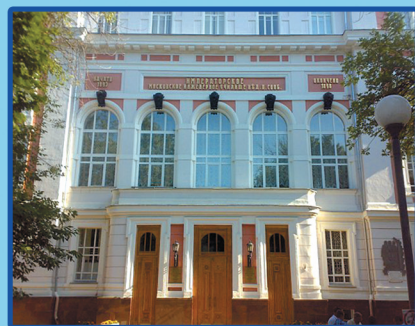




# РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА (МИИТ)

Ведущий национальный транспортный вуз – Российский университет транспорта (МИИТ) – является передовым межтранспортным и общетранспортным научно-образовательным центром, крупнейшим отраслевым университетом России, базовым центром кадрового обеспечения и научного сопровождения развития транспортной отрасли.

На 1 июля 2018 года общий контингент обучаемых составляет около 93 тысяч человек, в том числе по программам высшего образования (ВО) – около 32 тысяч человек, по программам среднего профессионального образования (СПО) – более 5 тысяч человек.



В составе университета две академии (Российская академия путей сообщения и Российская открытая академия транспорта), девять институтов (Гуманитарный институт; Институт международных транспортных коммуникаций; Институт прикладных технологий; Институт пути, строительства и сооружений; Русско-немецкий институт; Институт транспортной техники и систем управления; Институт управления и информационных технологий; Институт экономики и финансов; Юридический институт), Научно-исследовательский институт транспорта и транспортного строительства, четыре факультета (Вечерний факультет, Центр «Предуниверсарий», Центр «Высшая школа педагогического мастерства», Центр подготовки научных сотрудников), гимназия, Правовой колледж, Медицинский колледж.

МИИТ ведет подготовку специалистов:  
– с высшим образованием по 11 специальностям (58 образовательным программам), 34 направлениям бакалавриата (141 образовательной программе), 20 направлениям магистратуры (90 образовательным программам), 15 направлениям подготовки научно-педагогических кадров;  
– со средним профессиональным образованием по 20 специальностям (134 образовательным программам);  
– рабочих и служащих по 57 профессиям.



Президент университета,  
д.т.н., профессор  
Б.А.Лёвин



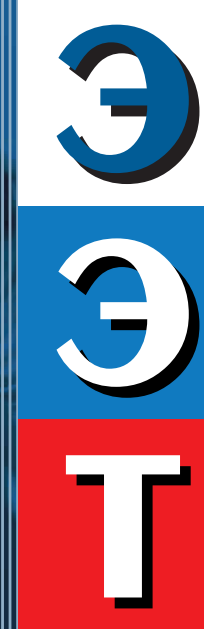
Ректор университета,  
к.т.н.  
А.А.Климов

## Учредитель:

Министерство транспорта Российской Федерации  
Юридический адрес: 109012, г. Москва, ул. Рождественка, д. 1, стр. 1  
Телефон: +7 (499) 495-00-00  
E-mail: info@mintrans.ru  
Сайт: www.mintrans.ru

## Адрес образовательной организации:

127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9  
Контактный телефон: +7 (495) 681-13-40  
E-mail: tu@miit.ru  
Сайт: www.miit.ru



# ЭЛЕКТРОНИКА И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ ТРАНСПОРТА

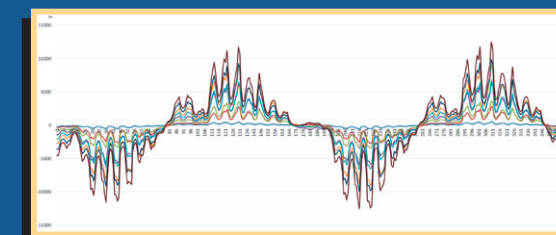
научно-технический журнал

№ 6  
2018

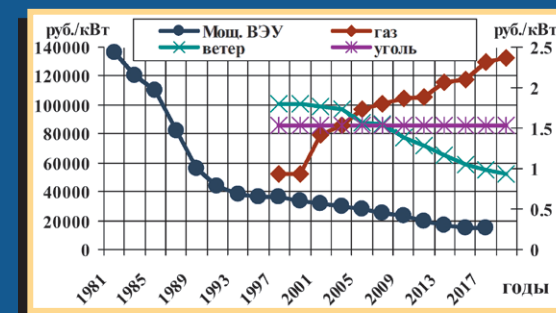
ISSN 1812-6782

## В НОМЕРЕ:

Особенности расчета магнитного поля  
электрических машин



Модель системы тягового электроснабжения  
с распределенной генерацией энергии  
на основе ветровых электроустановок



Ложные срабатывания защиты кабеля  
питающих линий в системе тягового  
электроснабжения метрополитенов



## Уважаемые читатели!

Ведущему транспортному вузу России –  
Российскому университету транспорта (МИИТ)  
в этом году исполнилось 122 года.

