, D. Xu, X. Flight recovery of MAVs with compromised IMU// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 3-8 nov.2019: Proceedings. – Macao, 2019.
10. M. Blanke, M. Kinnaert, J. Lunze, M. Staroswiecki, and J. Schröder Diagnosis and fault-tolerant control // Springer, 2006, vol. 2.

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К УВЕЛИЧЕНИЮ ЗАПАСА ХОДА АВТОНОМНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

А.А. Красносельский, В.И. Аниброев, Н.С. Попов
Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, 1206543@gmail.com
Научный руководитель: Аносов В.Н., д.т.н., профессор

Ведущие автомобильные концерны озвучивают перспективы полного перехода на производство транспортных средств на электрической тяге. Многие из них уже представили первые электромобили собственного производства. Однако, одним из главных факторов, тормозящих переход от транспорта с двигателем внутреннего сгорания на транспорт с электрическим двигателем – относительно низкий запас автономного хода. Этой проблеме посвящены многие

научные труды современных ученых, в которых рассматриваются различные методы решения этой проблемы.

Leading automotive concerns are voicing the prospects for a complete transition to the production of electric vehicles. Many of them have already presented the first electric cars of their own production. However, one of the main factors hindering the transition from transport with an internal combustion engine to transport with an electric motor is a relatively low autonomous power reserve. Many scientific works of modern scientists are devoted to this problem, in which various methods of solving this problem are considered.

Вопрос повышения энергоэффективности является объемной задачей, поскольку современные электрические транспортные средства – это сложная техническая система. При рассмотрении вопросов повышения энергоэффективности нельзя рассматривать отдельную подсистему и ее внутренние процессы. Необходимо учитывать влияние подсистем друг на друга и функционирование всей системы в целом[1].

Анализ литературы показывает, что существуют различные подходы к решению этой проблемы. Это и внедрение различного рода накопителей энергии, реализация гибридных энергоустановок, сочетающих в себе несколько различных источников энергии, а также реализация современных систем управления электрическим тяговым приводом постоянного и переменного тока.

Стоит отметить, что подавляющее большинство авторов рассматривают именно внедрение современных накопительных элементов для решения проблемы энергоэффективности автономного электрического транспортного средства. Некоторые из авторов решают эту проблему путем внедрения дополнительных тяговых источников тока, что увеличивает общую емкость тяговой аккумуляторной системы, но и, в свою очередь, приводит к увеличению массы транспортного средства. Другие авторы исследуют различные химические источники тока с целью поиска источника тока с наилучшими удельными характеристиками. Также, стоит отметить, что ведутся активные разработки по совершенствованию аккумуляторных батарей, которые в дальнейшем будут внедряться в тяговую систему автономных транспортных средств.

Другим подходом к решению проблемы является интегрирование различного рода источников энергии в тяговую систему электрического транспорта[2]. Так, одним из вариантов такого решения является установка солнечной батареи в качестве дополнительного источника энергии. Однако, внедрение дополнительных источников энергии

требует индивидуального подхода и никогда не будет являться универсальным решением.

Применение интеллектуальных адаптивных систем управления автономным электрическим транспортным средством также является одним из способов решения задачи по повышению энергоэффективности.

Одними из интеллектуальных адаптивных систем управления являются искусственные нейронные связи. Нейронные сети обладают способностью к самообучению, что позволяет приблизиться к наиболее энергоэффективным показателям качества [3]. Такой подход управления имеет быструю адаптацию, что, при управлении тяговым электроприводом, позволяет подобрать оптимальные параметры движения транспорта. Другими словами, такой способ управления может увеличить запас хода автономного транспортного средства.

Таким образом, было рассмотрено несколько различных подходов по решению проблемы по увеличению запаса хода автономных транспортных средств на электрической тяге. Стоит отметить, что комбинация нескольких таких подходов также может привести к повышению энергоэффективности транспортного средства. Но необходимо учитывать тот факт, что это может привести к значительному удорожанию электротранспорта.

Литература:

1. Аносов В. Н. Повышение эффективности систем тягового электропривода автономных транспортных средств : монография / В. Н. Аносов, В. М. Кавешников. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2014. – 218 с.
2. Сидоров К.М. Комбинированные энергетические установки в системе автономного электроснабжения / К.М. Сидоров, В.Е. Ютт, Т.В. Голубчик // Вестник МАДИ. – 2013. – №4. – С. 37-44.
3. Галушкин А.И. Нейронные сети: основы теории. / А.И. Галушкин. – М.: РиС, 2014. - 496 с.

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ УСИЛИТЕЛИ РУЛЯ С ЗАМКНУТЫМ КОНТУРОМ РЕГУЛИРОВАНИЯ МОМЕНТА

А.Г. Кузьмичева

Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, arinochka.ku@gmail.com

Научный руководитель: Боченков Б.М., к.т.н, доцент

В современном мире сложно представить человека, у которого не было своего автомобиля, ведь он является средством передвижения и постоянным помощником человека. Во многих больших городах России, можно встретить огромный транспортный поток на дорогах, и, следовательно, увеличены и количества аварий. Поэтому один из факторов безопасного вождения это вспомогательные системы в автомобиле. Одним из разрабатываемых видов таких систем является усилитель рулевого управления. Усилитель рулевого управления – электромеханическая система автомобиля, которая предназначена для снятия усилия, которое прикладывается к рулевому колесу, чтобы облегчить управление автотранспортом.

In the modern world, it is difficult to imagine a person who did not have his own car, because he is a means of transportation and a constant helper of a person. In many large cities of Russia, you can find a huge traffic flow on the roads, and, consequently, the number of accidents is also increased. Therefore, one of the factors for safe driving is the assistive systems in the car. One of the developed types of such systems is the power steering. Power steering is an electromechanical system in a car that is designed to remove the force that is applied to the steering wheel in order to facilitate driving.

Одним из возможных способов создания гидроусилителя рулевого управления является электропривод редуктора, этот способ стал уже классическим. Небольшой высокоскоростной мотор и коробка передач используются для создания еще одного момента на рулевой колонке. Редукционная версия электромеханического усилителя руля (ЭМУР) для обеспечения ее функциональности требует реализации так называемого режима «самовозврата».

В настоящее время режим «самовозврата» различных производителей реализуется путем организации системы управления без обратной связи, то есть крутящий момент на выходном валу не поддается измерению и не может регулироваться. Это вызывает много проблем, таких как: возникновение статических ошибок; возникновение низкочастотных пульсаций момента, обусловленных характеристиками

электродвигателя; отсутствие «ощущения на дороге» у водителя из-за наличия сил трения механизма трансмиссии.

Крутящий момент на выходном валу рулевой колонки ЭМУР определяется следующим выражением:

$$M_k = \lambda \cdot M_{pk} \quad (1)$$

где M_k - крутящий момент на выходном валу рулевой колонки, действующий на руль, Н · м; M_{pk} - момент на рулевом колесе водителя, Н · м; λ - усиление.

Крутящий момент, измеренный M_{pk} , используется для обеспечения этого режима. Значение этого момента поступает в систему управления, на выходе которой этот момент усиливается коэффициентом λ .

В мировой практике существует несколько основных концепций построения ЭМУР: безредукторный тип, шестереночный тип и колоночный тип.

Каждый из этих типов имеет свои преимущества и недостатки и используется в разных транспортных средствах.

Колоночный тип ЭМУР - это система управления, в которой электродвигатель передает дополнительную силу на рулевую стойку. Он имеет две версии: с двумя передачами и с параллельным приводом (рисунок 1).

Один из возможных вариантов построения системы типа «колоночного» - это уже классическая коробка передач. Высокоскоростной двигатель и коробка передач используются для создания еще одного момента на рулевой колонке. Совместная разработка Авто ВАЗа с ОАО «Авиа агрегат» и ООО «АЭС Эметрон» привела к установке электромеханического усилителя руля в семействе Лада Калина. [1]



Рис. 1 - Схема рулевого управления редукторного ЭМУР колоночного типа

Второй вариант конструкции колонного типа ЭМУР - это использование электропривода без зубчатых колес. Безредукторный ЭМУР состоит их мехатронного блока на основе синхронного двигателя с возбуждением от постоянных высокоэнергетических магнитов.[2] Внутри этого ЭМУР расположена измерительная система (рисунок 2).



Рис. 2 - Безредукторный ЭМУР колонного типа, выпускаемый АО «Автоэлектроника» (г. Калуга)

Подводя итоги проведенного анализа можно утверждать, что введение в рулевое управление усилителя *задействовано* для снижения энергетических затрат водителя и, в последствии, повышение комфортного управления водителем своего автомобиля, а также снижение времени реакции и повышение безопасности.

Датчики крутящего момента (ДКМ) используются для преобразования крутящих моментов, действующих на рабочие валы машин, в электрические сигналы.

В зависимости от типа чувствительного элемента, ДКМ может быть тензометрическими, оптическими, магнитоупругими, индуктивными и постоянными магнитными датчиками.

В оптических индуктивных датчиках и датчиках с постоянными магнитами основным элементом является относительно жесткий торсионный вал, что приводит к разрыву силовой цепи рабочего вала. Цель датчиков в измерении угла кручения этого торсиона.

Корпус датчика крутящего момента (рисунок 3) прикреплен к корпусу электромеханического усилителя руля и остается неподвижным относительно вала рулевого колеса и вала ротора двигателя. В корпусе образованы две канавки, в которые встроены катушки датчика крутящего моментально

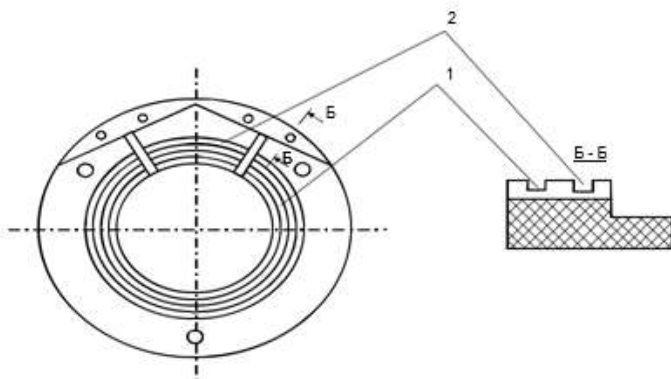


Рис. 3. - корпус датчика крутящего момента:
 1 – паз для первой катушки; 2 – паз для второй катушки

Когда ток протекает через катушки, они создают магнитное поле, которое проникает в два отверстия, одно из которых установлено на валу рулевого колеса, а другое связано с ротором двигателя. [3]

Проблема измерения крутящего момента, действующего на рулевое колесо без прерывания кинематической цепи силы, может быть решена с помощью магнитоупругих преобразователей- датчиков крутящего момента (ДКМ).

Магнитоупругие датчики являются одними из новых типов тензодатчиков, чьи интенсивные исследования в последнее время широко проводятся. В отличие от других типов датчиков магнитоупругие обладают высокочувствительностью, а также элементарной и надежной конструкцией. Новая особенность магнитоупругих датчиков и их преимущество заключается в возможности бесконтактного измерения механического напряжения движущихся частей без снижения их жесткости.

Примером является датчик, в котором кольцевые полюса магнитных систем, снабженные обмотками, расположены вокруг вращающегося рабочего стального вала. Ток поля генерирует переменное магнитное поле на поверхности вала, которое симметрично размещается между полюсами N и S, когда вал не нагружен (рис. 1.4), а выходное напряжение датчика равно нулю.

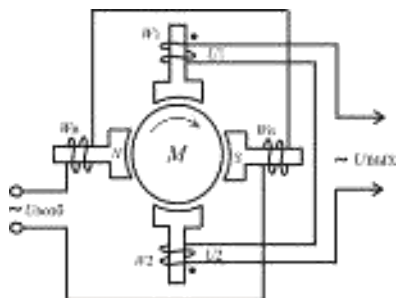


Рис. 4 – Магнитоупругий преобразователь момента:
 W_B – обмотка возбуждения (первичная обмотка);
 W_1, W_2 – измерительные обмотки (вторичные обмотки)

Вторичные обмотки W_1 и W_2 сдвинуты на 90° относительно полюсов обмотки возбуждения и соединены встречно.

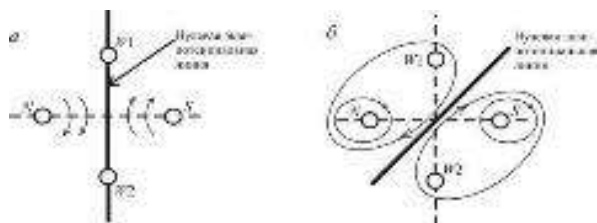


Рис. 5 – Магнитное поле на поверхности вала:
 а – симметричное при ненагруженном валу ($M = 0$);
 б – несимметричное (деформированное) при нагрузке вала некоторым моментом

При нагрузке вала изменяется магнитная проницаемость, магнитное поле деформируется, нулевая эквипотенциальная линия отклоняется от соосного с обмотками W_1, W_2 положения пропорционально величине и знаку момента (рисунок 1.5, б). Под действием разности магнитных потенциалов во вторичных обмотках W_1, W_2 возбуждаются разные по величине напряжения – на выходе датчика появляется напряжение $U_{вых} = U_1 - U_2$, пропорциональное измеряемому моменту.

Несмотря на преимущества такого магнитоупругого датчика, его использование ограничено, поскольку одним из основных условий использования датчика является ферромагнитный состав вала. Конструкция датчика представлена на рисунке 1.6.

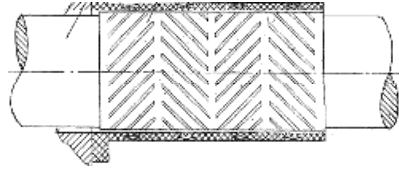


Рис. 6 – Магнитоупругий датчик с ферромагнитной пленкой:
 1 – вал рулевой колонки, 2 – магнитоупругий материал,
 3 – катушки индуктивности

Описанный магнитоупругий датчик момента, был разработан и испытан на кафедре «Электропривода» Новосибирского государственного технического университета. [4] Опытный образец представлен на рисунке 1.7. Блок-схема измерительного устройства датчика, приведенная на рисунке 1.8.



Рис. 1.7 – Внешний вид датчика момента с ферромагнитной пленкой

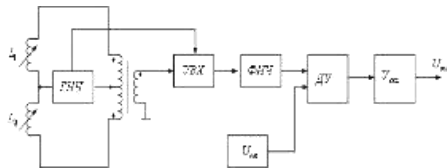


Рис. 1.8. - блок-схема датчика момента

Литература:

1. Тюрин М.В. Разработка и исследование алгоритмов управления электромеханическим усилителем руля / Б.М. Боченков, М.В. Тюрин// Электроприводы переменного тока: Материалы международной научно-технической конференции, Екатеринбург: УГТУ, 2005. С. 215-219.

2. Свидетельство на полезную модель 15325 Рос. Федерация, МПК В 62 D 5/04. Электромеханический усилитель руля автомобиля./Болоян Н.А., Боченков Б.М., Деряжный И.Е. и др.; заявитель и обладатель ООО «НИИ Автоматики и силовой электроники». - № 2000109037/20; заявл. 11.04.00;

опубл 10.10.00, Бюл. № 28.

3. Боченков Б.М. Бесконтактные двухзонные электроприводы с синхронными двигателями магнитоэлектрического возбуждения для металлорежущих станков: Диссертация канд. техн. наук: 05.09.03 / Боченков Борис Михайлович - Новосибирск, 1988 г. -177 с.

4. Электромеханический усилитель рулевого управления с приводом, параллельным оси рулевой рейки : программа самообучения . – Вольфсбург :Wolkswagen Brieffach, 1995. – 40с.

ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ МОТОР-КОЛЕС В ТЯГОВОЙ СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ

Н.Ю. Ляпин, Н.С. Попов, В.И. Аниброев
Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, lnikita154@mail.ru
Научный руководитель: Симаков Г.М., д.т.н., профессор

Современные производители автономных транспортных средств на электрической тяге все чаще отходят от классической схемы компоновки тяговой системы, избавляясь от механических компонентов в трансмиссии, что, в свою очередь, влечет за собой улучшение массогабаритных показателей таких систем. В качестве решения предлагается применение технологии мотор-колес, что позволяет исключить механический редуктор из тяговой системы электрического транспортного средства. Несмотря на то, что сама технология мотор-колес известна давно, на сегодняшний день нет серийного производства таких устройств.

Modern manufacturers of autonomous vehicles with electric traction are increasingly moving away from the classical layout of the traction system, getting rid of mechanical components in the transmission, which, in turn, entails an improvement in the weight and size indicators of such systems. As a solution, the use of motor-wheel technology is proposed, which makes it possible to exclude a mechanical gearbox from the traction system of an electric vehicle. Despite the fact that the motor-wheel technology itself has been known for a long time, today there is no mass production of such devices.

По конструкции мотор-колеса делятся на два основных типа: редукторные мотор-колеса и мотор-колеса с прямым приводом. Из их названия понятно, что основным отличием является технология передачи крутящего момента. У мотор-колес с прямым приводом отсутствует ряд промежуточных деталей, статор крепится непосредственно к оси, а ротор

соединен с крышкой, посредством которой передается момент на колесо [1].

Основные комплектующие системы мотор-колеса, которая включает в себя электрический двигатель, электромагнитный тормозной суппорт, активную подвеску, пружину подвески, тормозной диск и электрический двигатель активной подвески, представлены на рисунке 1.



Рис. 1 – конструкция мотор-колеса

При использовании технологии мотор-колес в тяговой системе автономных транспортных средств появляется ряд преимуществ, по сравнению с классическими вариантами компоновки. Вариант с подключением электродвигателя непосредственно к колесу упрощает конструкцию трансмиссии, так как отпадает необходимость в сцеплении, коробке переключения передач, приводных валах, а также дифференциалах, что существенно снижает вес транспортного средства [2]. Повышается надежность полученной системы за счет упрощения конструкции. Реализация оптимальной системы управления всеми двигателями одновременно позволит повысить энергоэффективность установки. В случае с электрокарами и погрузчиками, где целесообразно применение четырех мотор-колес, такое решение имеет дополнительное преимущество в виде маневренности и мобильности в ограниченных масштабах помещений закрытого типа. Управляемые мотор-колеса могут вращаться с разной скоростью и в разных направлениях, это позволяет разворачиваться на 360 градусов, парковаться в ограниченном пространстве. Еще одним важным преимуществом является простота важнейшей для автономного электрического транспорта системы рекуперации энергии торможения в накопительные устройства [3].

Однако, такие системы имеют и недостатки. Одним из них является сложность конструкции. Это вызвано тем, что большое количество механизмов необходимо разместить внутри обода колеса, имеющего стандартные размеры. Также, недостатком является большая

неподдрессоренная масса, которая повышает износ подвески и передает на кузов больше вибраций.

На сегодняшний день мотор-колеса нашли свое применение в двух областях: легкая техника (например, велосипеды и скутеры) и тяжелая (например, карьерная и спецтехника). В этих случаях минимизируются недостатки такого технического решения, и на первый план выходят преимущества. Безредукторные мотор-колеса успешно прошли испытания на городском транспорте, а именно на автобусах, и доказали экономическую эффективность такого решения, но начальная стоимость пока не дает выйти на массовый рынок.

Литература:

1. Бекишев Р.Ф., Электропривод. – М.: Юрайт, 2016. – 302 с.
2. Кашкаров А.П., Современные электромобили. Устройство, отличия и выбор для российских дорог. – М.: “ДМК-Пресс”, 2018. – 92 с.
3. Баранцев И.А., Электромобиль 130 лет истории. – М: “Русские витязи”, 2019. – 312 с.

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ГАЗОКОМПРЕССОРНОЙ СТАНЦИЕЙ

П.Н. Манякова

**Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, koteulfud@gmail.com**

Научный руководитель: Кучер Е.С., к.т.н., доцент

В данной научной работе рассмотрена структура и назначение газокompрессорной станции, описаны их виды и процесс работы по двум технологическим схемам обвязки - с последовательной и параллельной типами обвязки газоперекачивающих агрегатов. Рассмотрен основной элемент газокompрессорной станции – газоперекачивающий агрегат, и описано назначение каждой его составляющей – центробежного компрессора и привода. Приведены основные технологические требования к газокompрессорной станции, газоперекачивающему агрегату, центробежному нагнетателю и электроприводу.

The paper is described structure and functions of natural gas compressor stations, the main compressor stations types and its working process by two technological piperwork hookups, one of them is with a successive hookup of gas compressor units, another is with parallel hookup of gas compressor units.

Also, the paper is studied the main element of natural gas compressor station, which is gas compressor unit. All of the components of compressor unit (radial-flow compressor and drive unit) are described. The main technological requirements are written.

Газ, двигаясь по газопроводу, теряет давление, что приводит к уменьшению пропускной способности трубопровода и снижению температуры газа. Для повышения давления газа через одинаковые промежутки на трассе газопровода устанавливают компрессорные станции (КС).

На газопроводе располагают следующие виды КС [1]:

1. головные КС, куда газ поступает после месторождения;
2. линейные КС, которые устанавливаются друг от друга на расстоянии 100-150 км на трассе газопровода;
3. дожимные КС, которые устанавливаются на подземных хранилищах газа;
4. газораспределительные КС, которые устанавливают около потребителей газа.

На КС предполагает технологическая обвязка оборудования, которая позволяет принимать на КС газ из трубопровода, очищать газ от примесей и влаги в специальном оборудовании (пеллуловители, сепараторы), распределять потоки газа для сжатия и регулировать схемой загрузки газоперекачивающего агрегата (ГПА), охлаждать газ после компримирования, подавать газ в трубопровод для дальнейшей транспортировки, при необходимости сбрасывать газ в атмосферу из всех трубопроводов КС через свечные краны; а также проводить газ по транзитному трубопроводу, минуя КС.

В настоящее время существуют следующие схемы принципиальных обвязок ГПА:

1. С последовательной обвязкой ГПА, которая характерна для неполнонапорных нагнетателей для обеспечения степени сжатия газа, равной 1,45 и больше. Схема позволяет осуществить работу от одного до трех последовательно работающих ГПА.

2. С параллельной коллекторной обвязкой ГПА, которая характерна для полнонапорных нагнетателей для обеспечения степени сжатия газа до 1,45. Схема обеспечивает только параллельную работу нескольких работающих ГПА.

Схема КС с последовательной обвязкой сложнее в управлении из-за большого числа запорной арматуры, также она не позволяет использовать в работе любые ГПА (работа КС возможна только при всех

работающих ГПА в обвязке). Также при такой схеме присутствуют потери газа из-за возможной негерметичности «режимных» клапанов [2].

Непосредственное компримирование газа для его последующей транспортировки по магистральному газопроводу происходит в ГПА, который включает в себя центробежный нагнетатель (компрессор) и его привод. Также в состав ГПА входят системы контроля, управления, защиты, системы масло-связки, масло-уплотнителя; система электросилового питания.

В качестве привода в ГПА может использоваться газотурбинный двигатель или электродвигатель синхронный или асинхронный (ЭД). Газотурбинный двигатель позволяет регулировать частоту вращения компрессора и таким образом, изменять режим работы ГПА, но по сравнению с ЭД он сложнее в управлении и контроле с точки зрения автоматизации из-за его динамичности.

Асинхронный ЭД обеспечивает высокую надежность, высокие энергетические и регулировочные характеристики, минимальные затраты на ремонт, экологическую чистоту, пожаровзрывобезопасность и простоту автоматизации и управления ротором двигателя.

К минусам электрических ГПА (ЭГПА) можно отнести рост электроэнергии, который влечет за собой рост эксплуатационных затрат.

Обвязка ГПА зависит от типа нагнетателя, а количество ГПА – от их мощности, требуемой степени сжатия газа и производительности газопровода.

В составе ГПА для привода компрессора, применяют синхронные и асинхронные ЭД мощностью 4000-12500 кВт. Чаще всего применяются синхронные и асинхронные ЭД типа СТД-4000-2, СТД-12500-2 и АЗ-4500-1500.

В данной работе будет рассматриваться именно АД из-за простоты конструкции, низкой ценовой категории и малых затрат на эксплуатацию.

ЭД должен быть снабжен аппаратной защитой, обеспечивать термодинамическое равновесие во время срабатывания защитных аппаратов. При возникновении аварийной ситуации, необходимо предусматривать экстренное торможение ЭД. Климатическое исполнение ЭД должно соответствовать ГОСТу 15150-69. [3]

Основные параметры компрессора определяются по ГОСТ 23194-83. [4]

Расчетное давление ГПА: 5,5 – 7,45 – 8,3 МПа для ЛКС и 1,2 – 0,6 – 0,3 МПа для ГРС.

Конструкция компрессора не должна допускать попадания газа в машинный зал.

Рабочий диапазон регулирования частотой вращения ротора компрессора (70-105)% от номинальной частоты вращения ротора.

Конструкция ГПА должна обеспечивать удобство ремонта.

Система управления АД должна обеспечивать регулирование частотой вращения ГПА, газоподачи или давления на выходе (при необходимости).

На КС необходимо присутствие запорной арматуры с возможностью как дистанционного, так и ручного управления для экстренного отключения КС при аварийных ситуациях, или для проведения очистных или других технологических работ в трубопроводах. Также на нагнетательных шлейфах необходимо устанавливать обратные клапана для предотвращения обратного потока газа из газопровода. Необходимо присутствие продувочных свечей для принудительного аварийного сброса газ в атмосферу из обвязки КС. В случае аварийной ситуации необходимо дублирование команды на экстренную остановку КС.

Требования к пожарной безопасности должны соответствовать ГОСТу 12.1.004-91 [5].

В дальнейшем в работе планируется осуществить выбор АД в соответствии с техническими требованиями, рассчитать его параметры для составления математического описания и структурной схемы объекта управления для итогового моделирования в среде Матлаб. По полученным переходным процессам планируется создать алгоритм системы управления АД для эффективного управления работой ЭГПА.

Литература:

1. Проектирование и эксплуатация насосных и компрессорных станций: Учебник для вузов / А.М. Шаммазов, В.Н. Александров, А.И. Гольянов [и др.] – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2003. – 404 с.

2. Газоперекачивающие агрегаты магистральных газопроводов: учебное пособие / М.Б.Хадиев. Казан. гос. технол. ун-т. Казань, 2004.– 318 с.

3. ГОСТ 15150-69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды: утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 29.12.69 №1394.

4. ГОСТ 23194-83. Нагнетатели центробежные для транспортирования природного газа. Основные параметры: утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 24 августа 1983 г. №3967.

5. ГОСТ 12.1.004-91. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования: утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по управлению качеством продукции и стандартам от 14.06.91 №875.

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА НА ОСНОВЕ АСИНХОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

М.А. Михайлович, Е.В. Бейерлейн
Северский технологический институт НИЯУ МИФИ,
г. Северск, garirok2008ya@gmail.com
Научный руководитель: Бейерлейн Е.В., к.т.н., доцент

В данной работе рассмотрен вопрос энергосбережения в насосных агрегатах на основе асинхронного электродвигателя при использовании регулируемого электропривода. В статье приведен расчет технико-экономических параметров насоса и электродвигателя, на основании которых можно сказать о эффективности и перспективе использования частотно-регулируемого электропривода в насосных агрегатах.

In this paper, the process of energy saving in pump units based on an induction motor using an adjustable frequency converter is considered. The article presents a calculation of the technical and economic parameters of the pump and motor, on the basis of which we can say about the efficiency and prospects of using a frequency-controlled electric drive in pump units.

Насосные установки являются неотъемлемой частью народного хозяйства. Ежегодно насосные установки потребляют около 20% всего запаса электроэнергии из единой энергосистемы. И в большинстве случаев на этих установках в результате неэкономичной работы электропривода и насоса происходят большие потери электроэнергии в диапазоне от 5 до 20% [3]. Поэтому в наше время всё чаще возникают задачи, связанные с снижением потерь электроэнергии на насосных установках. Основным источником этих потерь является асинхронный электродвигатель (АД), непосредственно управляющий частотой вращения рабочего колеса насоса. Для снижения потерь электроэнергии посредством манипуляции над АД применяются следующие методы снижения потерь [1]: увеличение активных материалов в статоре и роторе

электродвигателя; внесение изменений в геометрию статора и ротора электродвигателя; использование частотного преобразователя.

Для данного расчета был выбран насос марки K160/20, в составе данного насоса используется электродвигатель 4A132M4У3 мощностью $P_n = 11$ кВт.

Для получения реальных эксплуатационных характеристик турбомеханизма необходим совместный анализ характеристик насоса и трубопровода. Характеристика трубопровода с постоянными параметрами рассчитывается следующим образом [1]:

$$H = H_{CT} + RQ^2 \quad (1)$$

где H_{CT} - статический напор, необходимый для поднятия жидкости на определенный уровень; R - коэффициент сопротивления сети; Q - производительность насоса.

Характеристика насоса может быть посчитана исходя из каталожных данных. Изменения частоты рабочего колеса насоса ведет к изменению всех его рабочих параметров. Перерасчет характеристик насоса при различных частотах ведется при помощи формул подобия:

$$\frac{H_{ном}}{H_{вар}} = \left(\frac{n_{ном}}{n_{вар}} \right)^2; \quad \frac{Q_{ном}}{Q_{вар}} = \frac{n_{ном}}{n_{вар}} \quad (2)$$

где $H_{ном}, H_{вар}$ - номинальный и переменный напор насоса; $n_{ном}, n_{вар}$ - номинальная и переменная частота вращения; $Q_{ном}, Q_{вар}$ - номинальная и переменная производительность насоса.

Из построенных зависимостей $H = f(Q)$ видны пересечения точек для каждой из характеристик (рис. 1). Их пересечения называют рабочими точками насоса, которые соответствуют номинальной производительности насоса. Далее пересчитывается мощность насоса для каждой рабочей точки по формуле:

$$N = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{\eta_H} \quad (3)$$

где N - мощность насоса; ρ - плотность жидкости; g - ускорение свободного падения; η_H - коэффициент полезного действия насоса.

Для совместной работы насоса и электродвигателя требуется знать механические характеристики самого АД при различных законах регулирования частоты вращения ротора, а также характеристику насоса [4]. Момент на валу рабочего колеса насоса можно рассчитать по следующей формуле:

$$M_H = 9,55 \cdot \frac{N}{n} \quad (4)$$

где M_H - момент насоса.

После получения механических моментов на валу насоса для его рабочих точек, строится зависимость $M_H = f(n)$.

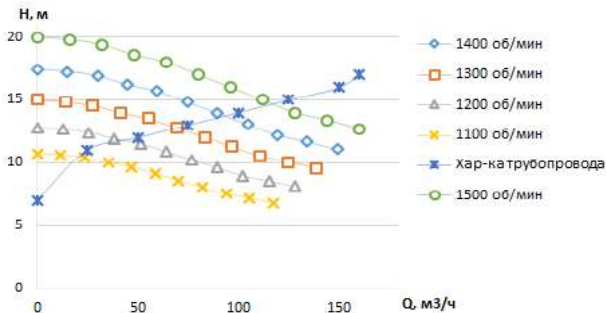


Рис. 1 – характеристики насосного агрегата К160/20 и трубопровода при регулировании частоты вращения

Имея данные о работе насосного агрегата при различных частотах вращения турбомеханизма и непосредственно механической характеристики насоса, можно узнать какую мощность потребляет асинхронный двигатель при разных частотах вращения.

Для этого необходимо построить совместный график механических характеристик насоса и АД при разных частотах вращения (рис. 2).

Пересечения этих характеристик дают значения моментов при которых работает АД на какой-либо частоте вращения. Зная это, можно пересчитать значение полезной мощности на валу АД при определенных частотах вращения (таблица 1):

Таблица 1 – Полезная мощность на валу двигателя при разных частотах вращения

n_{var} , об/мин	1092,24	1199,88	1285,83	1382,29
P_{var} , кВт	0,8885	1,456	3,681	5,1447

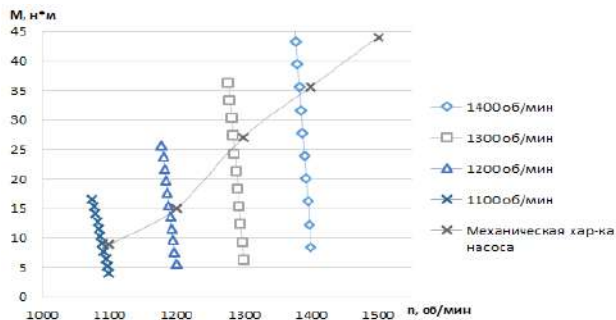


Рис. 2 – совместная работа насосного агрегата и АД при разных частотах вращения

Теперь на данном этапе можно рассчитать экономический эффект от использования частотно-регулируемого электропривода. Для этого взят реальный график суточного водопотребления жилого дома (рис. 3).

По этому графику можно рассчитать потребление мощности электродвигателем за сутки без регулирования $W_{БР} = 264 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ и с регулированием $W_{СР} = 141,06 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$.

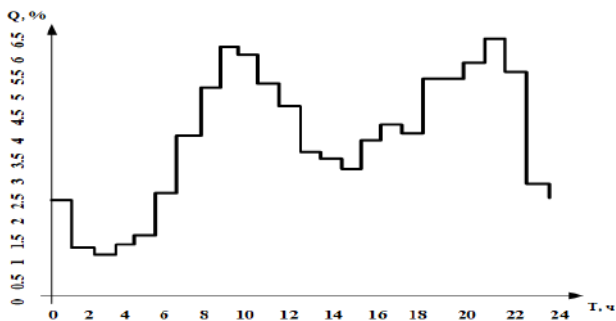


Рис. 3 – график суточного водопотребления жилым домом

Для оценки экономичности использования частотно-регулируемых АД рассчитаем стоимость электроэнергии за год эксплуатации $C_{Э(БР)} = 370986 \text{ руб}$ и $C_{Э(СР)} = 198491,56 \text{ руб}$. А процент экономии электроэнергии составил $\mathcal{E}_{\%} = 46,5\%$ [2]. Также можно рассчитать окупаемость данной системы при использовании преобразователей

частоты, она составила $T_{OK} = 0,63$, то есть срок окупаемости данной системы не превышает одного года.

Таким образом можно сказать, использование частотных преобразователей в электроприводе на базе АД, является перспективной задачей развития энергосберегающих технологий в нашей стране, это поможет сэкономить большое количество электроэнергии, а также продлить продолжительность работы асинхронных электродвигателей.

Литература:

1. Лезнов Б.С. Энергосбережение и регулируемый электропривод в насосных установках. М.: Энергоатомиздат, 2006. 360 с;
2. Лезнов Б.С. Экономия электроэнергии в насосных установках. М.: Энергоатомиздат, 1991. 144 с;
3. Онищенко Г.Б. Электропривод турбомеханизмов. М.: Энергоатомиздат, 1972. 240 с;
4. Тютеева П.В., Бейерлейн Е.В., Работа модернизированных асинхронных двигателей в составе регулируемого электропривода турбомеханизмов // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2015. №1-2.

ВЫРАБОТКА ТРЕБОВАНИЙ К ЭЛЕКТРОПРИВОДУ ДЛЯ КАТКА-УПЛОТНИТЕЛЯ СЫПУЧИХ ГРУЗОВ

Р.А. Овчинников

Сибирский государственный университет путей сообщения,

г. Новосибирск, roma.r1999@mail.ru

Научный руководитель: Желдак К.В., к.т.н., доцент

Статья посвящена рассмотрению вопросов определения допустимых параметров электропривода катков-уплотнителей сыпучих грузов применительно к сложившимся на сегодняшний день условиям перевозки угля: внедрение инновационного подвижного состава, расширение ассортимента марок и фракций перевозимого угля, имеющего различные физико-механические свойства (объемную плотность, уплотняемость и др.). Полученные результаты позволяют определить требуемые параметры электропривода катка-уплотнителя.

The article is aimed to consider issues of estimation of valid parameters of electric drive of a roller-compactor of bulky goods due to today's coal transportation conditions, such as implementation of innovative rolling stock,

widening of marks and fractions coal assortment (bulk density, compressibility, etc.). The result of the study provide an opportunity to determine required parameters of a roller-compactor electric driver.

Уплотнение сыпучих грузов, в частности, угля, является ключевым мероприятием в повышении не только эффективности использования грузоподъемности открытого подвижного состава (далее ОПС), но и экологичности перевозок угля, так как выдуваемые его мелкие частицы оседают на почве, балласте, что негативно сказывается как на здоровье населения, так и на безопасности движения поездов (нарушается нормальная работа путевых устройств автоматики и телемеханики).

Актуальность проблемы потерь сыпучих грузов при перевозке обусловила наличие развитой исследовательской базы по проектированию и изготовлению катков-уплотнителей угля, предназначенных для разравнивания и уплотнения сыпучих грузов для снижения аэродинамического сопротивления вагона с грузом, что является объектом данного исследования. Наиболее известна конструкция установки статического действия разработки НИИЖТ (рис. 1), представляющая собой рабочий орган (каток-уплотнитель) 1, четыре стоечные опоры, соединенные по типу порталов 3, подъемный механизм (электропривод) 4, стопорное устройство 2 и электрическую систему дистанционного управления [1]. В нерабочем положении рабочий орган автоматически фиксируется специальными замками, установленными на задней раме. Открытие замков для опускания катка осуществляется при помощи ручной лебедки.

Кроме того, сегодня грузоотправителям предлагаются различные конструкции катков-уплотнителей от предприятий по изготовлению погрузочно-разгрузочного оборудования.

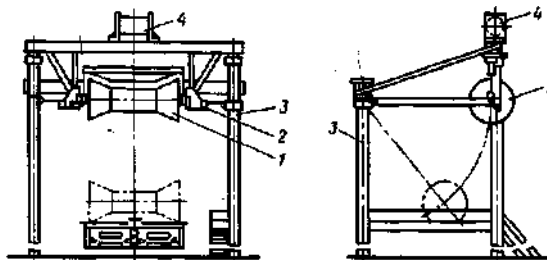


Рис.1 – Конструкция установки статического действия НИИЖТ

Например, Поволжский Завод Промышленного Оборудования предлагает конструкцию катка-уплотнителя сыпучих грузов,

размещаемого на отдельной порталной раме, где также предусмотрено рабочее место оператора. Подъем-опускание катка, а также перемещение вагонов по фронту погрузки осуществляется при помощи электрических лебедок [2]. В свою очередь, Группа компаний «Перспектива» и «ПензаТехноМаш» предусматривают возможность размещения катка-уплотнителя непосредственно на существующую конструкцию устройства погрузки сыпучих грузов (отпускной бункер) [4], [5]. Также предусмотрены различные способы перемещения полувагонов по фронту погрузки (при помощи маневровых лебедок/маневрового локомотива), а также поднятия-опускания катка-уплотнителя, что зависит от характеристик электропривода и способа управления им. Сравнимые параметры предлагаемых установок для уплотнения сыпучих грузов сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Сравнимые параметры катков-уплотнителей

Параметры и единицы измерения	Значение		
	[2]	[3]	[4]
Максимальная скорость передвижения полувагона, м/с	0,15	0,3	
Скорость подъема/опускания катка, м/с	0,1-0,2		0,4
Установленная мощность, кВт	15	25	31
Напряжение, В	380		380/220

Принципиальной разницы в предлагаемых конструкциях нет ввиду того, что катки-уплотнители должны обеспечивать не только качественное уплотнение груза, но и сохранность подвижного состава, что отражено в ГОСТ 22235-2010: длина катка должна быть не более 2,65 м, его масса – не более 4000 кг, длина конусной части - 0,53 м; угол наклона конусных частей - не более 25° [5]. Кроме того, установлено ограничение скорости передвижения полувагонов в процессе уплотнения груза, она не должна превышать значение 0,15 м/с (0,54 км/ч). Сохранность подвижного состава обеспечивается также за счет ограничения амплитуды поднятия-опускания катка-уплотнителя: он не должен опускаться ниже уровня верхней обвязки полувагона и механически взаимодействовать с ней и торцовыми стенами.

Анализ процесса уплотнения угля в полувагоне, а также вышеуказанных ограничений и параметров предлагаемых установок для уплотнения сыпучих грузов позволил определить требования к электроприводу катка-уплотнителя и режиму его работы. Данные требования можно сгруппировать по следующим критериям: а) к

физическим параметрам: быстродействие, соответствующий массе катка и размерам его рамы крутящий момент, что возможно обеспечить подбором характеристик электродвигателя (мощности и частоты оборотов) и редуктора (например, в установке от «ПензаТехноМаш» применен, редуктор типа 1Ц2У-315Н-25-22, кратность полиспада – 4 [3]); б) защитные: высокая степень защиты от влаги (ввиду того, что большая часть фронтов погрузки угля расположена на открытом воздухе), а также от пыли (в процессе погрузки сыпучих грузов при помощи отпусковых бункеров образуется большое количество пыли, которая оседает на окружающих предметах и может попасть на внутренние элементы электродвигателя при его работе, что может вывести агрегат из строя), в то же время необходимо обеспечить хороший теплообмен электродвигателя с окружающей средой для исключения его перегрева при интенсивной работе фронта погрузки; в) требования к режиму работы электродвигателя: как можно определить из таблицы 1, - возможно задать различную скорость подъема-опускания катка (от 0,1 м/с до 0,4 м/с), скорость передвижения полувагонов с учетом требования ГОСТ 22235-2010 – 0,15 м/с.

В свою очередь, разнообразие моделей полувагонов, используемых для перевозки сыпучих грузов (в том числе инновационных, с увеличенными объемом кузова и грузоподъемностью), а также ассортимента марок и фракций угля приводят к различной высоте загрузки угля в полувагон, что, следовательно, влияет на требуемую амплитуду подъема-опускания катка-уплотнителя, которая определяется либо оператором, либо автоматически при помощи специальных датчиков. Для выбора оптимального значения скорости подъема-опускания катка-уплотнителя разработана расчетная схема его перемещения при проходе им межвагонного пространства: требуется не только исключить соприкосновение катка с торцевой стеной полувагона, но и обеспечить наиболее полную укатку груза по длине вагона. На рис. 2 приведена схема перемещения рабочего органа катка при его переходе от одного полувагона к другому. При формировании данной схемы были использованы габаритные размеры полувагона модели 12-132 [6]. Расстояние между вагонами принято 1130 мм, диаметр катка – 1200 мм, ширина верхней обвязки кузова – 126 мм, скорость надвига полувагонов на фронт погрузки ($V_{\text{вар}}$) – 0,15 м/с.

Согласно схеме, нижняя точка катка при его подъеме в нерабочее положение переместится на 856 мм, при скорости подъема ($V_{\text{п-о}}$) 0,2 м/с и 0,4 м/с на это потребуются времени $0,856/0,2 = 4,28$ с и $0,856/0,4 = 2,14$ с соответственно. За это время полувагоны переместятся на расстояние $4,28*0,15 = 0,642$ м и $2,14*0,15 = 0,321$ м соответственно. Отложив

соответствующие значения перемещений по вертикали и горизонтали, получаем траекторию перемещения рабочего органа катка (показано зеленым цветом).

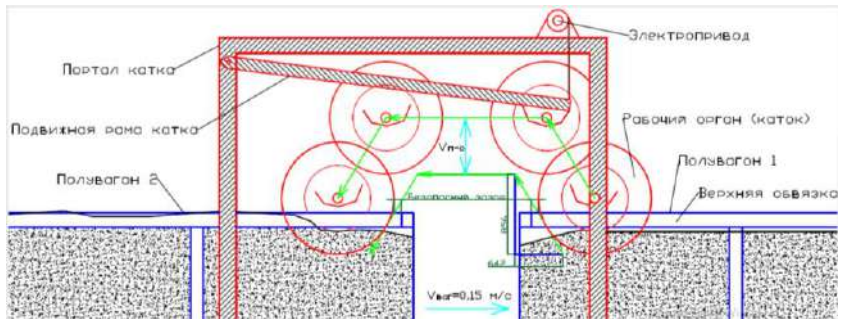


Рис. 2 – Схема перемещения катка от одного полувагона к другому

Наибольший интерес представляет касательная к большому кругу катания конусной части катка, положение которой определяется с учетом обеспечения безопасного зазора между катком и верхней обвязкой торцевой стены. Траектория перемещения катка при скорости 0,2 м/с является более полой, чем при 0,4 м/с, что позволяет сделать вывод о целесообразности выбора большей скорости подъема-опускания катка, так как при ней возможен более поздний момент подъема-опускания катка, что обеспечивает наиболее полную укатку груза по длине вагона. Кроме того, на момент начала поднятия катка оказывают влияние габариты кузова полувагона и рабочего органа катка, высота загрузки груза, на что влияют объемная плотность груза и грузоподъемность вагона.

Таким образом, результаты исследования позволяют выработать требования к электроприводу проектируемого катка-уплотнителя, которые во многом определяются принятой технологией погрузки угля, используемыми моделями полувагонов, ассортиментом сыпучих грузов, обязательные из них: хорошие влаго- и пылезащита, быстродействие, эффективное охлаждение, большая скорость подъема-опускания катка.

Литература:

1. Обеспечение сохранности грузов – установка статического действия НИИЖТа [электронный ресурс], URL: <https://lokomotiv.ru/podvizhnoy-sostav/obespechenie-sohrannosti-gruzov/Page-14.html> [дата обращения 29.10.21]

2. Установки для разравнивания и уплотнения сыпучих грузов [электронный ресурс], URL: <https://p-zpo.ru/catalog/ustanovki-dlya-razravnivaniya.html> [дата обращения 3.11.21]
3. Установка разравнивания и уплотнения насыпного груза в полувагонах [электронный ресурс], URL: <http://penzatehnomash.ru/catalog/porgruz-razgruz/ustanovka-razravnivaniya/> [дата обращения 5.11.21]
4. Установка для укатки угля в полувагонах [электронный ресурс], URL: <https://www.perspektivaomz.ru/ustanovka-dlya-ukatki-uglya-v-poluvagonah> [дата обращения 5.11.21]
5. ГОСТ 22235-2010 Вагоны грузовые магистральных железных дорог колеи 1520 мм. Общие требования по обеспечению сохранности при производстве погрузочно-разгрузочных и маневровых работ (с Изменением № 1) [электронный ресурс] URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200082560> (дата обращения: 11.11.21)
6. Полувагон модель 12-132 [электронный ресурс] URL: <http://brokerctl.ru/12-132> (дата обращения: 12.11.21)

БЕЗРЕДУКТОРНЫЙ ЭЛЕКТРОПРОВОД ЛИФТА НА ОСНОВЕ ТИХОХОДНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

И.И. Ратников

**Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, skripach_98@mail.ru**

Научный руководитель: КучерЕ.С., к.т.н., доцент

В данной работе представлены некоторые варианты электроприводов как лифтовое оборудование, рассмотрены их преимущества и недостатки, перспективы развития. Особое внимание уделено безредукторному электроприводу лебедки лифта на основе тихоходного асинхронного двигателя и задатчику интенсивности, требуемого для обеспечения оптимальных показателей движения кабины лифта.

The article discusses possible options for electric elevator drives, their advantages and disadvantages, as well as development prospects. Special attention is paid to the gearless electric drive of the elevator winch based on a low-speed asynchronous motor and the intensity setter necessary to ensure optimal characteristics of the elevator cab movement.

Подъемно-транспортные машины являются наиболее действенным и доступным средством механизации. Основная задача которой является значительное облегчение выполняемых погрузочно-разгрузочных, транспортных работ, требующих применение тяжелого физического труда.

Лифт является сложнейшим электромеханическим оборудованием, к его проектированию предъявляются жесткие требования, такие как отсутствие ощутимых толчков при старте и остановке, поддержание необходимого ускорения независимо от массы перемещаемого объекта, точное позиционирование кабины на этажной площадке.

На сегодняшний день наиболее распространенным электроприводом лифта, частично удовлетворяющим требованиям типовых диаграмм движения, является привод на основе двухскоростного асинхронного двигателя (АД) совместно с червяным редуктором и нерегулируемой системой управления электроприводом.[1]

Возможность технического развития редукторных лифтовых лебедок ограничены. Для повышения комфортности лебедок с червяным редуктором и двухскоростным АД, возможна модернизация и применение регулируемых систем управления электроприводом. Но в таких случаях неоправданно увеличивается себестоимость на переоборудование и расходы на эксплуатацию лифтового оборудования. [2]

Обозначим основные части редукторной лебедки, изображенной на рис. 1: 1 – червячный редуктор; 2 – канатоведущий шкив; 3 – колпак; 4 – штурвал; 5 – рама; 6 – подрамник; 7 – упругий амортизатор; 8 – чашка; 9 – муфта; 10 – клеммная коробка; 11 – двухскоростной асинхронный электродвигатель; 12 – колодный тормоз.