За это время университет подготовил свыше 650 тысяч высококвалифицированных специалистов с высшим и средним профессиональным образованием.

Среди выпускников МИИТа – руководители транспортной отрасли, ученые с мировыми именами, члены Правительства РФ, губернаторы, мэры крупных городов, известные общественные деятели, представители Русской православной церкви и культуры, крупнейшие бизнесмены России.

Многие из иностранных выпускников университета имеют мировое признание, в том числе как руководители национальных органов транспорта, ведущих транспортных и технических вузов Азии и Европы, являются известными учеными, представителями деловых округов.

В университете постоянно ведутся масштабные научные исследования, в том числе фундаментального характера. Результаты этих исследований успешно внедряются на транспорте и в других отраслях.

Ученые МИИТ активно участвуют в создании и испытаниях образцов передовой транспортной техники, которая находится на уровне лучших мировых аналогов.

Результаты научной работы миитовцев регулярно публикуются в ведущих научно-технических журналах в нашей стране и за рубежом.

Благодарю редакционную коллегию журнала «Электроника и электрооборудование транспорта» за очередную публикацию результатов научных работ сотрудников университета.

Президент Российского университета транспорта (МИИТ),  
доктор технических наук, профессор

 Б.А. Лёвин



### Реквизиты: ООО «НПП ТЭЗ»

Адрес редакции: 140070 Московская обл., Люберецкий р-н, п. Томилино,  
ул. Гаршина, 11

Тел./факс: (495) 500-40-20, 557-23-95, e-mail: npptez@mail.ru

ИНН 5027095560 КПП 502701001

р/ч 40702810540240102500 в ПАО Сбербанк г. Москва

к/с 30101810400000000225 БИК 44525225

## ЗАЯВКА НА ПОДПИСКУ НА ЖУРНАЛ «ЭЛЕКТРОНИКА И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ ТРАНСПОРТА»

Просим оформить подписку на 20\_\_ год  
с № \_\_\_\_\_ по № \_\_\_\_\_ количество экз. \_\_\_\_\_

Полное наименование организации	
Ф.И.О., должность руководителя (полностью)	
Телефон/факс, e-mail руководителя	
Почтовый адрес предприятия (индекс, страна, адрес)	
Юридический адрес предприятия (индекс, страна, адрес)	
ИНН/КПП	
Расчетный счет	
Банк	
Корреспондентский счет	
БИК	
Контактное лицо, Ф.И.О., должность	
Телефон/факс, e-mail	

Адрес доставки: Кому: \_\_\_\_\_

Куда: \_\_\_\_\_

Для оформления подписки на журнал «ЭЭТ» заполните заявку и отправьте ее по факсу или электронной почте [npptez@mail.ru](mailto:npptez@mail.ru).

По всем вопросам, связанным с подпиской, обращайтесь в редакцию журнала.

Стоимость годовой подписки 4800-00 руб., в т.ч. НДС 18%.

Периодичность – 6 номеров в год.

Периодический рецензируемый научно-технический журнал «Электроника и электрооборудование транспорта» является коллективным членом Академии электротехнических наук РФ.

Учредитель и издатель – Научно-производственное предприятие «Томилинский электронный завод».

Журнал включен в перечень изданий, рекомендованных ВАК для апробации кандидатских и докторских диссертаций.

Свидетельство о регистрации СМИ  
ПИ №ФС 77-29963  
от 17 октября 2007 г.