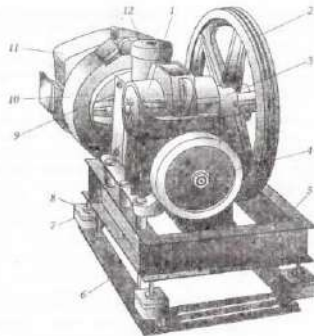


Рис.1 – Редукторная лебедка на основе двухскоростного АД

В следствии развития микроэлектроники и систем управления электроприводами, следующим шагом на пути развития электроприводов лифтов стали безредукторные лебедки. Такие лебедки в своей структуре включают специальный тихоходный асинхронный двигатель (ТАД), для обеспечения требуемой номинальной линейной скорости перемещения кабины и преобразователь частоты, который обеспечивает необходимые показатели скорости и ускорения кабины.

На рис. 2 представлена безредукторная лебедка и приняты следующие обозначения: 1 – рама; 2 –отводной блок; 3 – опора привода; 4 – канатоведущий шкив; 5 –тормозной диск; 6 – электродвигатель; 7 – электромагнитный тормоз; 8 – датчик обратной связи по скорости (энкодер).

Основными преимуществами безредукторного электропривода можно считать [3]:

- 1) отсутствие редуктора – то есть, существенное уменьшение механической части;
- 2) высокая комфортность – повышение комфортности в виду уменьшения шумов, плавности пуска и останова;
- 3) низкий уровень шума и вибраций– за счет исключения редуктора уменьшились механические шума и вибрации при перемещении кабины.

ТАД в безредукторном электроприводе лифта выгодно отличается от применения общепромышленных АД: низкой скоростью вращения, следовательно высоким моментом, низкой частотой напряжения питания, уменьшением кратности пусковых токов.

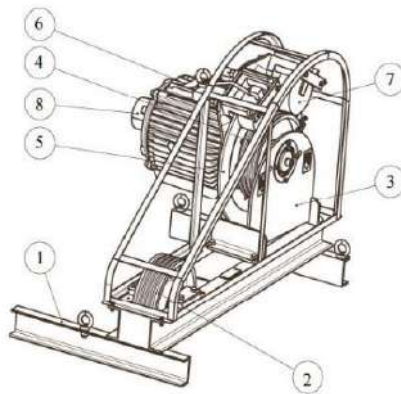


Рис.2 – безредукторная лебедка на основе ТАД

Применение ТАД совместно с цифровой системой управления скоростью электродвигателя, дает возможность реализации гибких алгоритмов управления электроприводом лифтовой лебедки и обеспечения необходимых характеристик электропривода: точность позиционирования и высокая комфортность поездки.

Исходя из модели прямого пуска ТАД, скорость и момент нарастают скачком, что неприемлемо для использования в лифтовых установках предназначенных для перемещения пассажиров, так как это приводит к резкому ускорению кабины лифта и к увеличенным перегрузкам, которые ощущают пассажиры внутри кабины.[4] Поэтому для сглаживания нелинейностей при пуске и остановке, необходимо применить задатчик интенсивности. Однако, стоит отметить, что для грузовых подъемных установок такой задатчик интенсивности может не применяться, т.к таким механизмам предъявляется менее жесткие требования по допустимому ускорению и рывку.

Для построения оптимальной тахограммы движения кабины лифта требуется задать начальные номинальную скорость движения кабины $v_{ном}$, допустимое ускорение $a_{дон}$ и максимально допустимый рывок $\rho_{дон}$. Тахограмму движения кабины лифта условно можно разделить на три этапа:

1 этап характеризуется поддержанием величины значения рывка постоянным, а также ускорением, которое изменяется по линейному закону.

$$a_1(t) = \int_0^t \rho_{дон} dt = \rho_{дон} \cdot t_1 + const;$$

$$v_1(t) = \int_0^t a_1(t) dt = \int_0^t \rho_{дон} \cdot t dt = \rho_{дон} \cdot \frac{t_1^2}{2} + const.$$

2 этап характеризуется поддержанием ускорения на максимально допустимом уровне $a_{дон}$ и отсутствием рывка.

$$v(t) = \int_0^t a(t) dt = a_{дон} \cdot t + const .$$

3 этап аналогичен этапу разгона, но соответственно имеет противоположные знаки, т.к происходит режим замедления.

Используя вышеуказанные выражения и определив начальные условия на каждом из этапов, может быть и построена тахограмма движения кабины лифта. Вид график разгона до номинальной скорости

движения кабины с учетом ранее принятых максимально допустимых значений ускорений и рывка представлен на рис. 3.

Задатчик интенсивности с S-образной характеристикой позволит дополнительно ограничить вторую производную скорости (температура нарастания динамического момента электропривода) и тем самым повысить плавность переходных процессов в электроприводе.

Для модернизации системы управления электропривода лифтовой установки не обходимо решить такие задачи как: представить математическое описание механической части ЭП лифта и составить модель для дальнейшего исследования работы механизма подъема и опускания кабины лифта; синтезировать систему управления скоростью движения кабины лифта, которая совместно с задатчиком интенсивности будет обеспечивать требуемые показатели движения такие как скорость, рывок и ускорение.

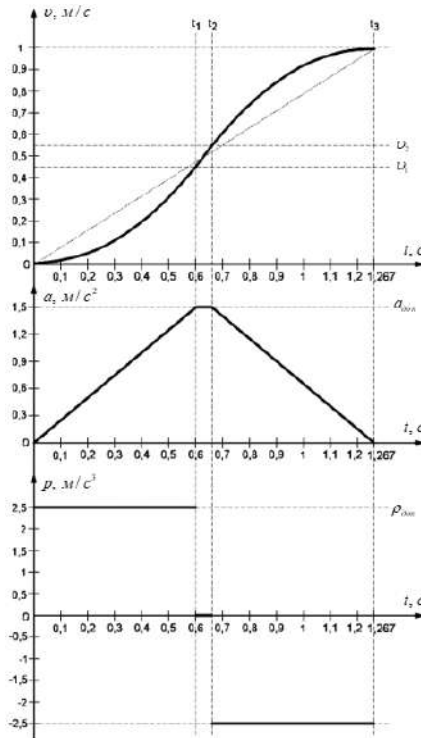


Рис.3 – оптимальная тахограмма движения кабины лифта при разгоне

Литература:

1. Лифты. Учебник для вузов /под общей ред. Д. П. Волкова – М: изд-во АСВ, 1999. — 480 стр. с илл.
2. Борисов Ю.М., Соколов М.М. Электрооборудование подъемно-транспортных машин: учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1971. — 375с.
3. Архангельский Г.Г. Современные тенденции и перспективы развития лифтостроения // Стройпрофиль. – 2008. – №7. – С.94-96.
4. Панкратов В.В. Векторное управление асинхронными электроприводами: Учебное пособие. – Новосибирск, 1999 – 65 с.

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА МОТОР-КОЛЕС

Г.С. Сидоров, М.А. Гончарова

**Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, georgiy@mail.ru**

Научный руководитель: Котин Д.А., к.т.н., доцент

Автомобили с мотор-колесами имеют ряд преимуществ над традиционными. Важнейшим из преимуществ является отсутствие сложных и тяжелых передаточных механизмов: сцепления, трансмиссии, дифференциалов и приводных валов. Ввиду своей большой удельной мощности в сравнении с другими электрическими двигателями наиболее подходящей машиной для мотор-колес является синхронный двигатель с постоянными магнитами (СДПМ). В различной литературе хорошо описаны теоретические аспекты управления СДПМ. Программная же реализация системы управления СДПМ под тот или иной тип микроконтроллера является уникальной.

Motor-wheel vehicles have a number of advantages over traditional vehicles. The most important of the advantages is the absence of complex and heavy transmission mechanisms: clutches, transmissions, differentials and drive shafts. The most suitable motor for wheel motors is a permanent magnet synchronous motor (PMSM) due to its high power density compared to other electric motors. The theoretical aspects of PMSM management are well described in various literatures. The software implementation of the PMSM control system for a particular type of microcontroller is unique.

В рамках данной статьи предлагается исследовать существующее решение для управления синхронными машинами с возбуждением от

постоянных магнитов (СДПМ) и предложить свой программно-аппаратный комплекс. Каждая компания старается защитить свои решения от копирования и редактирования. Вследствие этого, возникает проблема изучения тех или иных алгоритмов работы оборудования, не являясь сотрудником компании. Также возникает необходимость иметь свои собственные разработки для проектов, решаемых на факультете. Другими словами создать свой специализированный проект по собственным наработкам, не отдавая его на аутсорсинг частным компаниям.

В качестве объекта исследования выбран стенд от компании STM - STM3210B-МСКІТ. Внешний вид стенда приведен на рисунке 1.

Данный комплект примечателен тем, что электрические принципиальные схемы, параметры двигателя, элементная база заранее известны.



Рис.1 – Набор STM3210B-МСКІТ

Также стенд отличается повышенной надежностью, например, силовые ключи позволяют коммутировать ток до 60 А, в то время как двигатель потребляет 7 А под номинальной нагрузкой. Подключение данного стенда к лабораторному блоку питания обеспечит его дополнительной защитой со стороны блока питания: отсечкой по току и напряжению. А также поставляемое программное обеспечение от компании STM является полностью бесплатным[3],[4],[5],[6],[7].

Для проведения исследования был собран лабораторный стенд. Фото стенда приведено на рисунке 2.

В результате исследования программных и аппаратных возможностей стенда были выявлены следующие недостатки: код, создаваемый официальным программным обеспечением, довольно громоздкий и учитывает все возможные подключения; все представленные бездатчиковые алгоритмы управления не позволяют осуществлять реверс двигателя; для изменения программы микроконтроллера требуется последовательная генерация кода из программы STMotor Control Workbench в STCubeMX и затем в STCubeIDE, что занимает

довольно много времени; отладка возможна только путем осциллографирования.

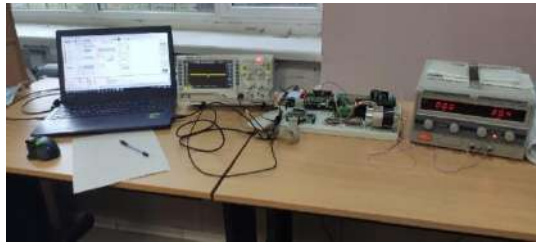


Рис.2 – состав лабораторного стенда

На рисунке 3 приведены осциллограммы для двух бездатчиковых алгоритмов управления СДПМ реализуемых на стенде от STM.

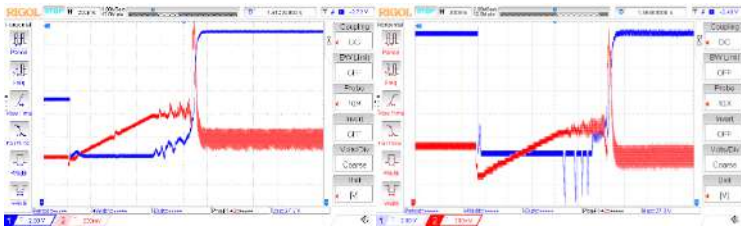


Рис. 3 – переходные процессы пуска двигателя до номинальной частоты вращения (синим – скорость вращения; красным ток по оси q) слева с использованием ФАПЧ, справа — алгоритма Волдера.

Из переходных процессов пуска двигателя, явно видно, что применяется алгоритм предраскручивания двигателя постоянным током. В этом случае, в двигателе при разомкнутой системе управления формируется заданный вектор тока и при достижении, определенной заранее, частоты вращения происходит переключение системы управления и переход на основной бездатчиковый алгоритм управления[1].

Для решения довольно сложной задачи — программной реализации алгоритма бездатчикового векторного управления СДПМ необходимо разбить его на подзадачи: во-первых, необходимо разработать код для датчикового алгоритма управления для выше описанного стенда от компании STM, что в дальнейшем позволит перенести его на другой микроконтроллер того же семейства, во-вторых, провести синтез наблюдателя скорости в среде MatLabs последующей генерацией C кода

3. UM0486 User manual — STM3210B-MCKIT motor control starter kit. – ©STMicroelectronics, 2008. – 27 с.
4. UM0426Usermanual –STM3210B-EVAL evaluation board. – ©STMicroelectronics, 2010. – 46 с.
5. UM0379 User manual – STM3210B-MCKIT and STR750-MCKIT 3 – phase motor control power stage. – ©STMicroelectronics, 2007. – 21 с.
6. UM0378 User manual – JTAG opto-isolation board. – ©STMicroelectronics, 2007. – 9 с.
7. UM1052 User manual – STM32F05xx/ STM32F100xx/ STM32F103xx/ STM32F2xx/STM32F4xx PMSM single/dual FOC SDK v3.3. – ©STMicroelectronics, 2012. – 129 с.

УПРАВЛЕНИЕ МАГИСТРАЛЬНЫМИ НАСОСНЫМИ АГРЕГАТАМИ НЕФТЕПРОВОДА

Д.Г. Цамалаидзе

**Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, dtsamalaidze98@mail.ru**

Научный руководитель: Кавешников В.М., к.т.н., доцент

В работе рассматриваются магистральные насосные агрегаты, установленные на нефтеперекачивающей станции, необходимые для перекачки нефти по нефтепроводу. Предлагается система управления для минимизации нерациональных потерь при транспортировке, обеспечивающей минимальный удельный расход потребление электроэнергии на тонно-километр перемещаемого продукта.

The paper considers the pumping units installed on the oil pumping unit, which are necessary for pumping oil through the pipeline. A control system is proposed to minimize irrational losses during transportation, ensuring the minimum specific power consumption per ton-kilometer of the transported product.

Ведущей отраслью российской промышленности является нефтяная промышленность, которая включает в себя добычу нефти из недр земли, системы транспортировки, комплексов по очистке топлива и производству продукции.

Т.к. большая часть нефтепромыслов находится далеко от мест переработки или сбыта нефти, поэтому одной из важнейших задач для развития отрасли является доставка нефти и (или) нефтепродуктов.

Существуют различные способы доставки нефти: трубопроводный, автомобильный, железнодорожный, водный. Экономически эффективным, надежным и экологически безопасным способом транспортировки нефти являются нефтепроводы. В настоящее время по трубопроводам перекачивается более 90% нефти, которая добывается в СНГ.

Для перекачки нефти по магистральным нефтепроводам используются магистральные насосные агрегаты (МНА), расположенные на головных и промежуточных нефтеперекачивающих станциях (НПС).

В дальнейших исследованиях используются данные МНА применяемые на Казахстанско – Китайском трубопроводе.

Значительную долю (до 70 %) затрат электроэнергии на транспортировку, как показывает анализ баланса электроэнергии, приходится на основное технологическое оборудование. Поэтому актуальной является проблема снижения затрат на электроэнергию потребляемую МНА.

Целью работы является синтез системы управления МНА для минимизации энергопотребления при сохранении качества переходных процессов в системе.

Для снижения потребления энергии на перекачку предлагается использование частотного управления магистральными насосными агрегатами. Предполагается применение преобразователей частоты (ПЧ) с промежуточным звеном постоянного тока, встроенными в систему регулирования давления на выкиде МНА с учетом входного давления и вязкости перекачиваемого продукта. Учитывая, что на МНА применяются высоковольтные асинхронные электродвигатели, необходимо принять во внимание особенности оптимального управления ими с точки зрения снижения электропотребления. Предполагаемая структурная схема оптимальной системы приведена на рис. 1, где ОР - оптимальный регулятор, ПЧ – преобразователь частота, АД – асинхронный двигатель, Н – насос.

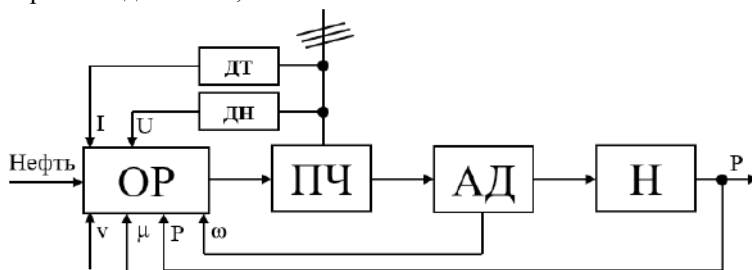


Рис. 5 – структурная схема оптимальной системы

Для разработки оптимальной системы управления был выбран аналитический метод оптимального управления – метод Портнягина. Так как он дает структуру и параметры регулятора при заданном критерии оптимальности и ограничении на управление.

При выполнении работы использовались аналитические методы оптимального управления структурного моделирования, теории автоматического управления, математического описания асинхронных двигателей и транзисторных высоковольтных преобразователей частоты, а также методы оптимизации насосных установок с частотным управлением.

Разрабатываемая система может быть внедрена на трубопроводах при перекачки различных жидких продуктов, обеспечивая теоретически минимальное значения потребления энергии на тонна*км

Литература:

1. Бирюков В.В. Оборудование нефтегазовых производств / В.В.Бирюков, А.А.Штанг. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. - 514 с. (Серия" Учебники НГТУ").
2. Анализ резервов энергосбережения при управления насосными агрегатами нефтеперекачивающих станций Украины / Канюк Г.И., Андреев А.В., Мезеря А.Ю., Князева В.Н.
3. Ту Ю. Современная теория управления / Ту Юлиус; TouJuliust; перевод с английского Я. Н. Гибадулина; под редакцией В. В. Солодовникова. - М.: Машиностроение, 1971. - 472 с.

СТАБИЛИЗАЦИЯ ВЫХОДНОЙ МОЩНОСТИ И УВЕЛИЧЕНИЕ КПД ВЕТРОГЕНЕРАТОРНЫХ УСТАНОВОК СРЕДСТВАМИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

А.А. Чепига, Е.Е. Корытченкова, Ю. Али
Национальный исследовательский университет
«Московский энергетический институт»,
г. Москва, andreychepiga@yandex.ru
Научный руководитель: Анучин А.С., д.т.н., профессор

В данной работе представлен алгоритм компенсации теневого эффекта ветроустановки с синхронным генератором с постоянными магнитами. Метод основан на принципах векторного регулирования и обеспечивает компенсацию колебаний мощности ветрового потока, что, соответственно, позволяет снизить уровень колебаний активной

мощности генератора. В методе используется алгоритм настройки контуров тока, скорости и регулирования поворота лопасти ветрогенератора, позволяющие решить проблему эффекта затенения башни. Полученные с помощью предложенного метода данные могут быть использованы для эффективного моделирования работающих параллельно с сетью ветроустановок и оптимизации их параметров.

This paper presents a method for stabilizing the active power of a wind turbine driving a permanent-magnet synchronous generator. The method is based on the principle of vector control and provides compensation for power fluctuations of the wind flow, which allows to reduce the level of active power deviation of the generator. The method implements control algorithm for current loop, speed loop and blade pitch loop to solve the problem of the tower shadow effect. The proposed method can be used for simulation of wind turbines operating in parallel with the grid and optimization of their parameters.

С увеличением количества ветровых станций и их установленной мощности возникает ряд вопросов, требующих дополнительных исследований. Так, при параллельной работе ветроэлектростанций с энергосистемой в ряде случаев не обеспечивается качество напряжения из-за колебаний мощности, выдаваемой в сеть [1]. Причиной этого может быть как нестабильность скорости ветра, так и конструктивные особенности ветроустановок [2]. Актуальным решением этой задачи является совершенствование системы регулирования и разработка методов математического моделирования режимов работы ветроэнергетических установок.

В ветроэнергетических системах используются различные типы машин. Наиболее распространенным из них, используемым в ветрогенераторах, является синхронный генератор с постоянными магнитами, поскольку он обеспечивает хорошую производительность в широком диапазоне скоростей.

В данной статье на базе синхронного генератора с постоянными магнитами описан синтез регулирования ветрогенераторной установки с учетом эффекта затенения и спектральной модели ветра Ван дер Ховена, которая способна обеспечивать режим стабилизации мощности путем использования принципов векторного регулирования.

Периодические изменения приводного момента ветроколеса, вызванные эффектом затенения башни, также можно воспринимать как последствия колебаний скорости ветра, хотя причина этих колебаний не в природе ветра, а в особенностях конструкции ветроустановки. Именно благодаря особенностям конструкции, лопасти ветроколеса по

очереди пересекают зону затенения трубчатой башни, оказываясь в безветренной зоне. Это и приводит к колебаниям момента ветроколеса на частоте $1 \div 2$ Гц, в зависимости от скорости его вращения. Следует отметить, что такая частота значительно усиливает воздействие возмущающего фактора на систему регулирования.

Для обеспечения компенсации колебаний мощности ветрового потока необходимо использовать быстродействующую систему регулирования, потому что механическая система регулировки pitch-угла не в состоянии обеспечить качественную стабилизацию выходной мощности.

Для решения этой задачи целесообразно использовать быстродействующую систему векторного регулирования, структурная схема которой приведена на рисунке 1.

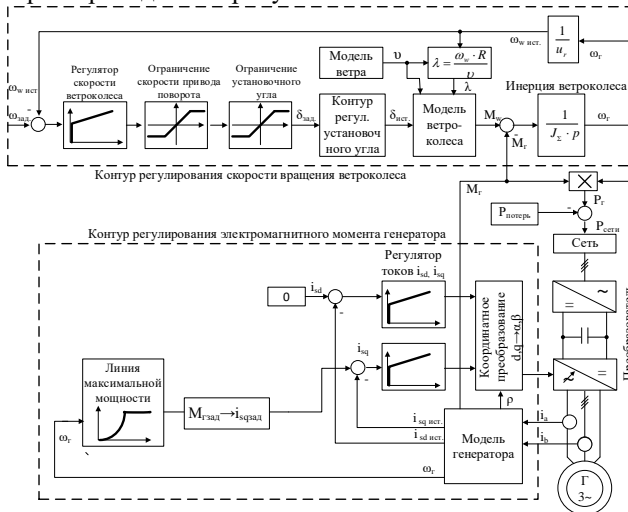


Рис.1 – структурная схема двухконтурной системы стабилизации активной мощности ветроустановки

Приведенная система регулирования может применяться для ветроустановки с переменной скоростью вращения ветроколеса, что обеспечивается за счет использования преобразователя частоты. В этой системе задача регулирования скорости вращения ветроколеса и момента генератора разделена между двумя контурами.

Регулирование скорости вращения ветроколеса осуществляется за счет изменения pitch-угла. Регулирование момента осуществляется во вращающейся системе координат d-q, вещественная ось d которой связана с вектором потока ротора. Необходимые обратные связи в системе регулирования обеспечиваются моделью генератора, которая

базируется на уравнениях статора и ротора синхронной машины, записанных для вращающейся системы координат.

Ввиду малого значения постоянной времени современных преобразователей частоты, работающих с высокими частотами модуляции до 20 кГц, контур регулирования моментобразующей компоненты тока статора имеет большое быстродействие, которое является достаточным для компенсации колебаний возмущающего воздействия.

Амплитуда колебаний возмущающего воздействия, вызванных эффектом затенения башни, может достигать величины порядка 15% от значения номинального момента ветроколеса при снижениях скорости ветра в секторе затенения в 2 раза. Следовательно, при частоте колебаний возмущения — $f_k \approx 1$ Гц, постоянной времени контура скорости поворота лопасти — $T_s = 0,025$ с и суммарном моменте инерции ветроколеса — $J = 1468$ кг·м² на основании формулы (5) можно оценить амплитуду колебаний скорости вращения генератора, которая будет равняться примерно 0,3% от его номинальной скорости. При указанном уровне амплитуды колебаний скорости вращения — 0,3%, амплитуда колебаний активной мощности не превысит значения 1%.

Результаты моделирования процесса стабилизации мощности генератора при колебаниях скорости ветра в программном пакете MATLAB продемонстрированы на рисунке 2.

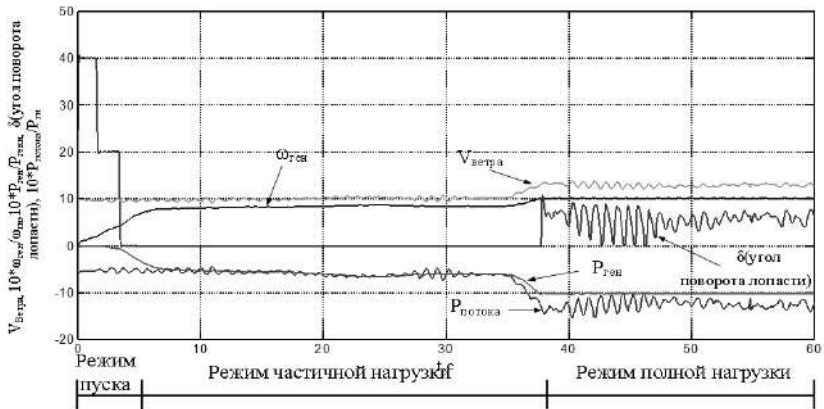


Рис.2 – поведение ветрогенераторной установки в основных режимах работы (активная мощность генератора $P_{ген}$, мощность ветрового потока $P_{поток}$, скорость вращения генератора $\omega_{ген}$, скорость ветра $V_{ветра}$, угол поворота лопасти δ)

На данном графике видно, что в режиме частичной нагрузки мощность генератора по среднему значению ($P_{ген}$) пытается повторить поведение мощности ветрового потока ($P_{потока}$), при этом ветроколесо работает с максимальным расчетным коэффициентом мощности. В режиме полной нагрузки, то есть после достижения скорости вращения генератора своего номинального значения, активная мощность генератора становится меньше, чем мощность ветрового потока, включается контур регулирования поворота лопасти, и значения мощности и скорости генератора ограничиваются на уровне номинала, что выполняется благодаря регулированию угла поворота лопасти δ , который в режиме частичной нагрузки был равным нулю.

Использование двухконтурной системы стабилизации мощности ветроустановки, в которой функции регулирования скорости вращения ветроколеса и момента генератора распределены между системой pitch-регулирования и системой векторного регулирования соответственно, позволяет снизить уровень колебаний активной мощности генератора, обусловленных в большей степени эффектом затенения башни, примерно на порядок по сравнению с концепцией прямого подключения синхронного генератора к сети, что, безусловно, положительно сказывается на качестве сетевого напряжения с точки зрения соответствия его международным требованиям.

Литература:

1. C. Lumbreras, J. M. Guerrero, D. Fernandez, D. Diaz, C. Gonzalez, F. Briz, "Analysis and Control of the Inductorless Boost Rectifier for Small Power Wind Energy Converters," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 55, pp. 689 – 700, Jan.-Feb. 2019.
2. A. Lebioda, K. Rudion, A. Orths, Z. Styczynski, "Investigation of disposable reserve power in a large-scale wind farm," 2005 IEEE Russia Power Tech, 27-30 June 2005.

АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

Д.А. Черемшанова

Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, cheremshanova.2016@stud.nstu.ru
Научный руководитель: Кучер Е.С., к.т.н., доцент

Работа посвящена исследованию и синтезу адаптивной системы векторного управления асинхронным электроприводом. На первых этапах работы происходит описание асинхронного электропривода, выбранного в качестве объекта управления. Далее осуществляется построение многоканальной системы векторного управления электроприводом. Свойство адаптации системы, может упростить и повысить надежность системы путем исключения какого-либо датчика из ее структуры. На последнем этапе происходит проверка результатов синтеза путем моделирования полученной системы в программном пакете MATLAB.

The work is devoted to the study and synthesis of an adaptive vector control system of induction electric drive. In the first stages of operation, a description is given of the induction electric drive selected as the control object. The following is a description of the vector control system of the electric drive, its structure, operating principles, and also the contours of the control. The next chapter introduces a system that can simplify the system by removing a sensor from its structure. In the last stage, synthesis results are tested by simulating the resulting system in the MATLAB software package.

На сегодняшний день электроприводы переменного тока являются самыми распространенными видами электрических машин, и их большинство строятся на базе асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Они находят применение во всех областях деятельности человека, где необходимо преобразование электрической энергии в механическую. Процесс производства электродвигателей переменного тока достаточно прост, технологичен и почти полностью автоматизирован.

Электрические машины переменного тока имеют целый ряд преимуществ, в сравнении с машинами постоянного тока:

- отсутствует ограничение по предельной мощности;
- возможность питания статора от сети с напряжением в десятки киловольт;

- отсутствует щеточно-коллекторный узел, что значительно позволяет сократить эксплуатационные затраты на электродвигатель переменного тока;
- современные пусковые устройства, называемые «мягкие пускатели», нерегулируемых электроприводов переменного тока позволяют производить более экономичные и надежные в эксплуатации электроприводы.

Сегодня, электроприводом 21 века считается электропривод с асинхронными короткозамкнутыми двигателями с современными преобразователями частоты на базе силовых модулей MOSFET и IGBT транзисторов, и микропроцессорным управлением. Устройство асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором представлено на рисунке 1.



Рис. 1 - Устройство асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

В данной работе выбран асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором средней мощности серии 4А, предназначенный для нормальных условий работы в различных отраслях промышленности. Выбранный двигатель 4А225М4У3 рассчитан на работу от сети трехфазного переменного тока частотой 50 Гц и имеет степень защиты IP44.

В обычных системах управления двигателем параметры объекта являются либо стационарными - не изменяются во времени, либо нестационарными - изменяются во времени под влиянием различных факторов. Но, так же, существуют системы, в которых параметры объекта изменяются неизвестным образом и эти изменения параметров могут привести к изменениям качества процесса управления двигателем или даже привести к потере устойчивости системы.

Адаптация — это процесс изменения параметров, структуры систем или управляющих воздействий на основе информации, получаемой во время управления, с целью достижения определенного (оптимального)

качества управления при начальной неопределенности и/или изменяющихся условиях работы.

На данном момент можно выделить две группы причин применения принципов адаптации: во-первых, целесообразно применять адаптацию при изменчивости и сложности характеристик объектов и внешней среды, выделяют климатические, механические, нагрузочные дестабилизирующие факторы внешней среды, а также изменения в системе питания; во-вторых, адаптацию применяют в связи с ростом требований к точностным и технико-экономическим характеристикам систем.

Адаптивные системы с идентификацией или с самонастройкой, являются наиболее универсальными и могут подходить для управления широким рядом двигателей, различающихся как по мощности, так и по приложенной нагрузке.

Отказавшись от каких-либо датчиков в электроприводе, возникает необходимость косвенного определения ряда координат состояния. Чаще всего такими координатами являются частота вращения ротора и фаза ориентирующего (опорного) вектора – вектора потокоцеплений ротора – относительно неподвижного статора. Вычисление их оценок осуществляется на основе измеренных токов и напряжений статора двигателя с помощью специальных алгоритмов идентификации - идентификаторов. Наибольшее распространение на сегодняшний день получили адаптивные системы с идентификацией (АСИ), замкнутые по выходной координате рисунок 2.

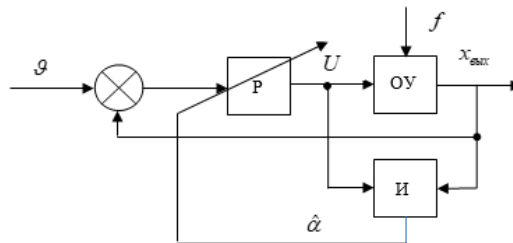


Рис. 2 – структура адаптивной системы управления электроприводом с идентификацией

Область применения асинхронных электроприводов векторного управления без использования каких-либо датчиков, пристроенных к валу двигателя или встроенных в двигатель, определяется некоторыми условиями, которые может требовать заказчик:

1) в приводе требуется регулирование электромагнитного момента на валу двигателя;

2) установка датчика скорости на вал двигателя невозможна, по условиям эксплуатации, технологическим, стоимостным или прочим ограничениям;

3) механизм предъявляет повышенные требования к быстродействию привода;

4) не требуется высокая статическая точность и широкий диапазон регулирования скорости.

Осуществив преобразования уравнений электрического равновесия обмоток асинхронного двигателя, описав принципы векторного управления и работу преобразователя частоты, за счет которого осуществляется питание системы векторного управления, можно приступить к следующему этапу.

Далее был произведен синтез системы векторного управления асинхронным электроприводом. В частности, был произведен синтез контуров регулирования тока статора и потокосцепления ротора, которые настраивались на технический (модульный) оптимум, и синтез контура регулирования скорости ротора, который настраивался на симметричный оптимум. В результате синтеза каждого из контуров был получен пропорционально-интегральный регулятор. Если он не обеспечит астатизм системы автоматического регулирования по задающему и по возмущающему воздействиям, необходимо будет синтезировать САУ методом САОМ или МБК.

Таким образом, на последнем этапе работы предстоит выполнить синтез алгоритма идентификации, необходимо будет решить следующий ряд задач:

1. выбрать тип идентификатора и его структуру.
2. выбрать методику сравнения координат состояния.
3. выбрать тип и расчет параметров регулятора идентифицируемой величины.

Все результаты первичного моделирования синтезируемых алгоритмов будет выполняться в программной пакете MATLAB 2019b.

Литература:

1. Нестеров С. А. Адаптивные системы управления: Конспект лекций. СПб.: Факультет технической кибернетики СПбГПУ, 5. 9 с.
2. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока. – Иваново: ГОУВПО ИГЭУ, 2008. – 298 с.
3. Панкратов В.В., Маслов М.О. Задачи синтеза алгоритмов идентификации для бездатчиковых асинхронных электроприводов с векторным управлением и вариант их решения Опубликовано: Силовая интеллектуальная электроника. – 2007. – №1(6).
4. Виноградов А., Сибирцев А., Колодин И. Адаптивно-векторная система управления бездатчикового асинхронного электропривода серии ЭПВ //Силовая электроника. – 2006. – № 3. – С. 46–51.

**Секция ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ
И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТРАНСПОРТ**

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ
СЕТИ ГОРОДА ИСКИТИМ**

А.В. Бердюгина

Новосибирский государственный технический университет,

г. Новосибирск, lulula1one8@gmail.com

Научный руководитель: Бирюков В.В., к.т.н., доцент

В данной работе рассмотрена газораспределительная сеть для города Искитим. Внимание уделено уточняющей методике гидравлического расчета газопроводов, позволяющие снизить материальные ресурсы на строительство и эксплуатацию газораспределительной системы. Целью исследования является увеличение объема газификации населенного пункта и уменьшение потерь при транспортировке газа потребителю путем разработки экономико-математической модели оптимизирования газификации населенного пункта.

This paper examines the gas distribution network for the city of Iskitim. Attention is paid to the corrective method for the hydraulic calculation of gas pipelines, which makes it possible to reduce material resources for the construction and operation of the gas distribution system. The aim of the study is to increase the volume of gasification of a settlement and reduce losses during gas transportation to the consumer by developing an economic and mathematical model for optimizing the gasification of a settlement.

На сегодняшний день состояние газификации значительно превосходит показатели начала 2000-х годов, когда начинала разворачиваться широкомасштабная программа газификации. Развитие добычи газа достигается за счет увеличения количества потребления газа, которое осуществляется, во-первых, путем увеличения объемов использования его в городах, уже газифицированных к настоящему времени, а во-вторых, за счет газоснабжения новых населенных пунктов и городов, в том числе в сельской местности.

Качество услуг по транспортировке газа по газораспределительным сетям характеризуется обеспечением давления в газораспределительной сети в пределах, необходимых для функционирования газопотребляющего оборудования. Вместе с тем обеспечение

экономической целесообразности системы также является важным критерием.

Как правило, необходимое давление газа перед газоиспользующим оборудованием получается в том случае, когда пункт редуцирования расположен как можно ближе к абоненту [1]. В связи с этим, обоснование расчетного перепада давления в системе газоснабжения и его оптимальное распределение между основными участками – магистральными участками, ответвлениями и внутридомовыми газопроводами являются важной оптимизационной задачей.

Одним из главных методов, используемых в работе, является анализ. Так, была получена информация о нормативной методике и регламентах расчета систем газоснабжения.

Базой проектирования газораспределительных сетей является гидравлический расчет, с помощью которого определяются основные технические характеристики газопровода [2]. Зачастую, в качестве исходных данных для расчета используют так называемые технологические ограничения, как например, допустимые давления газа у потребителей. В свою очередь наибольший интерес представляет расчет технологических параметров сети, и особенно перепадов давления при условии изменения расходов газа у потребителей, изменений давления источников и геометрических параметров системы газоснабжения.

В данном исследовании полное использование избыточного давления в точке присоединения абонента к распределительному газопроводу предложено в качестве варианта снижения затрат на строительство и эксплуатацию. Отсюда целевой функцией задачи оптимального распределения расчетного перепада давления на ветке распределительного газопровода будет являться материальная характеристика сети (1):

$$M = \sum_{i=1}^m d_i l_i \quad (1)$$

где m – количество расчетных участков сети.

Для того чтобы определить диаметр участка ответвления от газораспределительной сети может быть использована следующая формула (2):

$$d_{\text{отв}} = a_0^{0,21} (Q_{\text{сп}}^{\text{отв}})^{0,368} \left(\frac{l_{\text{отв}}}{\Delta P_{\text{отв}}} \right)^{0,21} \quad (2)$$

где $Q_{\text{ср}}^{\text{отв}}$ - средние расходы газа на ответвлении распределительного газопровода, $\text{м}^3/\text{ч}$; $l_{\text{отв}}$ - протяженность ответвления от распределительного газопровода, м; $\Delta P_{\text{отв}}$ - расчетные потери давления в ответвлениях, Па; α_0 - поправочный коэффициент, зависящий от состава газа.

С использованием аналогичных формул определяются диаметры участков головной магистрали распределительного газопровода и участков ввода в жилое здание. Из суммы материальных характеристик каждого из участков складывается общая материальная характеристика расчетной ветки газопровода.

Для нахождения минимума целевой функции, то есть для определения оптимального распределения потерь давления между основными участками сети, применяется метод неопределенных множителей Лагранжа [3].

Ограничением к целевой функции задачи выступает требование о том, что расчетный перепад давления равен сумме перепадов давлений по участкам газовой сети, начиная от пункта редуцирования и заканчивая конечным потребителем газа [4].

Помимо этого, к данным, необходимым для проведения расчетов с помощью программы, относятся: число магистральных участков сети, число ответвлений, начальное давление газа после пункта редуцирования, вязкость, стоимостный коэффициент, материал труб, расчетные часовой расход газа и расходы газа на основных участках ветки газопровода [5]. При помощи математических операций по уже посчитанным конечным давлениям и поправочным узловым давлениям рассчитывается оптимальный перепад давления на каждом участке.

В результате использования изложенного метода формируется экономико-математическая модель задачи и проведение расчетов сводится к выполнению последовательных алгебраических действий с применением программы MatLab Simulink, что позволяет корректировать результаты гидравлического расчета путем оптимального перераспределения перепадов давления в сети и расчета оптимальных диаметров проектируемых газопроводов.

Согласно проведенному информационному анализу, использование данной уточняющей методики проведения гидравлического расчета позволяет снизить единовременные затраты в сооружение и эксплуатацию распределительных газовых сетей на 10 и более процентов.

Литература:

1. Фастов Л.М., Медведева О.Н. Надежность систем газоснабжения. Саратов: СГТУ, 2012. 148 с.
2. Ионин А.А. Газоснабжение. СПб.: Лань, 2012. 448с.
3. Медведева О.Н. Моделирование поселковых систем газоснабжения // Вестник СГТУ. 2011. №1(52). С. 203-210.
4. Голик В.Г. Газоснабжение населенного пункта: учеб. пособие. – Саратов: Изд-во СГТУ, 1995. – 68 с.
5. Панов М. Я., Мартыненко Г.Н., Ухлова В.В. Использование системы MATLAB для моделирования процесса управления функционированием систем газоснабжения // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2017. №1 (367). С. 239-243.

КОЛОНКА ДЛЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ

Е.В. Богданов

**Сибирский государственный университет водного транспорта,
г. Новосибирск, e9orbogdanov@yandex.ru
Научный руководитель: Смыков Ю.Н.**

Предлагается рассмотреть статью о колонке для электромобиля, в связи с ростом числа машин на электроприводе, в данной статье описана методика зарядки и методы решения встречающихся на данный момент проблем, связанных с устройством колонки.

It is proposed to consider an article about a column for an electric car, due to the growing number of cars on an electric drive, this article describes the charging technique and methods for solving the problems currently encountered with the column device.

В наше время электротранспорт получает всеобщее внимание так же, как и системы зарядки для данных средств передвижения, но до сих пор этот рынок оказывается незрелым, из этого выделяются такие проблемы как доступность, экономическая составляющая и инженерный прогресс.

Объектом исследования в нашем случае служит колонка для зарядки аккумулятора электромобиля, которая представляет собой пункт управления, в котором находятся платы преобразователя энергии, контроля и коммуникационная плата, зарядный шнур и штекер питания.

На данном этапе был проведен анализ многих видов электромобилей и установлено, что зарядка производится переменным током. После определения типа тока обозначена идея создания колонки электроснабжения для электрического транспорта. В связи с этим изучены составляющие элементы и их основные возможные проблемы, на которые приводится работа, в блоке управления недостатком может стать защита от короткого замыкания и высокой нагрузки. Для кабеля проблемой стал его высокий нагрев и трудность в охлаждении. Также проанализирована литература о выпрямлении тока и типах фильтрации. Было принято решение использовать шестифазный и двенадцатифазный ток для уменьшения колебания синусоиды, что поспособствует движению зарядов, тем самым они будут преодолевать расстояние быстрее, ускорять процесс зарядки электромобиля и предотвращать усталость аккумулятора.

Новизна результатов на данный момент основывается на теоретической части и предположениях, а именно привлечение новых видов питания сети и выпрямителей не только для увеличения скорости зарядки батареи, но и для её наименьшего старения в процессе многоциклических перезарядок.

Область применения данного проекта на данный момент будет широка в транспортной отрасли, берегового и речного потенциала. Ежегодно предлагается поставка станций электропитания, но в связи с малым спросом и из-за высокой стоимости оригинальных зарядных станций, до потребителей добирается лишь небольшая доля ожидаемых услуг. Предлагается уменьшение ценового диапазона из-за использования более новых простых технологий и отечественных элементов.

Таблица 1 – Вероятные проблемы

Проблемы	Вероятность их возникновения
Короткое замыкание трехфазной сети на одной фазе	80-90%
Короткое замыкание трехфазной сети на двойным замыканием фаз	20-25%
Однофазное замыкание трехфазной сети на землю	70-80%
Двойное замыкание фаз трехфазной сети на землю	10-15%
Возгорание(зависит от многих факторов)	Рассчитывается

Литература:

1. Кузнецов М.И., Основы электротехники.-1958.-424с
2. Электропожаробезопасность высоковольтных судовых электроэнергетических систем; Учебник для вузов / А.П. Баранов, А.В. Радаев.- СПб.:Изд-во ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова, 2015.-248 с.,ил.
- 3.Электрическая часть электростанций и подстанций: учебное пособие / В.А. Старшинов, М.В. Пираторов, М.А. Козина; под ред. В.А. Старшинов.- 2-е изд.,стер.-М.:Издательский дом МЭИ, 2020.-296 с.
4. Электротехника; Справочник ; том 1/В.Л. Лихачев- Изд-во «СОЛОН-Р», 2001-558 с.
- 5.Руденко В.С.,Сенько В.И., Чиженко И.М. Основы преобразовательной техники: Учебник для вузов.-2-е изд., перераб. И доп.-М.: Высш. Школа,1980.-424 с., ил.
6. Куликов Ю.А. Переходные процессы в электрических системах: Учеб. Пособие.-Новосибирск: НГТУ, М.: ООО «издательство АСТ»,2003.-283 с.

ДИАГНОСТИКА И НАДЕЖНОСТЬ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ

О.А. Власов, В.О. Радченко

**Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, vlasovoleg7lion2000@mail.ru**

Научный руководитель: Малоземов Б.В., к.т.н., доцент

Литий-ионные аккумуляторные батареи являются наиболее перспективным направлением в области накопителей энергии. В данной статье приведен обзор на данный вид аккумуляторов. Также приведено сравнение основных типов батарей. Затрагивается вопрос долговечности и надежности аккумуляторных батарей

Lithium-ion batteries are the most promising direction in the field of energy storage. This article provides an overview of this type of batteries. A comparison of the main types of batteries is also given. The issue of durability and reliability of batteries is touched upon.

Автономную работу всевозможных устройств, от мобильных гаджетов до персонального электротранспорта, обеспечивают аккумуляторы. С учетом необходимых значений емкости и напряжения,

они объединяются в аккумуляторные батареи. Ключевые характеристики АКБ – емкость, напряжение, масса, время восполнения заряда, допустимый температурный режим – зависят от типа используемой химии.

Для автономного питания современной техники успешно используются литий-ионные аккумуляторы. Они имеют большой циклический ресурс, малый саморазряд, широкий температурный диапазон и солидную удельную емкость. Катод у таких элементов выполнен из производных лития, а заряд переносят ионы Li. Далее мы подробнее рассмотрим устройство Li-ion аккумуляторов и принцип их работы.

Принцип работы АБ

Литий-ионная батарея - это перезаряжаемая батарея, в которой ионы лития перемещаются между анодом и катодом, создавая поток электричества, полезный для электронных приложений. В разрядном цикле литий в аноде (углеродном материале) ионизируется и выбрасывается в электролит. Ионы лития проходят через пористый пластиковый сепаратор и вставляются в отверстия атомного размера в катоде (оксид лития). В то же время электроны освобождаются от анода. Это становится электрическим током, идущим во внешнюю электрическую цепь (см. Рисунок 1). При зарядке ионы лития переходят от катода к аноду через сепаратор. Поскольку это обратимая химическая реакция, аккумулятор можно.

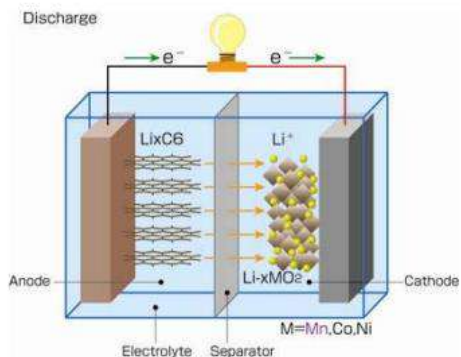


Рис.1 – Механизм разряда литий-ионного аккумулятора.

Литий-ионный аккумуляторный элемент состоит из четырех основных компонентов: катода, анода, электролита и сепаратора. В таблице 1 показаны функции основных компонентов состав материалов.

Таблица 1 – Компоненты, функции и основные материалы литий-ионного аккумулятора

Компоненты	Функции	Материалы
Катод	Испускать ионы лития анода во время зарядки Принимать ионы лития аккумулятора во время разряда	Порошок оксида металлического лития
Анод	Принимать ионы лития от анода во время зарядки Испускать ионы лития во время разряда	Графитовый порошок
Электролит	Пропускайте ионы лития между катодом и анодом	Литиевые соли и органические растворители
Разделитель	Предотвратить короткое замыкание между катодом и анодом Пропускают ионы лития через поры в сепараторе	Микропористые мембраны

Преимущества литий-ионных аккумуляторов для автомобилей

Литий-ионные батареи являются наиболее подходящей существующей технологией для электромобилей, поскольку они могут выдавать большую энергию и мощность на единицу массы батареи, что позволяет им быть легче и меньше, чем другие аккумуляторные батареи (см. рисунок 2). Эти особенности также объясняют, почему литий-ионные батареи уже широко используются в бытовой электронике, такой как сотовые телефоны, портативные компьютеры, цифровые фотоаппараты / видеокамеры и портативные аудио / игровые плееры. Другие преимущества литий-ионных батарей по сравнению со свинцово-кислотными и никель-металлогидридными батареями обладают высокой энергоэффективностью, отсутствием эффектов памяти, и относительно длительный срок службы (см. Таблицу 2).

Эффект памяти в никель-кадмиевых батареях означает снижение емкости после неглубокой разрядки батареи. Батарея запоминает меньшую емкость и после этого не может заряжаться полностью. Литий-ионные батареи не обладают этим эффектом памяти, поэтому батарею всегда можно перезарядить даже до того, как ее запасенная энергия будет исчерпана.