**Главный редактор:**  
А.Г. Бабак, к.т.н.

**Редакционный совет:**

М.П. Бадер, д.т.н., профессор  
В.Я. Беспалов, д.т.н., профессор  
А.С. Веденеев, д.ф.-м.н., доцент  
Л.А. Герман, д.т.н., профессор  
Ю.М. Иньков, д.т.н., профессор  
В.В. Калугин, д.т.н., доцент  
А.А. Ковалев, д.т.н.  
К.Л. Ковалев, д.т.н., доцент  
В.Н. Козловский, д.т.н., доцент  
А.С. Космодамианский, д.т.н., профессор  
А.И. Попов, д.т.н., профессор  
В.Т. Пенкин, д.т.н., доцент  
С.Т. Рембеза, д.ф.-м.н., профессор  
В.И. Сарбаев, д.т.н., профессор  
М.В. Шевлюгин, д.т.н., доцент  
В.Е. Ютт, д.т.н., профессор

**Выпускающий редактор:**  
Н.А. Климчук

**Редакция:**

140070, Московская область,  
Люберецкий район, п. Томилино,  
ул. Гаршина, д. 11.  
Тел./факс: (495) 500-40-20  
E-mail: npptez@mail.ru  
Сайт: www.npptez.ru

**Подписано в печать:** \_\_.11.2018 г.

**Отпечатано:**

ГУП МО «Коломенская типография».  
140400, г. Коломна,  
ул. III Интернационала, д. 2а.  
E-mail: bab40@yandex.ru

Формат 60x90/8,  
бумага мелованная, объем 7 п.л.,  
тираж 1000 экз., заказ 1577

## СОДЕРЖАНИЕ

### ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОНИКИ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ НА ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВАХ

**Прокофьева Е. С., Шилер В.В., Шилер А.В.**

Повышение энергетической эффективности производственной деятельности ОАО «РЖД» за счет внедрения новых технических и технологических решений . . . . . 2

### ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ

**Глущенко М. Д., Горюнов И.О.**

Особенности расчета магнитного поля электрических машин . . . . . 5

**Баташов С. И., Менщиков И.А.**

Кепстральный анализ диагностических параметров электромеханических систем электропоезда переменного тока серии ЭР9Т. . . . . 9

**Дураков Д. Н., Лобынцев В.В., Устинов В.С.,  
Бадёр М.П., Шорников Э.Н., Бурсук В.И.**

Моделирование процессов отключения токов короткого замыкания в тяговой сети постоянного тока с использованием нового реактора сглаживающего фильтр-устройства РЖФА-6500 . . . . . 13

**Косарев А. Б., Косарев Б.И.**

Импульсные перенапряжения на заземляющем устройстве тяговой подстанции постоянного тока и технические решения по их ограничению . . . . . 19

**Богданов В. С., Ярославцев А.Ю., Новиков В.Г., Сафронов А.И.**

Требования к современным системам диспетчерской централизации Московского метрополитена . . . . . 24

**Шевлюгин М. В., Королев А.А., Цыколенко А.А., Жуматова А.А.**

Модель системы тягового электроснабжения с распределенной генерацией энергии на основе ветровых электроустановок. . . . . 27

**Гречишников В. А., Куров Н.Д., Голицына А.Е.**

Ложные срабатывания защиты кабеля питающих линий в системе тягового электроснабжения метрополитенов . . . . . 32

**Герман Л. А.**

Регулируемые фильтрокомпенсирующие установки в тяговой сети переменного тока. Часть 2 . . . . . 35

### МЕХАТРОННЫЕ СИСТЕМЫ, ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

**Иньков Ю.М., Космодамианский А.С., Пугачев А.А.**

Формирование задания на потокосцепление ротора в системе векторного управления асинхронным двигателем . . . . . 40

### ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ

**Бадёр М. П., Лобынцев В.В., Сидоров Н.Б.**

Обеспечение электромагнитной совместимости системы тягового электроснабжения с питающими электросетями многопульсовыми выпрямителями . . . . . 43

# Особенности расчета магнитного поля электрических машин

// Characteristics of the calculation of electric machine's magnetic field //

Глуценко М.Д., д.т.н., доцент,  
Горюнов И.О.

Российский университет транспорта (МИИТ), Москва

При проектировании электродвигателя постоянного тока необходимо выделить основные переменные величины, которые необходимы для проведения первоначальных расчетов или моделирования. Большинство расчетов проводится согласно машинной постоянной Арнольда. Одним из вариантов характеристического расчета электродвигателя, исходя из его физических параметров, является получение критериального уравнения или решение критериальной задачи. Наиболее ответственным элементом двигателя является воздушный зазор. Расчет индукции магнитного поля в воздушном зазоре – один из важных этапов при проектировании тягового электродвигателя.

Ключевые слова: ДК-117ДМ, критериальное уравнение, индукция магнитного поля, постоянная Арнольда.