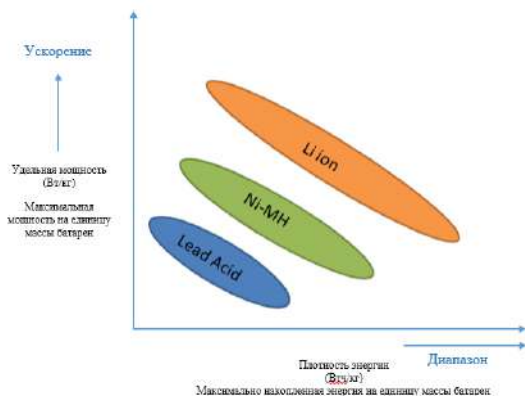


Рис.2 – Мощность и энергия в зависимости от типа батареи.

Таблица 2 – Технические характеристики для существующих типов батарей

Тип АБ	Свинцово-кислотные	Ni-Cd	Ni-MH	Литий-ионные
Плотность энергии (Втч/кг)	35	40-60	60	120
Удельная мощность (Вт/кг)	180	150	250-1000	1,800
Циклов зарядки	4,500	2000	2000	3500
Стоимость (\$/кВтч)	269	280	500-1000	Бытовая техника: 300-800; Транспорт: 1000-2000
Характеристики аккумулятора	Высокая надежность, бюджетный	Эффект памяти	Лучшее соотношение цена-качество	Лучшие массогабаритные качества
Область применения	Автомобильный аккумулятор, резервное питание	Аккумулятор для фонариков	Бортовой накопитель энергии	Бытовая техника, бортовой накопитель энергии

Рассматривая достоинства литий-ионных аккумуляторных батарей нельзя не отметить плотность энергии данных аккумуляторов.

Литий-ионные батареи имеют большой потенциал для дальнейшего увеличения плотности энергии за счет использования современных анодных и катодных материалов. Плотность энергии литий-ионных аккумуляторов быстро увеличивается (см. рисунок 3). Напротив, удельная энергия никель-кадмиевых (Ni-Cd) и никель-металлогидридных (Ni-MH) батарей стабилизировалась с 1995 и 2000 годов соответственно (МЕТІ, 2009а).

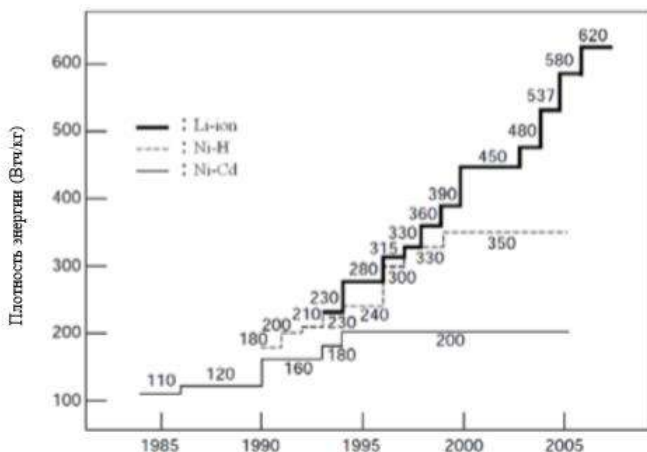


Рис. 3 – Повышение плотности энергии отдельных типов батарей по годам

Диагностика и надежность литий-ионных аккумуляторных батарей.

Стремительное внедрение литий-ионных аккумуляторных батарей в автомобильную промышленность становится причиной совершенствования характеристик аккумуляторов данного типа. Наиболее остро стоят проблемы долговечности и безопасности.

Долговечность как свойство аккумуляторных батарей длительно сохранять работоспособность до отказа или предельного состояния остаточной емкости может быть количественно оценена несколькими показателями, среди которых в первую очередь следует назвать среднее время работы (наработка) T аккумуляторной батареи до отказа. Если известен закон распределения пускового тока i , то можно определить математическое ожидание, которое имеет физическое содержание среднего значения, то есть:

$$M[T] = \int_0^{\infty} if(i)di = \int_0^{\infty} P(i)di = \int_0^{\infty} [1 - F(i)]di = T_{cp} \quad (1)$$

Как показатель долговечности целесообразно применять среднюю наработку на отказ, которая является отношением суммарной наработки T_{Σ} однотипных аккумуляторных батарей к количеству их отказов $n_{отк}$ в течении этой наработки:

$$T_{cp} = \frac{T_{\Sigma}}{n_{отк}} = \frac{1}{\omega_{cp}}, \quad (2)$$

где ω_{cp} - среднее значение параметра потока отказов.

Также важным показателем долговечности является среднее время наработки T_{pi} между техническими обслуживаниями и ремонтами, во время которых аккумуляторные батареи проходят обслуживание, подзарядку, контроль технического состояния. При этом следует различать нормативные значения T_{pi} , которые устанавливаются нормативными документами, и фактические значение T_{pi} , которые определяются по статистическим данным. Набор $T_{pi}(i=1,2,...k)$ межремонтных пробегов определяется структурой принятого ремонтного цикла, который относится к видам технических обслуживаний, текущих и капитальных ремонтов [6].

Гарантийный срок службы аккумуляторных батарей после установки на тепловоз $T_{ГАР}$ – это срок службы, в течение которого завод производитель аккумуляторов гарантирует исправность батареи и несет материальную ответственность за неисправности возникающие при соблюдении технических условий эксплуатации. Срок службы (ресурс) до списания аккумуляторов $T_{СЛ}$ – это календарная продолжительность эксплуатации аккумуляторных батарей до выхода из строя или иного предельного состояния, после которого восстановление работоспособности и дальнейшая эксплуатация невозможны или экономически нецелесообразны.

Надежность аккумуляторной батареи определяется комплексным свойством, для оценки применяют комплексные показатели, зависящие одновременно от безотказности, долговечности, ремонтпригодности, сохраняемости. Коэффициент готовности K_r является показателем,

величина которого зависит от частоты отказов и длительности восстановления работоспособности.

$$K_r = \frac{T_{\text{э}}}{T_{\text{э}} + T_{\text{СП}}}, \quad (3)$$

где $T_{\text{э}}$ – суммарное время эксплуатации парка локомотивов в работоспособном состоянии за анализируемый период; $T_{\text{СП}}$ – суммарное время простоя локомотивов в ремонте по причине отказа системы пуска дизеля за этот же период.

Коэффициент отказа систем пуска:

$$K_{\text{СП}} = \frac{T_{\text{СП}}}{T_{\text{э}} + T_{\text{СП}}} = 1 - K_r. \quad (4)$$

Безопасность: Литий-ионные батареи подвержены короткому замыканию и перезарядке. Свинцово-кислотные, никель-кадмиевые и никель-металлогидридные батареи надежно работают даже после короткого замыкания и перезарядки, поскольку они имеют низкую энергоемкость и используют легковоспламеняющийся электролит. Однако при коротком замыкании литий-ионной батареи создаются большие потоки электричества, и температура батареи повышается до нескольких сотен градусов за секунды, нагревая соседние элементы и приводя к реакции полного возгорания батареи. Когда литий-ионные аккумуляторы непреднамеренно перезаряжаются, химическая структура анода и катода разрушается, и некоторые из ионов лития образуют отложения металлического лития в форме снежинок, называемые «дендритами», которые могут вызвать короткое замыкание аккумулятора или, что еще хуже, - сценарий случая, взорваться и загореться [3].

Заключение

Рассматривая современные тенденции развития аккумуляторных батарей, было совершено сравнение различных аккумуляторов. В ходе анализа, выяснилось, что литий-ионные аккумуляторы имеют лучшие массогабаритные показатели и способны запасти большее количество энергии на единицу массу. Также выяснилось, что предел плотности энергии литий-ионных батарей не достигнут. Поэтому ведется разработки для увеличения плотности энергии.

Были приведены расчеты, которые позволяют установить такие важные характеристики АБ, как долговечность и надежность. Для

проведения подобных расчетов необходимо иметь достаточно широкую статистику отказов и ремонта аккумуляторных батарей.

Литература:

1. Балагура А.С., Кочев А.В. Показатели надежности аккумуляторных батарей тягового подвижного состава [электронный ресурс]// Научная статья по специальности «Электротехника, электронная техника, информационные технологии» - URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/pokazateli-nadezhnosti-akkumulyatornyh-batarey-tyagovogo-podvizhnogo-sostava>.

2. Marcy Lowe, Saori Tokuoka, Tali Trigg and Gary Gereffi Lithium-ion Batteries for Electric Vehicles: THE U.S. VALUE CHAIN. // Contributing CGGC researcher: Ansam Abayechi, October 5, 2010 P. 6-17.

ТРОЛЛЕЙБУС С ГИБРИДНОЙ ЭЛЕКТРОУСТАНОВКОЙ

О.А. Власов, И.Г. Савлук

**Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, vlasovoleg7lion2000@mail.ru**

Научный руководитель: Щуров Н.И., д.т.н., профессор

Рассмотрен способ переоборудования троллейбуса с применение накопительного модуля из суперконденсаторов. Представлен метод расчета необходимых суперконденсаторов, их количества и характеристик.

A method of retrofitting a trolleybus using a storage module made of supercapacitors is considered. A method for calculating the required supercapacitors, their quantity and characteristics is presented.

В настоящее время трудно представить крупные города России без городского электрического транспорта, такого как троллейбус, трамвай или электробус. В свою очередь для трамваев и троллейбусов требуется разработка контактной сети, а для трамваев, в частности, выделение отдельной путевой структуры рельс.

Идея переоборудования троллейбусов вовсе не новая. Смысл ее состоит в том, чтобы избавить внешний вид городских дорог от контактной сети, а также повысить маневренность электрического транспорта и дать возможность троллейбусам доезжать до отдаленных частей города, которые не оборудованы контактной сетью и нуждаются

в передвижении на общественном транспорте. В таком случае не требуется полностью избавиться троллейбус от воздушной контактной сети, достаточно оборудовать его системой динамической подзарядки на базе литиевых батарей, тем самым повысить автономный ход.

Подобный подвижной состав можно назвать троллейбус с гибридной электроустановкой или электробус с динамической подзарядкой.

На данный момент наибольшее распространение среди систем бортовых источников энергии получили аккумуляторы на основе лития а Литий-ионные аккумуляторы отличаются:

низким саморазрядом;

большой энергетической плотностью (порядка 150-200 Вт·ч/кг);

отсутствием необходимости в обслуживании.

Рассмотрим пример задачи:

Для изменения скорости подвижного состава массой в 8,9 тонн от 0 до 60 км/ч, необходимо сообщить ему энергию в размере:

$$E_{\kappa} = \frac{m(1 + \gamma)V^2}{2} = \frac{8,9 \cdot (1 + 0,1) \cdot 16,67^2}{2} \approx 1,36 \text{ МДж}. \quad (1)$$

Поскольку при преобразовании электрической энергии накопителя в кинетическую энергию движущегося ПС неизбежны потери, стоит учесть это увеличив значение энергии до

$$\frac{E_{\kappa}}{\eta_{cp}} = \frac{1,36}{0,85} = 1,6 \text{ МДж}.$$

Рассчитаем сколько актов пуска ТЭД произойдет при запасе хода в 20 км, при средней длине перегона в 650 м:

$$\frac{20}{0,65} \approx 31 \text{ (актов)} \quad (2)$$

Запас энергии рассчитывается по формуле 3:

$$E_{\text{запас}} = N_{\text{акт}} \cdot E_{\kappa} = 31 \cdot 1,6 = 49,6 \text{ МДж} \quad (3)$$

$$49,6 \text{ МДж} = 13,78 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

При напряжении аккумуляторной батареи в 288 В, необходимая ёмкость накопителя составит:

$$C_{AB} = \frac{E_{запас}}{U} = \frac{13,78 \cdot 10^3}{288} = 47,85 \text{ А} \cdot \text{ч.} \quad (4)$$

Определить ёмкость суперконденсаторного накопителя энергии можно, зная теоретически возможную энергию электрического торможения, она не превышает кинетической энергии тормозящего подвижного состава:

$$E_k = \frac{mV_n^2}{2} - \frac{mV_k^2}{2}, \quad (5)$$

где V_n – скорость начала торможения – 60 км/ч, V_k – скорость в конце электрического торможения – 5-7 км/ч [1], m – масса подвижного состава.

Тогда,

$$E_k = \frac{8900 \cdot \left(\frac{60}{3,6}\right)^2}{2} - \frac{8900 \cdot \left(\frac{5}{3,6}\right)^2}{2} = 1,23 \cdot 10^6 \text{ Дж.} \quad (7)$$

Тогда ёмкость суперконденсатора, учитывая превышение напряжения на двигателе в 2 раза а также КПД элементов электропривода $\eta_p = 0,85$; $\eta_{ов} = 0,9$; $\eta_{np} = 0,98$ [1]:

$$C = \frac{2E_k \eta_p \eta_{ов} \eta_{np}}{U_{\max}^2 - U_{\min}^2} = \frac{2 \cdot (1,23 \cdot 10^6) \cdot 0,85 \cdot 0,9 \cdot 0,98}{576 - 288^2} = 7,4 \text{ Ф.} \quad (8)$$

Согласно техническим характеристикам, номинальное напряжение одного суперконденсатора составляет 2,7 В.

Исходя из этого количество суперконденсаторов в данной аккумуляторной батарее равно:

$$n = \frac{U_{\max}}{U_{ном.супер}} = \frac{576}{2,7} = 213 \text{ (шт.)} \quad (9)$$

Поскольку ток двигателя в пусковом режиме может достигать значений превышающих часовой ток двигателя в 2 раза [2], то ток протекаемый через импульсный регулятор может составлять порядка

630А, суперконденсатор должен поддерживать максимальный ток выше 630А.

Троллейбусы «Мегаполис» оснащены автономным ходом от литий-титанатных аккумуляторных батарей (рисунок 1), размещенных вдоль крыши, либо в задней части, в зависимости от модификации и требований заказчика. АКБ находятся в специальных защитных блоках, которые регулируют микроклимат для эффективной работы батарей.



Рис.1 – Литий-титанатные аккумуляторы в задней части электробуса

Дальность автономного хода электробуса составляет 20 км. Зарядка батарей осуществляется во время движения под контактной сетью. Технология динамической подзарядки позволяет увеличить срок эксплуатации одного из самых дорогостоящих элементов машины – накопителей энергии и уменьшить нагрузку на электрическую сеть. При использовании электробусов с динамической подзарядкой нет необходимости в инвестировании средств в строительство дорогостоящей зарядной инфраструктуры. [1]



Рис.2 – Автоматическое подключение токоприемников к контактной сети при помощи «ловушки»

Подключение к контактной сети электробуса, как показано на рисунке 2, происходит в автоматическом режиме из кабины водителя, при помощи специальных «ловушек», установленных непосредственно на контактной сети, а также пневматическими или гидравлическими штангоулавителями. Контроль подключения производится через камеры, изображение от которых отображается на дисплее в кабине водителя. Для удобства подключения к контактной сети в тёмное время суток на токоприёмниках установлены специальные фонари, включение которых так же производится из кабины водителя через кнопку на приборной панели.

Таким образом, рассмотрен способ переоборудования подвижного состава троллейбуса на электробус с динамической подзарядкой с применением литиевых аккумуляторов. Суть метода состоит в выборе необходимого количества суперконденсаторов для компоновки их в единую тяговую батарею. Подобная тяговая батарея позволит поднять электробусу автономный ход в 20 км.

Литература:

1. Бирюков В. В. Тяговый электрический привод: учебное пособие для вузов / В. В. Бирюков, Е. Г. Порсев. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва: Юрайт, 2017. – 315 с. – (Университеты России).

2. Бирюков В. В. Энергетические аспекты функционирования транспортных систем: монография / В. В. Бирюков. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – 264 с. – (Монографии НГТУ).

3. Ефремов И. С. Теория и расчет электрического оборудования подвижного состава городского электрического транспорта: учебник для вузов / И. С. Ефремов, Г. В. Косарев. – Москва: Высшая школа, 1976. – 480 с.

4. Инновационные технологии в системе электроснабжения транспортных средств : монография / Н. И. Щуров, В. В. Бирюков, С. В. Мятаж [и др.] ; под ред. В. В. Бирюкова ; Новосиб. гос. техн. ун-т. - Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2021. - 160 с. - 30 экз. - ISBN 978-5-7782-4501-3. - Текст : непосредственный.

5. Энергосберегающие технологии на подвижном составе электрического транспорта : монография / Н. И. Щуров, Д. Л. Калужский, В. В. Бирюков, С. В. Мятаж, Б. В. Малозёмов, А. В. Мятаж, А. А. Штанг, М. В. Ярославцев, М. Е. Вильбергер. - Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2020. - 190 с. - 100 экз. - ISBN 978-5-7782-4254-8.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ТЯГОВЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ШКОЛЬНОГО АВТОБУСА

С.А. Внуков

Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, abakan.1998@mail.ru

Научный руководитель: Бирюков В.В., к. т. н., доцент

Принцип скалярного управления частотно-регулируемого асинхронного электропривода базируется на изменении частоты и текущих значений напряжения, магнитного потока и тока двигателя. Скалярный принцип частотного управления является наиболее распространённым в электроприводах с асинхронным двигателем.

The principle of scalar control of a variable frequency asynchronous electric drive is based on changing the frequency and current values of voltage, magnetic flux and motor current. The scalar principle of frequency control is the most common in electric drives with an asynchronous motor.

При частотном управлении электромагнитный момент асинхронного двигателя зависит от частоты и напряжения переменного тока, питающего статор электрической машины. Наличие двух независимых каналов управления (уровнем напряжения и частотой) даёт возможность реализовать в системе преобразователь частоты – асинхронный двигатель различные законы управления.

В качестве исходных данных приняты технические параметры школьного автобуса ПАЗ Vector NEXT, внешний вид которого представлен на рис. 1. Выбор мощности ТЭД произведён для указанного ПС.



Рис.1 – Внешний вид ПС

Параметры выбранного ПС представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристика подвижного состава [1]

Тип ЭПС	Вместимость, пасс.	Полная масса, кг	Диаметр колеса, мм	Максим. скорость, км/ч
ПАЗ Vector NEXT	26	10000	838	100

Электрическая мощность ТЭД ПС массой m движущегося со скоростью V :

$$P = (F * V) / (\eta_{ТЭД} * \eta_{ред}), \quad (1)$$

где F – тяговое усилие в составе выражения для ускорения $a = (F * z - \omega_0 * m) / (102 * (1 + \gamma) * m)$.

Исходя из данных зависимостей, построены кривые зависимости $P(V)$ для различных значений ускорений (рис. 2). Результаты расчётов представлены в таблице 2.

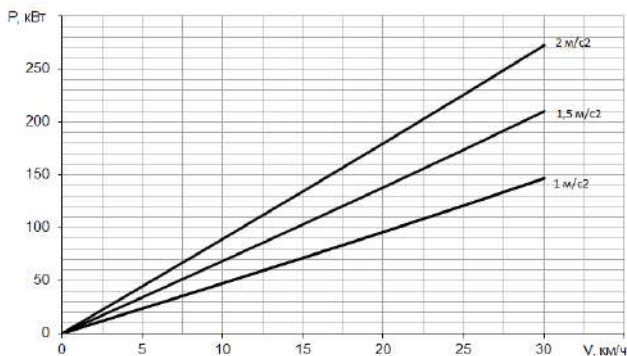


Рис. 2 – Зависимость $P(V)$ при различных значениях ускорения

Учитывая допустимую перегрузочную способность асинхронного ТЭД равную 3, для обеспечения расчётной мощности принят асинхронный двигатель АТД-4 мощностью 90 кВт (таблица 3).

Таблица 2 – Результаты расчёта характеристик $P(V)$ [2]

V , км/ч	ω_0 , Н/кН	F , кГс			P , кВт		
		при $a=1$, м/с ²	при $a=1,5$, м/с ²	при $a=2$, м/с ²	при $a=1$, м/с ²	при $a=1,5$, м/с ²	при $a=2$, м/с ²
0	16	1333	1920	2506	0	0	0
5	16	1334	1921	2507	24	34	45
10	17	1338	1925	2511	48	68	89
15	17	1344	1931	2517	72	103	134
20	18	1353	1940	2526	96	138	180
25	19	1364	1951	2537	121	174	226
30	21	1378	1965	2551	147	210	272

Таблица 3 – Параметры тягового электродвигателя [3]

Тип	АТД-4
Номинальная мощность, кВт	90
Номинальное линейное напряжение, В	400
Номинальный линейный ток, А	160
Частота питания, Гц	70
Частота вращения синхронная номинальная, об/мин	2100
Частота вращения синхронная максимальная, об/мин	4800
Номинальный момент на валу, Н*м	525
КПД, %	90
Скольжение, %	1,7
Сопротивление обмотки статора, Ом	0,089
Масса, кг	350

Литература:

1. Бирюков В. В. Тяговый электрический привод : учебное пособие / В. В. Бирюков, Е. Г. Порсев ; Новосиб. гос. техн. ун-т. – Новосибирск, 2013. – 312 с. : ил., табл., схемы.
2. Шуруп Н. И. Теория электрической тяги : учебное пособие. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2004. – 100 с.

3. НПО “Спецэлектро” [Электронный ресурс]. URL: <http://se33.ru/traction-motors/29-traction-motors/157-atd.html> (Дата обращения 15.10.2021).

ДПТ ДЛЯ РОБОТИЗИРОВАННОЙ КОЛЕСНОЙ ПЛАТФОРМЫ

Н. А. Коновалов, В. А. Козлюк, Д. Е. Бурмасов
Томский государственный университет систем управления и
радиоэлектроники, г. Томск, qarinindi@gmail.com
Научный руководитель: Ю. А. Шурыгин, д.т.н, профессор

*Обзор ДПТ для роботизированной колесной платформы.
Overview DC motor for robotic wheeled platform.*

Робототехника – наиболее перспективная и активно развивающаяся в XXI веке область электроники. Применение роботов в промышленности позволяет автоматизировать сложные технологические процессы, исключить человеческий фактор, увеличить производительность труда. От первых промышленных роботов, с весом в несколько тонн, которые начали внедряться в начале 60-х годов XX века [1], и до современных роботов, прослеживается стремление увеличить мобильность автономных устройств. Роботы должны не только четко понимать, что они делают, куда двигаются, ориентироваться в пространстве, но и предугадывать траектории движения других участников, например, в условиях цеха на производстве [2]. Внедрение новых возможностей робототехнических устройств до их реализации в промышленности, подразумевает апробацию функционала на «игровых», тестовых задачах. Решение задачи автономного перемещения робота в пространстве по сложной пересеченной местности является, безусловно, одной из важнейших проблем. Решают эту проблему с двух сторон – одни, как разработчики из Boston Dynamics стремятся воспроизвести функционал биологических видов [3], другие, такие как американская компания Tesla – обучить машину различать объекты и ориентироваться по знакам, используя нейронные сети [4].

Еще один способ – решение логистических задач в специализированных конкурсах, которые через стимулирование фантазии энтузиастов в решении игровых задач, помогают создать решения, которые в дальнейшем могут использоваться в более

серьезных разработках. Наиболее яркий представитель такого похода – конкурс RoboCup, в рамках которого разработчики проходят маршрут на самодельных робототехнических конструкциях [5].

Разработанная нами робототехническая платформа использует двигатели постоянного тока для перемещения в пространстве. Рассмотрим вкратце ее устройство.

Колесная платформа состоит из двух основных компонентов (рис.1): процессора, который контролирует сервомоторы и самих сервомоторов.

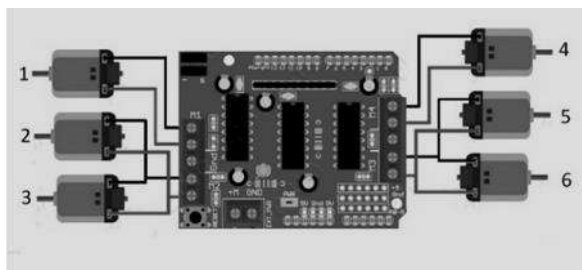


Рис.1 – Схема платформы (1-6 – сервомоторы)

Т.к. на современном рынке представлено множество двигателей, подходящих по функционалу для решения задачи перемещения платформы, рассмотрим их основные особенности (таблица 1).

Таблица 1 – Характеристики двигателей

	Мотор редуктор с пластиковыми шестеренками	Проект ГПО-1801	Lego Mindstorms (NXT\EV3)
Стоимость	100 рублей	727 рублей	Начиная от 4000 рублей
Рабочее и номинальное напряжение	3-12В; 6В	12В	Не указывается
Кол-во оборотов	140 об/мин (3В), около 280 об/мин (6В);	1360 об/мин	160-170 об/мин

Далее перечислим преимущества и недостатки выбранных для обзора двигателей. Начнем с мотора редуктора с пластиковыми шестеренками, изображенного на рисунке 2.



Рис.2 – Изображение мотора редуктора

Главным его преимуществом является доступность, однако данный мотор больше подходит для начального уровня изучения робототехники, так как имеет пластиковое исполнение, а также обладает малым количеством оборотов. К преимуществу можно отнести малый вес: он составляет 31 грамм – при использовании 6 устройств это добавит 186 грамм к весу платформы, что достаточно мало.

Следующим аналогом является двигатель из Lego Mindstorms.

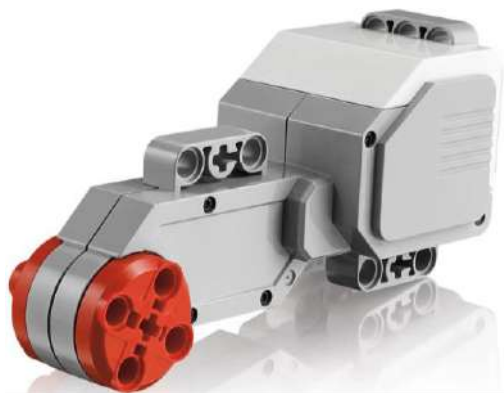


Рис.3 – Lego Mindstorms EV3

Из недостатков: двигатель также имеет пластиковое исполнение, а также имеет большой вес – около 500 грамм. Имеет небольшое количество оборотов.



Рис.4 – Электродвигатель с редуктором

Электродвигатель, представленный на рис.4, выбран в качестве базового варианты и установлен на разработанной колесный платформе. Отличается исполнением – оно металлическое, что говорит о более высокой износостойкости, чем у рассмотренных ранее аналогов. Стоит и отметить количество оборотов, которое превосходит в несколько раз аналоги, что говорит о большей тяге. Вес около 120 грамм является средним, но при значительно более надежной конструкции это недостаток, который покрывается преимуществом надежности и мощности.

В процессе выполненной работы была модифицирована платформа, на которую установлена рука манипулятора. На следующий этап работы была поставлена задача оценить энергоэффективность платформы как с точки зрения колесной базы так и с точки зрения устройства целиком.

Литература:

1. Что такое промышленный робот [Электронный ресурс] // Робототехника URL: http://rus-robot.com/articles/chto_takoe_promyshlennyj_robot/ (дата обращения: 20.10.2021).
2. Тенденции развития робототехники в будущем [Электронный ресурс] // Фруктонад URL: <https://sixdof.ru/tendencii-razvitiya-robototehniki-v-budushhem/> (дата обращения: 20.10.2021).
3. Возможности робота-собаки шокировали интернет [Электронный ресурс] // RG.RU: специальный проект. 2018. 13 авг. URL: <https://rg.ru/2018/02/13/vozmozhnosti-robota-sobaki-shokirovali-internet.html> (дата обращения: 20.10.2021).

4. Tesla показала, как видит нейронная сеть Autopilot 3.0 [Электронный ресурс] // Habr.ru URL: <https://habr.com/ru/news/t/486600/> (дата обращения: 20.10.2021).

5. Правила лиги RoboCup Rescue Line 2015 [Электронный ресурс] // RoboCup в России URL: <http://www.robocuprussiaopen.ru/data/rules/2016/rcj-rescue-line-rus-2016-0126.pdf> (дата обращения: 20.10.2021).

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ТОКОСЪЕМА В СИСТЕМАХ «КОНТАКТНАЯ СЕТЬ – ТОКОПРИЕМНИК»

К.А. Лукьяшенко

**Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, Lukyashenko.kir@gmail.com**

Научный руководитель: Нейман Л.А., д.т.н., доцент

В статье рассмотрен вопрос взаимодействия токоприемников подвижного состава с контактными проводами с точки зрения обеспечения качественного токосъема. Рассмотрены основные способы повышения качества токосъема в системах «контактная сеть – токоприемник» путем моделирования системы токоприемника.

The paper considers the interaction of rolling stock current collectors with contact wires in terms of ensuring the quality of current collectors. The main way to improve the quality of current collector in the systems "contact network - current collector" by modeling the system of current collector.

В связи с повышением скорости транспорта важной проблемой является повышение качества токосъема и увеличение ресурса контактных проводов и токоприемников. Продолжается конструктивное совершенствование токоприемников и поиск материалов их токосъемных элементов. Похожие работы ведутся и по совершенствованию контактной сети, материалов для изготовления контактных проводов. Проблемой является необходимость обеспечения низкого сопротивления контактной пары «контактная сеть – токоприемник» при одновременном снижении износа от сил трения и обеспечении необходимой силы прижатия токосъемного элемента к контактному проводу. Так же очень сложной является проблема негативных воздействий окружающей среды на контактную пару. Токосъем осуществляется при динамических нагрузках контактного

провода и токоприемника, имеющих ограниченные размеры. В результате возникает большая плотность тока, протекающего через скользящее переменное контактное соединение. Повышение надежности контакта достигается за счет увеличения нажатия токоприемника на контактный провод [1]. Это в свою очередь вызывает резкое увеличение износа контактной пары. Задача обеспечения надежного и качественного токосъема может быть решена при улучшении одного или же обоих элементов контактной пары «контактная сеть – токоприемник».

Известна токосъемная штанга троллейбуса, корпус токосъемной штанги выполнен из концентричных слоев полимерных волокон, расположенных по винтовой линии, пространство между которыми заполнено полимерным связующим, с центральным отверстием по всей длине и достаточного диаметра для размещения токоведущего кабеля. На рис. 1 представлен чертеж штанги токоприемника, который состоит из двух телескопически соединенных между собой секций - нижней 1, закрепленной на транспортном средстве, и верхней 2 для установки токосъемной головки 7 с изолятором 6. Штанги токоприемника должны иметь внутри полость для возможности прохождения токоведущего провода 3 к электроагрегатам 10 от токосъемного элемента. Токоведущий провод при выходе из полости верхней секции штанги должен иметь возможность наматываться на барабан катушки 8, пружина 9 которой обеспечивает постоянный натяг провода. Провод, намотанный на барабан, допускает размотку при удлинении штанги и намотку на барабан излишек провода при уменьшении длины штанги. Штанга крепится к основанию 5 шарниром с держателем 4. Материал, используемый при изготовлении телескопических секций - нижней и верхней, а также держателя катушки и шарнира может быть как металлом, так и стеклопластиком (или в различных комбинациях). Сущность полезной модели определяется чертежом и описанием принципа работы. Приведенное выше описание работы заявляемого штангового токоприемника для электротранспортного средства показывает, что данное устройство может быть реализовано и на практике [2]. Данное патентное решение позволяет улучшить качество токосъема путем совершенствования конструкции токоприемника.

Для учета кинематических, жесткостных, массовых и диссипативных особенностей конструкции, рассматривают каждый отдельный элемент конструкции и составляют матрицы для описания данных особенностей рис.2.

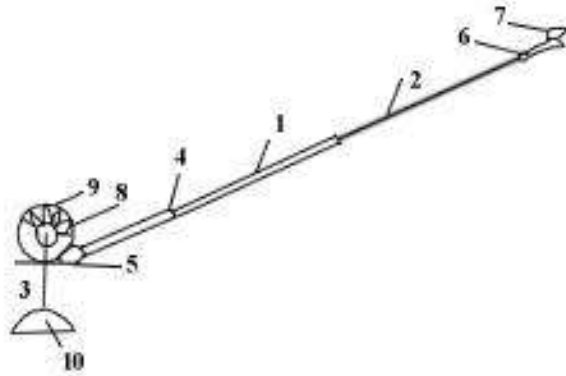


Рис. 1 – Конструкция штангового токоприемника

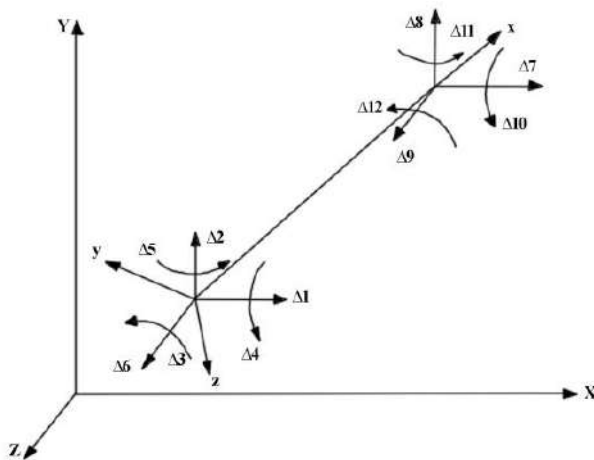


Рис. 2 – Двенадцати степенной стержневой элемент штангового токоприемника

Для создания модели взаимодействия контактной пары, токоприемник представляют в виде приведенной массы, то есть массой, движущейся в вертикальном направлении и обладающей такой же кинетической энергией, что и та часть токоприемника, которая заменяется приведенной массой. На рис. 3 изображена трёхмассовая модель токоприемника, в отдельную массу выведен полз токоприемника и приведен к точке контакта, что позволяет учесть его подпружинивание.

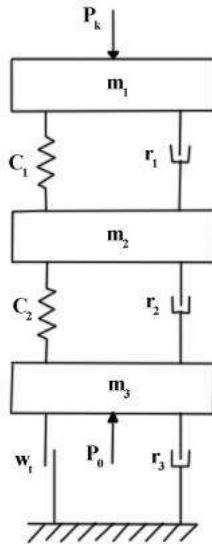


Рис. 3 – Трёхмассовая типовая расчетная схема токоприемника, где m_i – приведенные массы частей токоприемника; C_i – жесткости пружин; P_0 – нажатие, вызываемое токоприемником; P_k – нажатие, вызываемое контактным проводом; r_i – коэффициенты вязкого трения частей токоприемника; w_i – сила сухого трения

Проектирование токоприёмников для целей повышения качества токосъёма имеет ряд своих особенностей, и применение моделей токоприемника с приведением массы не позволяет качественно решать задачи, возникающие в процессе этого проектирования. Это связано с тем, что приведенная масса, как правило, определяется эмпирически.

Литература:

1. Беляев И. А., Михеев В. П., Шиян В. А. Токосъём и токоприемники электроподвижного состава / под ред. И. А. Беляева. – М.: Транспорт, 1976. – 184 с.
2. Патент на полезную модель № 164793 U1 Российская Федерация, МПК В60L 5/00, В60L 5/12. Штанговый токоприемник для электротранспортного средства : № 2015153177/11 : заявл. 11.12.2015 : опубл. 20.09.2016 / П. А. Тюков ; заявитель Акционерное общество "Авиационная электроника и коммуникационные системы" (АО "АВЭКС").

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ЭЛЕКТРОПОЕЗДОВ

В.О. Радченко, О.А. Власов

**Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, radchenkovlad.2000@mail.ru**

Научный руководитель: Малозёмов Б.В., к.т.н., доцент

В работе «Современные методы диагностирования электрических цепей электропоездов» описывается область применения этих методов диагностики, так же описывается классификация методов диагностирования электрических цепей, оценка и качество систем диагностирования, а также усовершенствование методов диагностики электрических цепей электропоездов.

The paper "Modern methods of diagnosing electric train circuits" describes the scope of these diagnostic methods, also describes the classification of methods for diagnosing electric circuits, evaluation and quality of diagnostic systems, as well as the improvement of methods for diagnosing electric train circuits.

Своевременное и высококачественное выполнение в полном объёме технического обслуживания и текущего ремонта в соответствии с установленной планово-предупредительной системой является важнейшим условием поддержания высокой надёжности и эффективности электропоездов. В свою очередь качество выполнения работ при ремонте и техническом обслуживании зависит от объёма выявленных неисправностей и чёткости их устранения, наличия и степени совершенства средств технической диагностики. Эффективность обслуживания и ремонта электропоезда будет намного выше, а затраты значительно ниже, если постановка на ремонт и выполнение ремонтного цикла будут производиться с учётом фактического состояния оборудования, определить которое можно путём организации тестового или функционального диагностирования.

Средства технического диагностирования (СТД) в зависимости от того, подключаются ли они к объекту диагностирования только на период проверки его состояния или соединены с ним, делят на внешние и встроенные.

Внешние СТД могут быть универсальными (общими), специализированными напольными (устанавливаемыми на перегоне). Универсальное (общее) СТД предназначено для диагностирования объектов различного конструктивного выполнения и функционального

назначения и позволяет осуществить проверку всего электропоезда или существенных узлов.

При выборе диагностических параметров необходимо выполнить исследовательские работы, эксплуатационные испытания и расчёт надёжности. Основу таких исследований составляет изучение условий эксплуатации и закономерностей развития отказов. На основе теории вероятности и математической статистики выбирают систему диагностических параметров, методику диагностирования и разрабатывают средства диагностирования по группе аппаратов и силовых цепей. Ключевой задачей является разработка и выбор датчиков для снятия информационных сигналов и преобразования их в форму, удобную для передачи на средства обработки полученной информации. Датчики должны обеспечивать точность измерений, иметь небольшие размеры, высокую помехоустойчивость и надёжность.

Техническая диагностика - это отрасль знаний, включающих в себя теорию и методы определения технического состояния объекта диагностирования. Техническая диагностика решает три типа задач. К первому типу относятся задачи по определению состояния, в котором объект находится в настоящее время - установление диагноза. Задачами второго типа являются задачи по предсказанию состояния, в котором окажется объект в некоторый момент времени - задачи прогноза. К третьему типу относятся задачи определения состояния, в котором находился объект в некоторый момент в прошлом - задачи генеза. Техническое диагностирование тягового подвижного состава сопряжено с высокой трудоёмкостью, это обусловлено сложностью его конструкции, интенсивностью эксплуатации и повышению требований к надёжности и безопасности, что не позволяет интуитивным и ручным способом определить его техническое состояние. Поэтому применение специализированных средств диагностирования даёт возможность достоверно определить техническое состояние локомотива. В основные задачи диагностирования входят: проверка исправности объекта, его работоспособности, правильности функционирования и поиск неисправностей. Решение этих задач возможно только в том случае, когда диагностирование проводится на трех стадиях: производства; эксплуатации и ремонта объекта.

В настоящее время на железнодорожном транспорте неразрушающим контролем занято более 14 тыс. работников различного уровня квалификации (от инженеров до рабочих). В эксплуатации находится около 10 тыс. дефектоскопов различных типов.

Ежегодно контролируется более 4,5 млн. км рельсового пути; 2,5 млн. сварных стыков рельсов, 4,5 млн. деталей и узлов подвижного состава; предотвращается более 70 тыс. потенциально возможных

изломов ответственных узлов технических объектов пути и подвижного состава. Обнаружение дефектов средствами неразрушающего контроля (НК) составляет 99,3-99,7 %. Действующие системы НК при ремонте подвижного состава позволяют обнаруживать множество опасных дефектов, предотвращая тем самым поступление дефектных деталей в эксплуатацию.

Системы НК должны включать модульный ряд механизированных и автоматизированных средств комплексного контроля, обеспечивающих выявление внутренних дефектов деталей, ремонтируемых по безразборной технологии. Они должны обеспечивать обнаружение опасных дефектов и производить оценку накопленной усталости конструкций (боковых рам и надрессорных балок тележек, колесных пар). Работа в этой области проводится по четырем важным направлениям: разработка методов и средств НК и технической диагностики (ТД), разработка единой системы контроля объектов, совершенствование диагностических технологий и организационное обеспечение НК и ТД. При создании технических средств НК и ТД реализован переход от ручного сканирования к механизированному и автоматизированному, разработаны эксплуатационно-технологическая документация и программное обеспечение, позволившие поднять на качественно новый уровень техническое обслуживание средств технической диагностики, обеспечить рабочие места нормативно-технической документацией, контрольными и стандартными образцами, создать благоприятные условия для работы операторов-дефектоскопистов, подготовки и повышения квалификации кадров в созданных на железных дорогах лабораториях и учебных центрах.

Создание систем технического диагностирования является составной частью комплекса работ по обеспечению качества функционирования машин и механизмов. Основная цель технического диагностирования состоит в организации эффективных процессов определения технического состояния тягового подвижного состава. В зависимости от задач диагностирования локомотивов применяют аппаратные или программные средства, встроенные или внешние технические средства, реализующие разработанный алгоритм диагностирования. При исследовании, разработке и реализации процессов технического диагностирования локомотивов решается и другая задача, связанная с разработкой и реализацией процесса управления как всего целого. Наряду с перечисленными задачами решаются и первоочередные - изучение физических свойств объектов и их неисправностей, построение математических моделей объектов и моделей неисправностей, анализ модели объекта с целью получения данных, необходимых для построения алгоритмов диагностирования.

Классификация основных предметов исследований технической диагностики рисунок 1.1.



Рис. 1 – Структурная схема классификации основных задач технического диагностирования

Существуют следующие виды систем технического диагностирования:

системы тестового диагностирования. Сигнал проверки формируется в блоках системы диагностирования и по каналам передачи информации подаётся на входы объекта диагностирования. Тестовые воздействия могут подаваться на основные входы объекта, (т.е. на те входы, которые используются для входа или выхода рабочих сигналов) и дополнительные, используемые специально для целей диагностирования (рисунок 1.2 а);

системы рабочего диагностирования. На основные входы объекта диагностирования поступают рабочие воздействия в соответствии с его рабочим алгоритмом функционирования, которые, как правило, не могут выбираться из условий эффективной организации процесса диагностирования (рисунок 1.2 б);

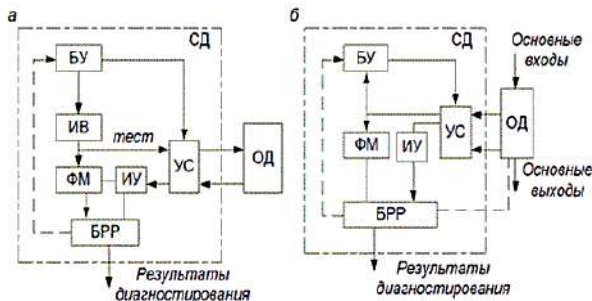


Рис. 2 – Структурные схемы систем тестового (а) и рабочего (б) диагностирования

Для диагностирования технического состояния локомотивов, их систем, узлов и агрегатов используются различные методы. Многообразие методов диагностирования обусловлено в основном двумя причинами: сложностью систем диагностирования, определяемой сложностью структуры локомотивов как объекта диагностирования и разнообразием задач технического диагностирования, вытекающих из требований, предъявляемых к обслуживанию и ремонту локомотивов. Методы диагностирования локомотивов различаются в зависимости от комбинации признаков, характеризующих особенности структуры и взаимодействия трёх основных частей системы технического диагностирования: объекта диагностирования, системы сбора, преобразования и передачи информации и системы обработки, накопления и отображения результатов диагностирования (рисунок 1.3).



Рис. 3 – Структурная схема методов диагностирования

Виброакустические методы диагностирования. Эти методы диагностирования получают широкое распространение в локомотивном хозяйстве, так как не требуют разборки агрегатов и узлов локомотивов.

Методы основаны на процессах, возникающих в узлах трения и сопряжения во время рабочего режима. Работа узлов, как правило, сопровождается шумами и колебаниями, по которым обслуживающий персонал определяет техническое состояние объекта, вслушиваясь в работу каждого узла. Вибрация механизма - его реакция на действие приложенных возмущающих сил. Обычно на механизмы одновременно воздействует несколько различных сил, приводящих его в такое состояние, когда нарушается равновесие, возникают посторонние шумы, удары, усиливается вибрация. Причинами неисправностей могут быть максимальные перемещения, скорости или ускорения вибрации, максимальные значения деформации, напряжения или усилия. В процессе работы узла неисправность даёт о себе знать усиленной

вибрацией или колебаниями. Различные дефекты имеют колебания разной частоты. Существуют несколько причин, вызывающих колебания механизма. Одна из них связана с неуравновешенностью движущихся деталей. Она вынуждает механизмы колебаться как единое целое относительно положения равновесия. Эти колебания характеризуются низкими частотами, сравнительно большими амплитудами перемещения и малыми ускорениями. Зависимость частоты вибрации от скоростного режима механизма является характерным признаком этого вида колебаний, позволяющим их легко обнаружить и выделить. Основная частота вибрации механизма равна частоте вращения вала, на котором находится несбалансированная масса. Амплитуда вибрации пропорциональна квадрату угловой скорости вращения вала и зависит от массы механизма и жёсткости крепления его к основанию. Вторым источником колебаний механизма являются соударения его деталей, вызванные увеличенными зазорами. Эти колебания характеризуются более высокими частотами колебаний, малыми амплитудами смещения и значительными ускорениями. Чаще всего детали и узлы испытывают простые синусоидальные колебания, которые характеризуются тремя связанными между собой величинами: колебательными смещениями $x(t)$, скоростью $V(t)$ и ускорением $a(t)$. Если колебание имеет форму чисто поступательного движения тела вдоль только одной оси, то мгновенное значение каждой из её координат называется перемещением и определяется по формуле (1):

$$x = X_{max} \cdot \sin(2\pi/T) \cdot t = X_{max} \cdot \sin \cdot \pi \cdot ft, \quad (1)$$

где, X_{max} - амплитуда колебательного смещения; T – период колебаний; $1/T$ = частота колебаний; t - текущее значение времени.

Скорость $V(t)$ и ускорение $a(t)$ гармонического колебания находятся дифференцированием уравнения перемещения x во времени t и определяются по соотношению (2)

$$dx / (- dt) = \omega X_{max} \cos \omega t = V_{max} \cos \omega t, \quad (2)$$

где, $V_{max} = \omega X_{max}$;

$$a = dv / dt = -\omega X_{max} \sin \omega t = A_{max} \sin(\omega t + \pi),$$

где, $A_{max} = \omega X_{max}$ - амплитуда колебаний.

Одним из приоритетных направлений в области развития станционных систем железнодорожной автоматики и телемеханики (СЖАТ) становится внедрение компьютерных систем электрической централизации (ЭЦ). Помимо основных функций управления перевозочным процессом, применение средств компьютерной техники позволяет реализовать в таких устройствах информационно-аналитические подсистемы. Подсистема технической диагностики собственного компьютерного оборудования и станционных СЖАТ - одна из основных подсистем релейно-процессорной централизации на базе микро-ЭВМ и программируемых контроллеров ЭЦ-МПК. Основные функции, присущие такой подсистеме, позволяют повысить отказоустойчивость станционных устройств, информированность обслуживающего и эксплуатационного персонала.

Однако для проведения полноценного прогнозирования отказов устройств ЭЦ подсистема диагностики требует дальнейшего увеличения числа диагностических параметров, получаемых с объекта контроля и расширения функциональных возможностей. Например, в фазочувствительной рельсовой цепи необходимо также измерять напряжение на питающем конце рельсовой цепи и угол сдвига фаз между напряжениями путевого и местного элементов приемника - важного диагностического параметра.

Комплексное диагностирование является наиболее перспективным видом контроля за техническим состоянием тиристорных преобразователей на электровозах и в электропоездах. В комплекс входят встроенные и внешние (стационарные) средства диагностирования. Встроенные средства работают по принципу рабочего диагностирования. При этом определяются тиристоры, имеющие пробой, внутренний обрыв, тепловые перегрузки и ухудшение условий рабочего режима из-за разброса их характеристик.

Схема стенда тестового диагностирования частичных отказов силовых тиристоров приведена на (рисунок 1.4). С помощью этого стенда контролируются следующие параметры:

ток утечки при прямом и обратном анодном напряжениях, равных паспортным данным тиристора соответствующего класса. При этом фиксируется превышение тока утечки над допустимым (10 мА);

включение тиристора управляющим током при прямом анодном напряжении, равном напряжению тиристора соответствующего класса. При этом стенд определяет принадлежность испытываемого тиристора к одному из разрядов по отпирающему току управления;

время включения тиристора при прямом импульсном токе с амплитудой 250 А с последующим приложением через определённый

регулируемый интервал времени прямого напряжения с амплитудой 100 В и крутизной 10 В/мкс. Диапазон измеряемого времени выключения при заданных условиях составляет 5-375 мкс.