Критериальная задача решается путем нахождения характеристического или критериального уравнения. В данной работе проводится решение такой задачи для электрического двигателя постоянного тока. Показано последовательное выведение критериального уравнения и построение картины магнитного поля электродвигателя модели ДК-117ДМ. И на примере этого двигателя показана построенная двухмерная модель и проведен расчет индукции магнитного поля в воздушном зазоре. Этот тип тягового электродвигателя установлен на подвижном составе метрополитена серии 81-717/81-714. Двигатель имеет четыре явно выраженных главных полюса и четыре

It is necessary to identify the main variables during the design process, that are essential for initial calculations or simulations. Most of the calculations are according to Arnold's coefficient. One of the variants of the characteristic calculation of the electric motor based on its physical parameters is obtaining the criterial equation or another name criterial task. The most important element of the engine is the air gap. One of the most important stages during the design of the electric motor is the calculation of the magnetic induction in the air gap.

Keywords: DK-117DM, criterial equation, magnetic induction, Arnold's coefficient.

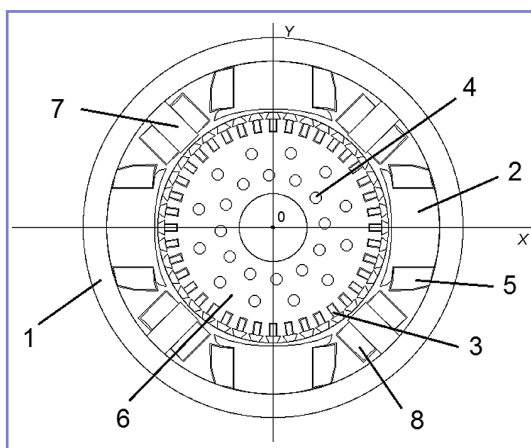


Рис. 1. Модель электродвигателя постоянного тока ДК 117 ДМ:

1 – остов; 2 – сердечник главного полюса;  
3 – обмотка якоря; 4 – продольный воздушный канал;  
5 – катушка обмотки возбуждения главного полюса;  
6 – сердечник якоря; 7 – сердечник дополнительного полюса; 8 – катушка обмотки возбуждения дополнительного полюса

дополнительных полюса. Номинальное напряжение двигателя – 375 В. Модель электродвигателя представлена на рис. 1.

Согласно [1] необходимо выделить основные переменные величины исследуемого объекта для проведения расчетов, связанных с моделированием. Большинство расчетов проводится согласно машинной постоянной Арнольда – известной зависимостью среди проектировщиков электродвигателей [2, 9, 10]. Эта постоянная показывает отношение между следующими переменными величинами в электродвигателе

$$C_A = \frac{D^2 \cdot I_\delta \cdot \Omega}{P'} \quad (1)$$

где  $D$  – диаметр якоря электродвигателя постоянного тока, м;

$I_\delta$  – расчетная длина магнитопровода, м;

$\Omega$  – синхронная угловая скорость, рад/с;

$P'$  – расчетная мощность, ВА.

Если определить зависимость постоянной Арнольда от расчетной мощности  $C_A = f(P')$ , можно получить базовые зависимости для расчетов разных электродвигателей. В то же время, как известно, машинная постоянная Арнольда не является константой и зависит от целого ряда факторов, таких как напряжение, электромагнитные нагрузки, система охлаждения, изоляция и т.д. Например, с увеличением электромагнитных нагрузок машинная постоянная будет уменьшаться.

Таким образом становится очевидно, что геометрические размеры двигателя являются важными для составления характеристического уравнения. В свою очередь, наиважнейшим физическим параметром тягового электродвигателя является величина воздушного зазора как элемента участка магнитной цепи с наибольшим сопротивлением, хотя сам воздушный зазор относительно главных размеров машины ничтожно мал. Для участка цепи в воздушном зазоре (участок с наивысшим магнитным сопротивлением

[4]) учитываются многие факторы, например, зубчатость якоря, длина воздушного зазора. Поэтому для участка магнитной цепи в воздушном зазоре вместо длины  $l_\delta$  вводится буквенное обозначение  $\delta_B$

$$l_\delta = \delta_B = K_\delta \cdot \delta, \quad (2)$$

где  $K_\delta$  – коэффициент зубчатости якоря;  
 $\delta$  – величина воздушного зазора, м.

Согласно машинной постоянной образуется связь между размерами машины и электромагнитными нагрузками. При предварительном расчете конструкторы выбирают индукцию в воздушном зазоре  $B$  и линейную нагрузку  $A$ . Индукцию в воздушном зазоре определяют по формуле [10]

$$B_{\text{ном}} = \frac{\Phi_m}{\alpha_\delta \cdot \tau \cdot l_\delta}, \quad (3)$$

где  $\Phi_m$  – магнитный поток, Вб;  
 $\alpha_\delta$  – расчетный коэффициент полюсного перекрытия;  
 $\tau$  – полюсное деление.

Для составления габаритного расчета определяются либо основные размеры двигателя, либо руководствуются отношением длины якоря, в зависимости от типа электродвигателя, к его внешнему или внутреннему диаметру статора  $\lambda$  [5]. При проектировании первых электрических машин устанавливалась взаимозависимость между главными размерами, поэтому выбор их определялся на основании технических рекомендаций. При проектировании необходимо учесть следующие особенности между главными размерами электродвигателя: с увеличением длины якоря увеличивается и общая длина машины, но при этом, исходя из зависимости  $\lambda$ , уменьшается диаметр лобовой части двигателя, соответственно, большая длина магнитной цепи расположена под магнитопроводом – это способствует увеличению КПД машины и снижению момента инерции якоря. В то же время ухудшаются условия охлаждения и коммутации тягового двигателя [2]. В соответствии с машинной постоянной Арнольда при увеличении электромагнитных нагрузок или, что является следствием, с ростом линейной нагрузки будет лучше использоваться объем якоря. Единственным препятствием к этому является рост нагрева токоведущих частей внутри электродвигателя, это в свою очередь приводит к ухудшению коммутации и проблемам с теплоизоляцией, т.е. ограничение связано с классом нагревостойкости изоляции.

После приведенного анализа тягового электродвигателя составлен список

характеристических элементов, с помощью которых можно описать электромагнитные процессы и взаимодействия основных элементов электродвигателя. Для нахождения критериального уравнения необходимо воспользоваться найденными характеристическими элементами. Такими элементами будут: магнитный поток  $\Phi$ , Вб; величина воздушного зазора  $\delta$ , м; магнитная индукция в воздушном зазоре  $B_\delta$ , Тл; магнитодвижущая сила  $F$ , А.

В таблице 1 показаны в структурном виде в удобной форме записи выделенные параметры – характеристические элементы для электродвигателя постоянного тока – и указаны формулы размерностей параметров. Размерности имеют классическую форму записи, поскольку призваны отображать как механические, так и электромагнитные зависимости, имеют вид  $[L, M, T, \mu]$  (длина, масса, время и магнитная проницаемость соответственно). Порядок выбора именно такой формы записи есть во многих источниках, в частности [6].

После записи таблицы 1 составляется полная таблица размерностей (таблица 2). В ней описание физических параметров происходит с помощью формул размерности, которые имеют при этом только условные обозначения: строчки таблицы – это параметры, их число равно 4,  $m = 4$ ; столбцы – число основных единиц измерения,  $q = 4$ , они образуются показателями степени при основных единицах измерения, значениями  $L, M, T, \mu$ . На основании таблицы 2 создается полная матрица размерностей с рангом 4. Число

независимых параметров равняется числу ранга,  $k = 4$  [3, 11].

При заданных параметрах рассматриваемой системы (электродвигатель постоянного тока) для применения теории подобия необходимо иметь один критерий подобия или безразмерный комплекс – П-переменную. Для решения составляется матрица

$$\|A\| = \begin{vmatrix} -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 1 & \frac{3}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} \\ -1 & -1 & 0 & 1 \\ \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} \end{vmatrix}.$$

Для определения выражений критериев подобия необходимо перегруппировать зависимость в следующую запись:

$$f(X_1, X_2, X_3, X_4) = 0. \quad (4)$$

Затем получена форма записи параметров после перегруппировки и замены параметров их принятыми буквенными обозначениями. Исходная формула для определения критериев подобия в общем виде

$$P_i = \frac{X_{k+i}}{X_1^{x_i}, \dots, X_k^{z_i}}. \quad (5)$$

Таким образом, взяв фундаментальное решение матрицы за основу, выводятся итоговые степени параметров

$$Z = \left(\frac{1}{2}, 0, 1, -\frac{1}{2}\right). \quad (6)$$

После определения значений выражения для критериев подобия, основываясь на форме записи, указанной выше, П-переменная записывается как произведение каждого из параметров и группы независимых параметров