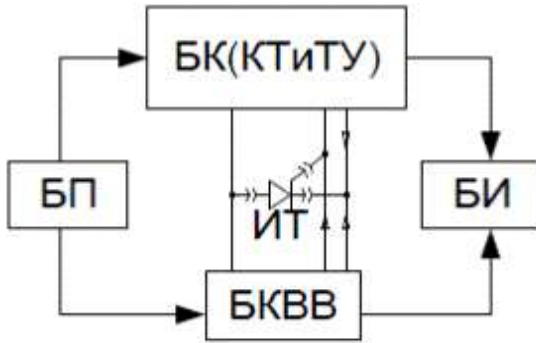


Рис. 4 – Структурная схема переносного прибора контроля параметров тиристоров

Разработка и внедрение эффективных методов диагностирования должны сопровождаться выбором диагностических параметров, который зависит от многих требований, предъявляемых к системе технического диагностирования. К наиболее важным требованиям можно отнести: цель диагностирования, стратегию технического обслуживания, время, стоимость средств и самого процесса, с учётом простоя диагностируемого объекта в режиме диагностирования. Выбранный диагностический параметр должен: обладать достаточной информативностью; мгновенно реагировать на любые изменения, происходящие в диагностируемом объекте; иметь хороший доступ к его измерению; обладать высокой помехозащищённостью и достоверностью, способностью к преобразованию при использовании автоматических средств обработки информации. Большое количество диагностических параметров позволяет получить достаточную глубину поиска неисправности, но вместе с тем ведет к удорожанию диагностирования. Поэтому при разработке систем диагностирования необходимо решить задачу оптимизации диагностических параметров, средств диагностирования и потребляемой ими мощности.

Разработка и внедрение систем технического диагностирования тягового подвижного состава являются главными факторами повышения эксплуатационной надёжности и снижения затрат на техническое обслуживание и ремонт. Диагностированию в первую

очередь подлежат те узлы и детали подвижного состава, которые обеспечивают безопасность движения и безопасное обслуживание (колёсные пары, буксовые узлы, рессорное подвешивание и блокирующие устройства). Ко второй очереди относятся узлы локомотива, обеспечивающие его работоспособность и узлы, имеющие довольно низкую надёжность (силовые цепи и цепи управления локомотивом, аппаратура защиты и аппараты управления). В третью очередь диагностируют узлы, которые косвенно влияют на функционирование подвижного состава (контролирующая аппаратура и приборы, системы охлаждения и вспомогательные машины).

Основной задачей на этапе разработки системы диагностирования является выбор диагностических параметров, по которым можно с высокой степенью достоверности определить техническое состояние объекта диагностирования. К диагностическим параметрам относятся такие величины или характеристики объекта, превышение значений которых приводит к отказу элементов машин, а затем и всей машины или механизма. Для каждого из элементов есть, как правило, несколько параметров, определяющих их надёжность, однако не все из них являются диагностическими в создаваемой системе диагностирования, что объясняется их разнообразием, невозможностью выявить эти параметры одним диагностическим методом, чрезмерным повышением сложности и стоимости систем диагностирования. Однако, несмотря на это, необходимо обеспечить максимальную полноту диагностирования.

Подводя итог можно сказать что, система диагностирования должна быть обязательной частью системы планово-предупредительного ремонта подвижного состава. В статье были описаны назначения и задачи технической диагностики, а так же средства, с помощью которых проводят техническое диагностирование в депо. Проанализированы виды систем технического диагностирования, описаны алгоритмы диагностирования и перечислены факторы, которые необходимо учитывать при разработке и внедрении эффективных методов контроля. Рассмотрено три типа задач диагностирования, которые определяют техническое состояние объекта на момент непосредственного воздействия на него средств технической диагностики. Задачи второго типа направлены на предсказание состояния, в котором объект окажется в некоторый момент времени. И третьего типа задачами являются определения состояния, в котором объект был в какой-либо определенный момент времени.

Литература:

1. Ключкова Е.А. Охрана труда на железнодорожном транспорте: Учебник для техникумов и колледжей ж.-д. трансп. - М.: Маршрут, 2004. - 412 с.
2. Просвирин Б.К. П82 Электропоезда постоянного тока: Учеб. пособие. -М; УМК МПС России,2001.-669 с
3. Диагностические комплексы электроподвижного состава : учеб. пособие / Я. Ю. Бобровников, А. Е. Стецюк. - Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2012. - 94 с. : ил.
4. Электропоезда. Общее руководство по техническому обслуживанию и текущему ремонту. РД 104.03.667-2007. М., «ТРАНСИЗДАТ», 2009. 304 с.
5. Сизов С.В., Аристов В.П., Костюков В.Н., Костюков А.В., Казарин Д.В. Автоматизированная диагностика электрических цепей МВПС // Железнодорожный транспорт. 2010. №5. С. 56 – 58.
6. Костюков В.Н., Костюков А.В., Казарин Д.В. Диагностика качества сборки электрических цепей электропоездов // Сборка в машиностроении и приборостроении. 2009. №12. С. 25 – 34.

СПОСОБЫ ЗАПАСАНИЯ И ХРАНЕНИЯ ВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА

И.Г. Савлук

**Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, onirs@corp.nstu.ru
Научный руководитель: Мятеж С.В., к.т.н., доцент**

Рассмотрены способы хранения водорода в газообразном, жидком и связанном состоянии. Представлены сравнительные показатели способов хранения, а также выделены основные преимущества и недостатки каждого из способов.

Methods of storing hydrogen in a gaseous, liquid and bound state are considered. Comparative indicators of storage methods are presented, and the main advantages and disadvantages of each method are highlighted.

В процессе мировой электрификации гражданского транспорта образовалось два взгляда на то, какой вид будет иметь электромобиль через десятки лет.

Одно из направлений развития стремится к совершенному виду тяговых аккумуляторных батарей, способных хранить большое количество электроэнергии. Однако, в настоящее время предельная массовая плотность энергии у литиевых аккумуляторов, исходя из таблицы 1, и прогрессивных технологий в кратном увеличении емкости аккумуляторов не происходило в течение продолжительного времени.

Таблица 1 – Плотность энергии различных видов накопителей

Вид накопителя	Массовая плотность энергии, $\frac{Вт \cdot ч}{кг}$
Свинцово-кислотные батареи	30-50
Никель-кадмиевые батареи	45-80
Никель-металлгидридные батареи	60-120
Литиевые батареи	150-250
Бензин	12,888,9
Дизельное топливо	12,666,7
Метан (1,013 бар, 15 °С)	15,444.5
Водородное топливо	39 405,6 или 33 313,9

Другое направление – водородное топливо. Оно обладает значительно большей плотностью энергии по сравнению с традиционными источниками топлива, а способы хранения и производства водорода находятся в активной разработке.

Рассмотрим несколько способов хранения водородного топлива, представленных в таблице 2.

Таблица 2 – Способы хранения водорода

Состояние	Давление, атм	Температура, К	Расстояние Н ₂ -Н ₂ или Н-Н, нм	Концентрация атомов, ат./см ³
Газообразный водород	1	300	3,3	$5,5 \cdot 10^{19}$
	350	300	0,54	$1,3 \cdot 10^{22}$
	700	300	0,45	$2,3 \cdot 10^{22}$
Жидкий водород	1	20	0,36	$4,2 \cdot 10^{22}$
Водород в связанном состоянии	1	300	0,21	$10,7 \cdot 10^{22}$

По сравнению с газообразным состоянием водорода хранение топлива в жидком виде будет иметь более плотную концентрацию атомов. Но самая плотная упаковка атомов водорода будет при хранении топлива в связанном состоянии, например, в сплаве никеля и лантана. В этом случае атом водорода разделяется на два, после чего атомарный водород внедряется в кристаллическую решетку сплава.

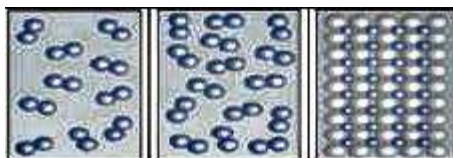


Рис.1 – Концентрация водорода в газообразном, жидком и связанном состоянии

Для поглощения водорода сплавом необходимо создать давление всего несколько атмосфер, а для высвобождения достаточно поднять температуру или понизить давление ниже 1 атмосферы.

Реакции связывания металла и водорода протекает с выделением теплоты, а реакции по высвобождению водорода с поглощением теплоты, согласно уравнениям 1 и 2 (Q – химическая теплота, Me – связывающий металл, H_2 – запасаемый водород, $Me_m H_n$ – металлгидрид):



Подобный способ хранения водородного топлива подходит для транспортировки, а также использования топлива на необходимые нужды, поскольку на выходе получается достаточно чистое топливо, которое не требует предварительной очистки.

На этом этапе уже можно говорить о внедрении нанотехнологий в область электро- и теплоэнергетики. Водородное топливо можно запасать в твердом связанном виде, где в качестве связующих металлов будут выступать алюминий и магний. AlN_3 является перспективным материалом для запасаания водорода, поскольку для хранения не требует повышенного давления или изменения температуры воздействия. Температура реакции не превышает $200^\circ C$, на основании чего можно назвать такую интерметаллическое соединение обратимой

низкотемпературной. Также AlH_3 является достаточно энергоемким материалом, а при помощи метода микрокристаллизации можно получить более емкие структуры кристаллов и повысить аккумуляцию водорода.

Также рассмотрим способ запасаения водорода с помощью магния. Подобный способ является самым изученным и перспективным, поскольку доля хранимого водорода будет составлять до 7,6% на вес Mg . Объемная плотность гидрида магния превосходит значения для газообразного водорода в 2-2,5 раза и для жидкого водорода в 1,5 раза. А массовая плотность энергии гидрида магния составит порядка

$$2,5-2,8 \frac{\text{Вт} \cdot \text{ч}}{\text{кг}}.$$

Быстрая скорость насыщения и температура реакции до 300°C делает реакцию высокотемпературной. По достижении заданной температуры процесс сорбации и десорбации протекает почти при полной обратимости. Данный процесс будет протекать по уравнению 3:



Однако, при нормальных условиях температуры и атмосферного давления ионная связь магния и водорода достаточно сильна. Повышение температуры для протекания обратной реакции ведет к снижению КПД подобного способа накопления топлива.

При использовании подобных систем аккумуляции в области транспорта возможно повысить запас хода и ускорить время заправки в совокупности с использованием топливных элементов для выработки электроэнергии. Также системы аккумуляции имеют перспективу развития в области промышленного накопления энергии для возобновляемых источников энергии.

Таким образом, можно сделать вывод о перспективности развития данного направления накопления и хранения водородного топлива. Кроме традиционных способов хранения водород в газообразном и жидком состоянии имеет место быть способ хранения топлива в связанном виде с металлами, среди которых самым изученным является гидрид магния.

Литература:

1. Тарасов Б.П. Водород-аккумулирующие материалы для хранения водорода в связанном состоянии (глава 7, стр. 276–292). // "Наноструктурированные материалы для систем запасаения и

преобразования энергии" (под ред. В.Ф. Разумова и М.В. Клюева) – Иваново: Иван. гос. ун-т, 2008. – 384 с.

2. Тарасов Б.П. Физика и химия водород-аккумулирующих материалов (глава 1, с. 5–41). // "Органические и гибридные наноматериалы: тенденции и перспективы" (под ред. В.Ф. Разумова, М.В. Клюева). – Иваново: Иван. гос. ун-т, 2013. – 512 с. ISBN 978-5-7807-1014-1.

3. Graetz J., Reilly J.J., Yartys V.A., Maehlen J.P., Bulychев B.M., Antonov V.E., Tarasov B.P., Gabis I.E. Aluminum hydride as a hydrogen and energy storage material: Past, present and future. // J. Alloys and Compounds, 2011, V.509, P.S517-S528; DOI: 10.1016/j.jallcom.2010.11.115; IF-4,65.

4. Denys R.V., Poletaev A.A., Solberg J.K., Tarasov B.P., Yartys V.A. LaMg11 with a giant unit cell synthesized by hydrogen metallurgy: Crystal structure and hydrogenation behavior. // ActaMaterialia, 2010, V.58, P.2510-2519; DOI: 10.1016/j.actamat.2009.12.037; IF- 7.66.

5. Loken S., Solberg JK, Maehlen JP, Denys RV, Lototsky MV, Tarasov BP, Yartys VA. Nanostructured Mg-Mm-Ni hydrogen storage alloy: Structure-properties relationship. // J. Alloys and Compounds, 2007, V.446SI, P.114-120; DOI: 10.1016/j.jallcom.2006.11.200; IF-4,65.

СБОР И ОБРАБОТКА ДАННЫХ С ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

С.К. Садков, И.И. Сингизин

**Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск,**

Научный руководитель: Вильбергер М.Е., к.т.н., доцент

В работе рассматривается подход, применяемый в промышленной автоматизации для сбора и анализа параметров движения электрического транспорта и формирования новых требований и рекомендаций для новых электротранспортных средств.

The paper discusses the approach used in industrial automation for collecting and analyzing the parameters of the movement of electric vehicles and the formation of new requirements and recommendations for new electric vehicles.

В автомобильной промышленности происходят серьезные изменения в структуре использования транспорта, электрический транспорт набирает всё большую популярность, а уровень технологий позволяет предлагать потребителям как личный электротранспорт, так и обновление парка общественного электротранспорта. В нашей стране процесс перехода только начинается и сейчас есть возможность подробно проанализировать сложившуюся за долгие годы транспортную систему. Последовательный и грамотный переход без интеграционной платформы, представляющей из себя модуль, задачей которого являются получение данных от оборудования, их агрегация и анализ. Решение подобной задачи уже применяется в промышленности.

Machine Data Collection системы - позволяют собирать конкретную структурированную информацию систематическим образом и в последствии производить ее обработку [1]. Такие системы можно рассматривать как подкласс SCADA систем, необходимый лишь для сбора информации о ходе технологического процесса, без обеспечения управления им в реальном времени. К фиксируемым системой данным обычно относятся: данные о технологических режимах, ошибки и предупреждения, статус работы и текущая УП, время и длительность работы, простоев и аварийных состояний.

Накопленная, обработанная информация дает возможность объективно оценивать ключевые показатели эффективности такие как: описать циклы движения ТС и получить зависимость мощности, потребляемой тяговым электроприводом, от времени; определить характерные параметры процессов разгона и торможения, описываемые ускорением, величиной тока и потребляемой либо генерируемой мощностью и энергией; выявить баланс энергопотребления подвижного состава, установив расход энергии на тягу и на собственные нужды; выбрать параметры и подтвердить достоверность моделей, используемых для расчета энергопотребления ТС [2], оценить параметры микроклимата в салоне транспорта, а также позволяет предотвращать сбои в работе машин благодаря прогнозированию возможных аварийных ситуаций и корректировке графиков профилактического обслуживания. Использование данной концепции позволит лучше понимать, насколько хорошо построен процесс и определить возможности для его исправления или изменения.

На текущий момент на базе микропроцессорной платформы реализован сбор данных с разнотипных датчиков, приведение данных в структурированный вид и реализация записи в файл. При небольшом объеме данных для обработки и визуального представления подойдет

MS EXCEL, однако при накоплении большого количества данных обработка перестанет быть эффективной.

Таким образом в работе предлагается подход к решению проблемы эффективного перехода в эпоху электрического транспорта. Предполагается разработка прототипов оборудования готового к внедрению на электрический транспорт и приложения, разрабатываемого с использованием языка Python для эффективной работы с данными: парсинг, обработка, визуализация, анализ, хранение.

Литература:

1. Никищечкин П.А., Ковалев И.А., Григорьев А.С., Никич А.Н. Кроссплатформенная система сбора и обработки диагностической информации о работе технологического оборудования // Вестник МГТУ Станкин. – 2017. – № 1 (40). – С. 94-98.

2. Щуров, Н. И. Методы и средства экономии и повышения эффективности использования энергии в системе городского электрического транспорта : дисс. На соиск. уч. ст. д-ра техн. наук : 05.09.03 / Н. И. Щуров. – Новосибирск, 2003. – 385 с.

ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ

И.П. Солодилов

**Сибирский государственный университет науки и технологии
имени академика М.Ф. Решетнева,
г. Красноярск, optim000000@gmail.com**

Научный руководитель: Мизрах Е.А., к.т.н., профессор

Специализированный источник питания является частью автоматизированного комплекса, предназначенного для проведения испытаний бортовой аппаратуры космического аппарата. В данной работе рассмотрены способы регулирования выходной ИЧХ специализированного источника.

A specialized power supply is a part an automatic complex that is used for testing of spacecraft onboard equipment. In this article the ways of impedance regulation of a specialized power supply are considered.

Специализированный источник питания (СИП) представляет собой имитатор [1] электрических характеристик систем электропитания космических аппаратов (СЭП) и предназначен для испытаний бортовых

электротехнических систем. Для повышения качества испытаний СИП должен воспроизводить не только электрические, но и динамические характеристики СЭП, определяемые выходными импедансами вторичных источников питания. Для имитации различных СЭП СИП должен иметь возможность регулировать как электрические характеристики, так и импедансные. В работе рассмотрены способы регулирования импедансных частотных характеристик СИП.

СИП представляет собой [2] стабилизатор напряжения компенсационного типа и имеет функциональную схему (рис.1).

Передаточная функция разомкнутой системы:

$$W_{PC}(s) = \frac{U_{вых}(s)}{U_{оп}(s)} = W_{XX}(s) \cdot \frac{1}{1 + Z_{PC}(s) \cdot Y_H(s)} W_{ДН}(s) \quad (1)$$

Выходной импеданс СИП (полное внутреннее сопротивление) имеет следующий вид:

$$Z_{вых}(s) = \frac{U_{вых}(s)}{I_{вых}(s)} = \frac{Z_{PC}(s)}{1 + W_{PC}(s)} \quad (2)$$

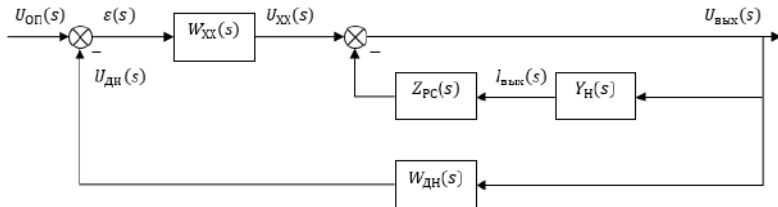


Рис.1 – функциональная схема СИП

$U_{оп}$ - опорное напряжение, $U_{оп}$ - опорное напряжение, ε - сигнал рассогласования, W_{XX} - передаточная функция холостого хода, Y_H - проводимость нагрузки, $I_{вых}$ - выходной ток, Z_{PC} - выходной импеданс разомкнутой системы, $W_{ДН}$ - передаточная функция датчика напряжения

Рассмотрим свойства импедансно-частотной характеристики (ИЧХ) СИП:

$$Z_{вых}(\omega) = \left| \frac{Z_{PC}(j\omega)}{1 + W_{PC}(j\omega)} \right| \quad (3)$$

В области низких частот, где $Re(W_{PC}(j\omega)) \gg 1$, справедливо следующее соотношение:

$$Z_{вых}(\omega) \approx \left| \frac{Z_{PC}(j\omega)}{W_{PC}(j\omega)} \right| \quad (4)$$

В области высоких частот, где $Re(W_{PC}(j\omega)) \ll 1$:

$$Z_{вых}(\omega) \approx |Z_{PC}(j\omega)| = Z_{PC}(\omega) \quad (5)$$

Поскольку ИЧХ разомкнутой системы (рис.2) в области низких (НЧ) и средних (СЧ) частот имеет активный вид, то форма ИЧХ СИП в этих областях частот определяется видом ПФ разомкнутой системы (рис.3), а в области высоких частот (ВЧ) ИЧХ СИП определяется видом ИЧХ разомкнутой системы.

Вышеизложенное позволяет использовать свойства (4 и 5) для регулирования ИЧХ СИП во всём диапазоне частот.

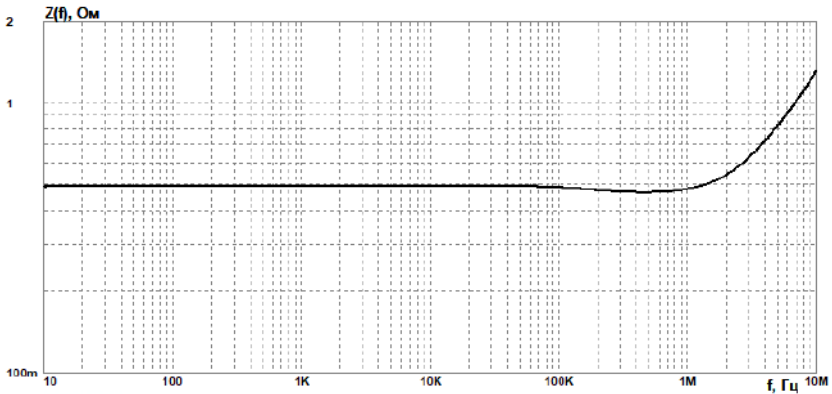


Рис.2 – ИЧХ разомкнутой системы

Логарифмические частотные характеристики разомкнутой системы в режиме холостого хода имеют вид:

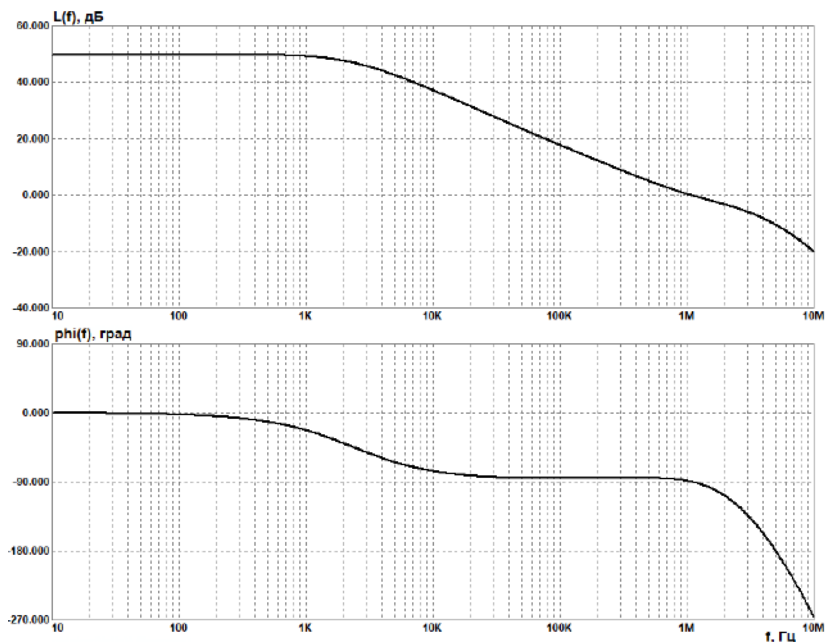


Рис.3 – ЧХ разомкнутой системы

Данные частотные характеристики аппроксимируются частотными характеристиками следующих передаточных функций:

$$W_{PC}(\omega) = \frac{240 \cdot (4 \cdot 10^{-7} s + 1)}{(7 \cdot 10^{-5} s + 1)(1.5 \cdot 10^{-7} s + 1)(1.1 \cdot 10^{-8} s + 1)^6} \quad (6)$$

$$Z_{PC}(\omega) = 0.5 \cdot (4 \cdot 10^{-8} + s) \quad (7)$$

Также в выражении для выходного импеданса необходимо учитывать длину соединительных шин:

$$Z_{вых+L}(\omega) = \left| \frac{Z_{PC}(j\omega)}{1 + W_{PC}(j\omega)} \right| + L_{out} \omega \quad (8)$$

Подставляя (6) и (7) в (8), получим ИЧХ СИП (рис.4) при различных индуктивностях соединительных проводов

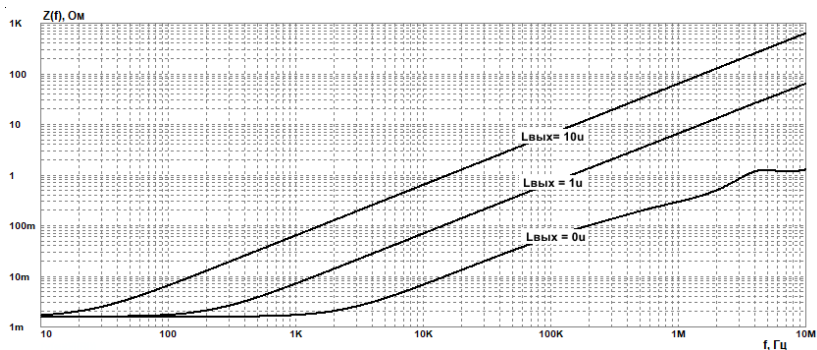


Рис.4 – ИЧХ СИП

Заключение. ИЧХ СИП в области НЧ и СЧ можно регулировать, изменяя вид ЧХ разомкнутой системы введением корректирующих устройств. В области ВЧ ИЧХ СИП определяется ИЧХ разомкнутой системы, на которую существенное влияние оказывает длина соединительных с нагрузкой проводов. При длине проводов свыше нескольких метров ИЧХ СИП в области СЧ и ВЧ может определяться их индуктивностью.