Таблица 1. Размерности переменных величин

Физическая величина – параметр	Обозначение		Формула размерности
	Принятое	Условное	
Магнитная индукция в воздушном зазоре	$B_\delta$	$X_1$	$L^{-\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1} \mu^{\frac{1}{2}}$
Магнитодвижущая сила	$F$	$X_2$	$L^{\frac{1}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1} \mu^{-\frac{1}{2}}$
Величина воздушного зазора	$\delta$	$X_3$	$L$
Магнитный поток	$\Phi$	$X_4$	$L^{\frac{3}{2}} M^{\frac{1}{2}} T^{-1} \mu^{\frac{1}{2}}$

Таблица 2. Таблица размерностей

Параметр	Размерность			
	$L$	$M$	$T$	$\mu$
$X_1$	$-\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	-1	$\frac{1}{2}$
$X_2$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	-1	$-\frac{1}{2}$
$X_3$	1	0	0	0
$X_4$	$\frac{3}{2}$	$\frac{1}{2}$	-1	$\frac{1}{2}$

в соответствующих степенях. Выведенный критерий подобия в условных обозначениях

$$\Pi_i = \frac{X_1 \cdot X_3^2}{X_4^2} \quad (7)$$

Получен безразмерный комплекс. Расчет был произведен согласно П-теореме Бэкингема, число безразмерных комплексов равно разности между существенными физическими величинами и первичными величинами. Для удобного дальнейшего расчета полученный безразмерный комплекс возводится в степень 2. Таким образом, общее выведенное выражение критерия подобия будет иметь следующий вид согласно [7]:

$$\Pi_0 = \frac{B \cdot \delta^2}{\Phi} \quad (8)$$

### Составление критериального уравнения

Так как в данном случае решается задача обоснования выбора характеристических элементов применительно к тяговому электродвигателю постоянного тока, то наиболее существенной величиной, характеризующей магнитное поле, будет магнитодвижущая сила МДС якоря  $F_{я'}$ ,  $F_{ГП}$ ,  $F_{ДП}$  главных полюсов и дополнительных полюсов. Применение методов теории подобия и анализа размерностей показывает, что магнитное поле в любой точке сечения электродвигателя постоянного тока в установившемся режиме характеризуется функциональной зависимостью между безразмерными величинами

$$\Pi_0 = f(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3). \quad (9)$$

$$\text{где } \Pi_0 = \frac{B \cdot \delta^2}{\Phi};$$

$$\Pi_1 = \frac{F_{я'}}{F_{ГП}};$$

$$\Pi_2 = \frac{F_{я'}}{F_{ДП}};$$

$$\Pi_3 = \frac{F_{ГП}}{F_{ДП}}.$$

Для проведения исследования найденных критериальных зависимостей применен численный метод решения уравнений Пуассона. Расчет и построение картины магнитного поля был проведен на программе Faradei для ПК, которая проводит необходимые вычисления в двухмерной системе координат. Программный код написан на языке Ассемблер для среды Windows и рекомендуется авторами как элемент программного обеспечения для расчета модели электродвигателя. Расчеты картины магнитного поля электродвигателя выполнены в соответствии с теорией планирования экспериментов [12]. Поэтому в результате расчетов проводилось варьирование независимых переменных критериального уравнения  $\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3$ . Результаты каждого расчета были сгруппированы и представлены в форме таблицы. При этом один из критериев подобия является функцией других критериев, и поэтому выполняется перегруппировка выражения при соблюдении независимых критериев подобия. Для определения конкретного вида уравнения принимаются во внимание особенности критериальных зави-

симостей. Как правило, критериальное уравнение представляется в виде произведения степенных функций [13], которые обычно представляются в виде произведения степенных функций от независимых критериев

$$\Pi_{0ij} = A_{ij} \cdot \Pi_1^{a_{ij}} \cdot \Pi_2^{b_{ij}} \cdot \Pi_3^{c_{ij}}, \quad (10)$$

где  $A_{ij}, a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}$  – постоянные, зависящие от рассматриваемой точки модели;  $i, j$  – номера элементов сечения модели.

Следовательно, магнитная индукция на основе критериального уравнения в любой рассматриваемой точке, исходя из изложенного, будет определяться следующим образом:

$$B_{ij} = A_{ij} \cdot \frac{\Phi}{\delta^2} \cdot \Pi_1^{a_{ij}} \cdot \Pi_2^{b_{ij}} \cdot \Pi_3^{c_{ij}}. \quad (11)$$

Как было сказано, анализ размерностей позволяет найти безразмерные комплексы, которые описывают принципиальные отношения или зависимости в том или ином процессе (объекте). После составления критериального уравнения принимает следующий окончательный вид:

$$\frac{B \cdot \delta^2}{\Phi} = A \cdot \left(\frac{F_{я'}}{F_{ГП}}\right)^a \cdot \left(\frac{F_{я'}}{F_{ДП}}\right)^b \cdot \left(\frac{F_{ГП}}{F_{ДП}}\right)^c. \quad (12)$$

Таким образом, основываясь на теории магнитного поля, можно охарактеризовать выражение в скобках критериального уравнения как отношение магнитодвижущей силы якоря, главных полюсов и дополнительных полюсов. Или еще более упрощенно – как отношение характеристик магнитного поля в одной точке измерения к магнитному полю, измеренному в другой точке, т.к. индукция магнитного поля является основной физической величиной, характеризующей магнитное поле в каждой его точке [8].

Для нахождения значения индукции магнитного поля в воздушном зазоре необходимо провести расчет магнитного поля электродвигателя. При решении дифференциального уравнения для векторного магнитного потенциала используют численные методы расчетов на основании уравнения Максвелла. По результатам расчетов, проведенных на построенной модели электродвигателя ДК-117ДМ для электропоезда 81-717/81-714, получена

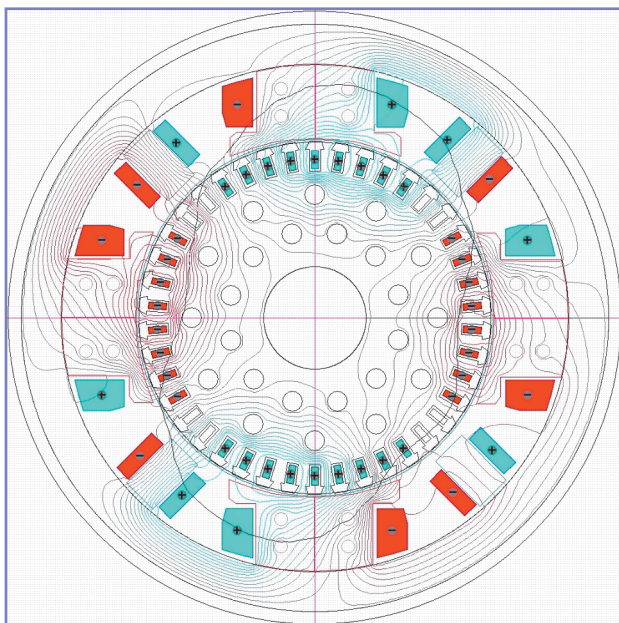


Рис. 2. Магнитное поле обмотки якоря, главных и дополнительных полюсов и распределение индукции

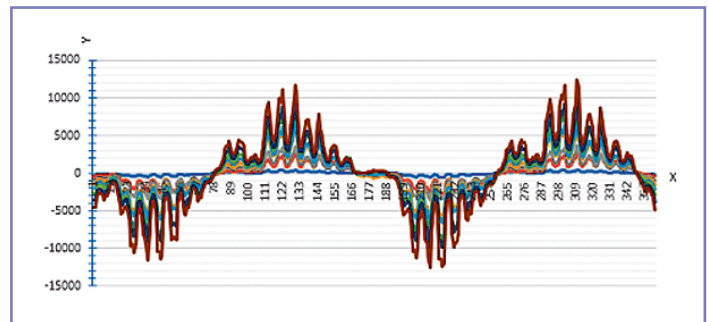


Рис. 3. График распределения индукции магнитного поля в воздушном зазоре

картина магнитного поля в виде распределения магнитных силовых линий.

На рис. 2 показано магнитное поле электродвигателя постоянного тока, обусловленное токами обмотки якоря, токами обмотки возбуждения главных и дополнительных полюсов, индукцией магнитного поля в зазоре между якорем и сердечником главных и дополнительных полюсов.