Литература:

1. Автоматизированная система имитации электрических характеристик систем электропитания космических аппаратов / Е.А. Мизрах, Д.Н. Пойманов, Р.В. Балакирев и др. // Сибирский журнал науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева. – 2016. – №3 (17). – С.702-709.
2. Мизрах Е.А., Солодилов И.П. Имитационное моделирование специализированного источника питания // Труды XXI Международной научно-технической конференции и школы молодых ученых, аспирантов и студентов. II Тур. – 2020. – С. 354-360.
3. Мизрах Е.А., Солодилов И.П. Регулирование выходного импеданса специализированного источника питания по цепи управления // Материалы XX Международной научной конференции бакалавров, магистрантов, аспирантов и молодых ученых. – 2021. – С. 379-381.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВУХСТУПЕНЧАТОЙ СИСТЕМОЙ ОЧИСТКИ ГАЗА НА КОМПРЕССОРНОЙ СТАНЦИИ

Н.А. Терпугова

**Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, natali.terpugova1999@yandex.ru
Научный руководитель: Мятёж С.В. к.т.н., доцент**

Рассмотрен процесс автоматизации системы очистки и сепарации газа, его контроль и повышение производительности, качества выпускаемого газа, унификации путем максимального освобождения человека от участия в процессе, а также дистанционный контроль всех параметров.

The process of automation of the gas purification and separation system, its control and improvement of productivity, the quality of the gas produced, unification by maximizing the release of a person from participation in the process, as well as remote control of all parameters is considered.

Исследование процесса очистки газа от примесей, жидкости, пыли с помощью использования системы двухступенчатой очистки газа, требующего качественного контроля и поддержания всех параметров, приводит к необходимости реализации автоматизированного управления системой с установленными требованиями к ней. [4] В основе проектирования системы стоит поддержание указанных показателей давления газа на всех входных и выходных точках оборудования и контроль уровня загрязнения пылеуловителя.

Контроль и наблюдение за давлением и уровнем загрязнения по регламенту был реализован наблюдением и ручным методом очистки пылеуловителя, с этими методами возникают сложности в их несοвершенство и не точности.

В процессе работы реализована двухступенчатая система очистки газа. [1] В качестве первой ступени очистки стоят циклонные пылеуловители, работающие на принципе использования инерционных сил для улавливания взвешенных частиц, эффективность очистки зависит от количества циклонов, и эксплуатации. Во второй ступени приняты фильтр-сепараторы, их ставят в систему последовательно после циклонных пылеуловителей.

Данная система очистки необходима станции, для предотвращения аварий, для повышения качества выходящего газа. [1].

Каждый фильтр-сепаратор и пылеуловитель снабжён датчиками давления для слежения разницы между входным и выходным

давлением, во всех пылеуловителях процесс загрязнения контролируется датчиком уровня.

Количество пылеуловителей и фильтр-сепараторов в установке определяется по упрощенной формуле N, шт.:

$$N = \frac{Q_{г}}{365 \cdot Q_{п}} \quad (1)$$

где $Q_{г}$ – подача газа, млрд. м³/год; $Q_{п}$ – пропускная способность циклонного пылеуловителя, млн. м³/сут.

В данном случае принимается по 3 аппарата работающих и по 2 резервных.

Качество очищение газа зависит от исходного газа, скорости прохождения газа в аппарате, оседание пыли и количества влаги на поверхности твёрдых веществ. После очистки, состав механических примесей в газе не должно превышать 5 мг/м³.

В процессе работы возникает улавливание механических примесей на поверхности фильтр-элемента, что приводит к возрастанию перепада давлений на фильтр-сепараторе. При достижении перепада, равного 0,04 МПа, фильтр - сепаратор нужно выключить и переключить на резервный такой же переход у пылеуловителей.

После очистки, состав механических примесей в газе не должно превышать 5 мг/м³.

Выбор исполнительных механизмов реализован в таблице 1.

Таблица 1-Технические характеристики аппаратов очистки газа

Наим-ние	Тип	Производительность млн м ³ /сут.	Расчетное рабочее давление, МПа	Диаметр аппарата, мм	Число циклонных элементов шт.	Максимальный дренируемый объём, м ³
Пылеуловитель мульти-циклонный вертикальный	ГП 167.00.000	8,2	4,9	1600	187	2,3
Газосепаратор сетчатый	ГС-2-4,0-2000	15,07	4	2000	-	16

Работа газосепаратора контролируется по разности давлений между секциями. Номинальная разность давлений - 0,044 МПа, максимальная - до 0,078 МПа. Процесс промоделирован на рисунке 1.

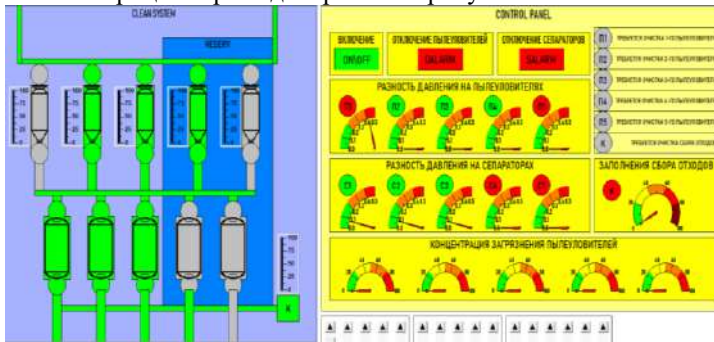


Рис.1- Визуализация и работа системы в программе CoDeSys

Данная модель очистки газа реализована трёх уровневой системой автоматизации

1 уровень: произведён выбор контрольно-измерительных устройств:

- 1) датчик давления модели AMZ 5050 для корректной работы в широком диапазоне давлений с необходимым классом взрывозащиты;
- 2) ультразвуковой радарный уровнемер модели РИЗУР-2090, для измерения отстоя загрязнений, бесперебойной работы системы, динамикой наполнения загрязнений;

2 уровень: выбор модульного контроллера ПЛК NLSB-1, а также необходимый набор модулей расширения: дискретных входов NLS-16DI-CAN, дискретных выходов NLS-16DO-CAN, аналоговых входов NLS-8AI-CAN., источника питания и преобразователей интерфейсов, связанных между собой посредством шины питания, шины данных на основе интерфейса RS-485 и протокола Modbus RTU.

Для данной системы разработан алгоритм и программный код управления на языке ST для ПЛК в среде CODESYS. Визуализация программы проверена на правильность работы.

3 уровень: разработка автоматизированного рабочего места оператора, реализованный в пакете SCADA-системы Wonderware InTouch.

За создания управляющей программы отвечает среда программирования CoDeSys, их связь через приложение OPCLink.

Созданы экранные формы всей системы контроля в фильтр-сепараторах и пылеуловителях. Представлено развернутое описание анимированных связей и действий в соответствии с требуемым

функционалом системы. Разработаны экранные формы АРМ оператора, а также создана анимация АРМ с использованием скриптов и свойств объектов. Осуществлена настройка сигнализации и архивирования данных. Произведено конфигурирование системы для отображения и квитирования тревог (алармов), а также настройки архива тревог. Реализовано использование архивных трендов для анализа истории технологического процесса.

Заключение

Данная система позволяет повысить в несколько раз производительность, и эффективность труда, усовершенствовать качество выпускаемой продукции, а также обезопасить человека от опасных факторов производства путем автоматизации данного процесса.

Увеличится рентабельность проекта, а также его эффективность, которая позволяет достичь множества преимуществ: снизить аварии, устанавливать контроль и управление давлением и конденсатом дистанционно.

Литература:

1. Земенков, Ю.Д. Эксплуатация оборудования и объектов газовой промышленности в 2-х томах [Текст]: учебное пособие / Ю.Д. Земенков, 2008. – 1216 с.
2. Берлин, М.А. Переработка нефтяных и природных газов [Текст]: учебное пособие / М. А. Берлин, В. Г. Гореченков, Н. П. Волков. – М.: Химия, 1981. – 472 с.
3. Измерение и контроль уровня конденсата [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.rospribor.com/questions/izmerenie-urovnya-kondensata/>– Загл. с экрана.
4. Очистка технологических газов / Под ред. Т. А. Семенов и И. Л. Лейтеса. 2-е изд. М.: Химия, 1977. – 120с.
5. Страус В. Промышленная очистка газов / Пер. с англ. М.: Химия, 1981. – 124с.
6. Датчик давления [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://systempribor.ru/files/uploads/b03dbc5cf0fdc8930bfc644d8c8f9c74.pdf> – Загл. с экрана.
7. Уровнемер бесконтактный ультразвуковой РИЗУР-2090 [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://videolast.ru/play/7X4J_R0fxcY– Загл. с экрана.
8. ПЛК NLSB-1 [Электрон. ресурс] – Режим доступа: <https://www.reallab.ru/catalog/modular-plc/nlsb-1/>– Загл. с экрана.

9. Шувалов В.В., Огаджанов Г.А., Голубятников В.А. Автоматизация производственных процессов в химической промышленности. - М.: Химия 1991. - С. 480.

10. Основы автоматизации типовых технологических процессов в химической промышленности и в машиностроении : учеб. пособие / М. А. Трушников [и др.] ; ВПИ (филиал) ВолгГТУ. - Волгоград : ВолгГТУ, 2012. - 107 с.

11. Федоров, Ю.Н. Справочник инженера по АСУТП: Проектирование и разработка [Текст]: учебно-практическое пособие. – М.: ИнфраИнженерия, 2009. - 939 с.

12. Типовая структура АСУ ТП [Электрон. ресурс] – Режим доступа: <http://foraenergy.ru/poleznye-stati/tipovaja-struktura-asu-tp/> – Загл. с экрана.

13. Приборы и средства автоматизации: Каталог. Т.5. Приборы для определения состава и свойства газа, жидкости, твердых и сыпучих веществ. Электрон. ресурс] – Режим доступа: <https://internet-law.ru/gosts/21994/> – Загл. с экрана. 2004. –368 с.

УЛУЧШЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ АВТОМОБИЛЯ ПРИ ПОМОЩИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Ю.А. Фролков, К.М. Полозов, С.В. Петровский
Самарский государственный технический университет,
г. Самара, petrovski@rambler.ru

В работе диагностируется превышения уровня электромагнитных помех от системы зажигания, при помощи интеллектуальных датчиков, что дает возможность рассмотреть работу системы зажигания автомобиля и её электромагнитную совместимость с другим электрооборудованием как внутри автомобиля так и снаружи.

The article diagnoses the excess of the level of electromagnetic interference from the ignition system, using smart sensors, which makes it possible to consider the operation of the car ignition system and its electromagnetic compatibility with other electrical equipment both inside the car and outside.

Введение

В наше время экологические и технические характеристики двигателей внутреннего сгорания (ДВС) все более усложняются. Исходя из этого автопроизводители постоянно совершенствуют и разрабатывают новые, средства и методы управления с диагностикой неисправностей различных узлов и деталей, одним из которых является система зажигания автомобиля. Работа ДВС контролируется микропроцессорными системами, использующими физические датчики, которые измеряют различные входные и выходные параметры двигателей (например, расход воздуха, температура, давление во входном коллекторе, уровень электромагнитных полей и так далее), а также в связи с все более усложняющейся электромагнитной обстановкой, учитывается режим работы двигателя и сопутствующий этому уровень электромагнитных помех (ЭМП) [1,2].

Основная часть

У современных микропроцессорных систем имеется возможность применения интеллектуальных датчиков внутри системы управления ДВС, что дает возможность улучшать работу как системы зажигания, так и других исполнительных устройств современных автомобилей. Эти возможности создают благоприятную среду для использования интеллектуальных информационных систем (ИИС) в различных сферах применения, в том числе для диагностики уровня превышения уровня ЭМП [1, 3].

Интеллектуально-информационная система на основе входных данных от физических датчиков вырабатывает экспертную оценку Y^* , по которой принимается решение по изменению уровня генерируемых электромагнитных помех. При этом управляющее воздействие вырабатывается для достижения поставленной исходной цели (выработка управляющего сигнала), далее дается прогноз значения результата действия (экспертная оценка), которые сопоставляются с реальными результатами и затем представляются в виде символической информации. Таким образом образуется обратная связь для корректировки экспертной оценки или управления при возникновении такой необходимости.

Интеллектуальная информационная система построена на основе бортовой системы контроля (БСК), которая при помощи текущих сведений по электромагнитной обстановке (ЭМО) и сопутствующим параметрам объекта управления, осуществляет экспертную оценку. Эта оценка преобразуется ИИС в физический сигнал и поступает на исполнительное устройство, которое в нашем случае является системой зажигания автомобиля. При этом наш объект управления, получает

сигнал от исполнительных устройств, после этого осуществляет диагностику по уровню превышения ЭМП, результаты которой поступают в БСК по цепи обратной связи, где они сравниваются с прогнозируемыми результатами.

Отсюда следует, что БСК является комплексным образованием, которое способно оценить состояние объекта измерения и среды, затем сравнить параметры желаемого и реального результатов действия, а после этого принимать решение об адекватности работы объекта и вырабатывать в соответствии с этим решением управляющее воздействие по изменению уровня ЭМП, способствующее результативному достижению поставленной задачи диагностики. Для своевременного достижения этой цели бортовая система контроля должна обладать запасом знаний, которые хранятся в базе данных, БСК связанной с интеллектуальной информационной системой.

Интеллектуальная информационная система, разработанная в ходе данной работы для диагностики превышения уровня ЭМП, представляет собой интеллектуальный диагностический комплекс (ИДК), который показывает реализуемость и целесообразность предложенного ниже подхода к управлению и соблюдению требований по электромагнитной совместимости (ЭМС) системы зажигания с электрооборудованием автомобиля.

В данной статье диагностические данные обрабатываются с помощью алгоритмов классификации, которые выполнены в программной среде ВЕКА (версии 3.6.8.) для интеллектуального анализа данных, которые используют современные методы, а затем с помощью вычислительного эксперимента, который использует метод искусственных нейронных сетей, метод опорных векторов, метод сетей Байеса, метод, основанный на алгоритме ближайших соседей, реализованные в среде программирования - ENCOG Workbench (версия 3.1) [4, 8]. При этом наилучший результат дает метод опорных векторов, с погрешностью классификации данных 5.85% [6].

Основываясь на функциональных схемах работы интеллектуальных датчиков, приведённых на рисунке 1, можно предложить следующую структуру интеллектуального датчика (ИД) для диагностики уровня превышения электромагнитных помех от системы зажигания ДВС:



Рис. 1 - Интеллектуальный датчик диагностики уровня превышения ЭМП от системы зажигания

Базовым блоком ИИС является интеллектуальный датчик (указанный на рисунке 1). Этот датчик по текущим сведениям об окружающей среде и состоянии объекта управления дает оценку по комплексным характеристикам диагностируемой системы зажигания ДВС. Входные данные на ИИС об окружающей среде мы получаем с физических датчиков (датчик 1, датчик 2, ... датчик n). Это различные датчики, в число которых входит датчик массового расхода воздуха, датчик скорости, датчик положения коленчатого вала, датчик электромагнитных полей и так далее. В итоге полученные интеллектуальным датчиком (ИД) комплексные характеристики преобразуется бортовой системой контроля в физический сигнал и поступают на вход системы зажигания, которая по факту является исполнительным устройством, реагирующим на этот сигнал для уменьшения уровня ЭМП.

Исходя из изложенного выше, ИИС должна точно и быстро оценивать состояние диагностируемого объекта и среды, где она работает [6]. По данной причине от ИИС нужно, чтобы она могла в процессе своей работы сохранять и приобретать диагностические знания, которые нацелены на решение наиболее важной задачи любой диагностической системы – это обнаружение и классификация неполадок (ОКН), что относится, в том числе, и к ранее не встречавшимся неисправностям. Для решения этой задачи используют

подходы, описанные в [5, 6]. Данные знания обеспечивают базу математического моделирования (ММ), при том что алгоритмические знания особенно полезны для реализации диагностики на основе данных (ДД подход).

В вышеуказанных подходах всё более обширное применение находят методы искусственного интеллекта, которые основаны на разных моделях идентификации и классификации неполадок. Поэтому интеллектуальный подход, реализуемый ИИС, все чаще используется для решения сложных задач в различных технических областях, например для автомобильной диагностики уровня превышения ЭМП. При этом несколько интеллектуальных систем были разработаны и применены в области данной диагностики с целью повышения эффективности ОКН (распределенные диагностические средства) [7, 8].

Выводы:

1. Важным для интеллектуальной информационной системы по отношению к существующим средствам обработки диагностических данных является его способность к адаптации и настройке внутренних параметров (что дает возможность достичь погрешности работы интеллектуальных датчиков при определении уровня ЭМП в составе ИИС на уровне 5.85 %).

2. Показанные программные и функциональные возможности интеллектуальной информационной системы, реализованной на ИД, позволяют комплексно диагностировать превышение уровня ЭМП, после этого коды диагностических ошибок выводятся при помощи монитора маршрутного компьютера, на основании которых водитель принимает решение о необходимости остановки и ремонта автомобиля.

Литература:

1. Барнс Дж. Электронное конструирование: методы борьбы с помехами. / Дж. Барнс. - М.: Мир, 1990. – 238 с.

2. Кечиев Л.Н. ЭМС: стандартизация и функциональная безопасность. / Л.Н.Кечиев, П.В. Степанов. – М.: МИЭМ, 2001 – 82 с.

3. Князев А.Д. Элементы теории и практики обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств. / А.Д. Князев– М.: Радио и связь, 1984. – 336 с.

4. Петровский С.В. Математическое моделирование процессов дугообразования в системе зажигания автомобиля // Журнал Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. - №2 (24) Самара: СамГТУ 2009. С. 199-204.

5. Петровский С.В. Моделирование электромагнитных помех при работе системы зажигания автомобиля // Научные труды V

международной молодежной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи». Том 1, Томск. ТПУ. 2014.

6. Dhar V., Stein R. Intelligent Decision Support Methods : The Science of Knowledge Work. Prentice Hall, 1997.

7. Petrovsky S.V., Kozlovsky, V.N., Vakhnina, V.V., Skripnuk, D.F. Determination of the Causes of the Excess of the Level of Electromagnetic Interference from the Ignition System Using an Intelligent Diagnostic System./ Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIconRus 2020 DOI: 10.1109/EIconRus49466.2020.9038934 pp. 569-573.

8. Quinlan J. R. C4.5: Programs for Machine Learning. — San Mateo: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1993. — 302 p. — ISBN 1-5586-0238-0

СОДЕРЖАНИЕ

НАУЧНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ – ЭЛЕКТРОТЕХНИКА, ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

Секция ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И СИСТЕМЫ. ТЕХНИЧЕСКАЯ ЭКОЛОГИЯ

Алехин С.А.	Новосибирск	3
Олзоев А.Ю., Балабанов Г. П.	Красноярск	7
Перевалов Ю.Ю., Ермакова М.Р., Козулина Т.П.	Санкт-Петербург	11
Федин М.А., Кондрашов С.С., Чень Б.	Москва	16
Мельников А.С., Парменов В.Е., Перевалов Ю.Ю.	Санкт-Петербург	20
Морсина А.А.	Новосибирск	23
Парменов В.Е., Мельников А.С., Перевалов Ю.Ю.	Санкт-Петербург	27
Сапрыкин А.А., Морев А.Э.	Новосибирск	30
Тихонова А.А., Иванов В.Р., Рябков Е.Д.	Москва	32

Секция ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

Головачева Д.А., Федянин А.Л.	Северск	37
Мехряков И.К.	Северск	40
Темляков А.А., Малозёмов Б.В.	Новосибирск	45
Маломошнов Н.К.	Новосибирск	50
Абрамов М.В	Новосибирск	54
Бабицкий Д.Ю., Лобачева А.С.	Новосибирск	60
Гейнрих Г.О., Шевченко А.Ф., Вяльцев Г.Б.	Новосибирск	64
Ермолов И.С., Темлякова З.С.	Новосибирск	68
Жилин О.А.	Новосибирск	72

Никулин Р.О., Топорков Д.М.	Новосибирск	77
Труханова М.Ю., Шевченко Л.Г.	Новосибирск	79
Ясюкевич Д.А., Шевченко Л.Г.	Новосибирск	86
Попов И.Л.	Новосибирск	90
Трубачев А.А.	Томск	94
Мырзахметов А.С., Мырзахметов С.С., Дю В.Г.	Томск	98

**Секция ЭЛЕКТРОПРИВОД И АВТОМАТИКА ПРОМЫШЛЕННЫХ
УСТАНОВОК И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ**

Бурманов С.А.	Новосибирск	103
Бутенко В.Н.	Новосибирск	107
Васильева А.И.	Новосибирск	110
Горлов Е.И., Фарафонов С.Ю.	Новосибирск	115
Горников В.А.	Новосибирск	118
Гришанин Д.Е., Сердюк Д.Е.	Новосибирск	122
Губская К.Г.	Новосибирск	126
Еремочкин С.Ю., Дорохов Д.В., Жуков А.А.	Барнаул	131
Еремочкин С.Ю., Дорохов Д.В.	Барнаул	135
Еланакова В.А., Ильенков И.А.	Новосибирск	140
Ерещенко Н.Д.	Новосибирск	142
Кожуганова Д.Т.	Новосибирск	146
Конусов И.Д.	Новосибирск	148
Красносельский А.А., Анибров В.И., Попов Н.С.	Новосибирск	152
Кузьмичева А.Г.	Новосибирск	155
Ляпин Н.Ю., Попов Н.С., В.И.	Новосибирск	161
Манякова П.Н.	Новосибирск	163
Михайлович М.А., Бейерлейн Е.В.	Северск	167
Овчинников Р.А.	Новосибирск	171
Ратников И.И.	Новосибирск	176

Сидоров Г.С., Гончарова М.А.	Новосибирск	181
Цамалаидзе Д.Г.	Новосибирск	185
Чепига А.А., Корытченкова Е.Е., Али Ю.	Новосибирск	187
Черемшанова Д.А.	Новосибирск	192

**Секция ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ
И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТРАНСПОРТ**

Бердюгина А.В.	Новосибирск	196
Богданов Е.В.	Новосибирск	199
Власов О.А., Радченко В.О.	Новосибирск	201
Власов О.А., Савлук И.Г.	Новосибирск	208
Внуков С.А.	Новосибирск	213
Коновалов Н.А., Козлюк В.А., Бурмасов Д.Е.	Томск	216
Лукиященко К.А.	Новосибирск	220
Радченко В.О., Власов О.А.	Новосибирск	224
Савлук И.Г.	Новосибирск	233
Садков С.К., Сингизин И.И.	Новосибирск	237
Солодилов И.П.	Новосибирск	239
Терпугова Н.А.	Новосибирск	244
Фролков Ю.А., Полозов К.М., Петровский С.В.	Самара	248

НАУКА. ТЕХНОЛОГИИ. ИННОВАЦИИ

**XV Всероссийская научная конференция молодых ученых,
посвященная Году науки и технологий в России
г. Новосибирск, 06-10 декабря 2021 г.**

Сборник научных трудов в 10 частях

Часть 5

Под редакцией Соколовой Д.О.

Подписано в печать 15.12.2021. Формат 60×84/16. Бумага офсетная.

Уч.-изд. л. 15,11. Печ. л. 16,25. Тираж 100 экз. Заказ № Р-00577

Отпечатано в типографии

Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20