На рис. 3 показан график распределения индукции магнитного поля в воздушном зазоре, полученный при проведении экспериментальных расчетов (при возбуждении обмотки якоря, главного и дополнительного полюса вместе, по отдельности и во всевозможных сочетаниях – всего 8 расчетов). На оси ОХ в развернутом виде представлена линия окружности, разделенная на 360 градусов, проходящая вдоль воздушного зазора между якорем и сердечниками главных и дополнительных полюсов. Ось ОУ характеризуют значения распределения магнитной индукции. Сами значения найдены экспериментально в условных величинах. Единица измерения магнитной индукции – Тл. Однако и в таком виде полученные значения не противоречат расчетам критериального уравнения, поскольку П-переменные являются безразмерными величинами.

### **Выводы**

Проведен анализ двигателя постоянного тока ДК-117ДМ. Найдены характеристические параметры электродвигателя, на основании которых получены безразмерные комплексы  $P_{\sigma}$ ,  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ . Составлено критериальное уравнение, характеризующее двигатель постоянного тока. Кроме этого, была построена двухмерная модель электродвигателя и проведен расчет индукции магнитного поля в воздушном зазоре.

### **Литература**

1. Веников В.А. Теория подобия и моделирование: учебник / Веников В.А., Веников Г.В. – 4-е изд. – М.: Книжный дом «Либроком», 2014.
2. Копылов И.П. Проектирование электрических машин. – М.: Энергия, 1980.
3. Мышкис А.Д. Лекции по высшей математике: учебное пособие. 5-е изд. – СПб.: Издательство «Лань», 2007.
4. Арнольд Э. Машины постоянного тока. Т. 1. Теория и исследование / Э. Арнольд, И.Л. Лакур. – М.: Государственное техническое издательство, 1931.
5. Шуйский В.П. Расчет электрических машин. – Л.: Энергия, 1968.
6. Хантли Г. Анализ размерностей. – М.: Издательство «Мир», 1970.
7. Юдаев Б.Н. Теплопередача: учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 1973.
8. Расовский Э.И. Общая электротехника в рисунках и чертежах. Издание второе переработанное. Часть 1. Основы электротехники. – Л.: Государственное энергетическое издательство, 1952.
9. Гольдберг О.Д. Проектирование электрических машин / Гольдберг О.Д., Гурин Я.С., Свириденко И.С. – М.: Высшая школа, 1984.
10. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. Т. 1. – М.: Издательство МЭИ, 2004.
11. Кремер Н.Ш. Высшая математика для экономистов: учебник для вузов / Н.Ш. Кремер, Б.А. Путко, И.М. Тришин, М.Н. Фридман. – М.: ЮНИТИ, 2002.
12. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. / Издание второе. – М.: Издательство «Наука», 1976.
13. Бриджмен П.В. Анализ размерностей, перевод со второго английского издания под редакцией акад. С.И. Вавилова. – Л.: ОНТИ государственное технико-технологическое издательство, 1934.

### **Глуценко Михаил Дмитриевич**

Родился в 1947 году. Окончил МИИТ по специальности «Инженер-электромеханик путей сообщения». Доктор технических наук, доцент. В 1999 году защитил диссертацию по теме «Проблемы эксплуатационной диагностики тяговых электродвигателей подвижного состава и пути их решения». Опыт работы – 47 лет. В настоящее время работает профессором кафедры «Электропоезда и локомотивы» РУТ (ММИТ). Имеет 70 публикаций, 4 авторских свидетельства.

### **Горюнов Иван Олегович**

Родился в 1991 году. В 2015 году окончил МГУПС МИИТ по специальности «Электрический транспорт железных дорог». В настоящее время – аспирант кафедры «Электропоезда и локомотивы» РУТ (ММИТ). Имеет 5 публикаций.

### **Glushchenko Michael**

Was born in 1947. Graduated from Moscow State University of Railway Engineering with "Electrical engineer of lines of communication". Mr. Glushchenko is a Doctor of Engineering Science, associate professor. In 1999 presented a thesis on "The problems of operational diagnostics of traction electric motors of rolling stock and ways to solve them" Has working experience of 47 years. At present works as a professor of "Electric trains and locomotives" at Moscow State University of Railway Engineering. Has 70 publications, 4 author's certificates.

### **Goryunov Ivan**

Was born in 1991. In 2015 graduated from Moscow State University of Railway Engineering with "Electric transport of railways". At present is a post-graduate student at "Electric trains and locomotives" faculty at Moscow State University of Railway Engineering. Has 5 publications.