



RUDN
university

Федеральное автономное государственное
образовательное учреждение высшего образования
«РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ДРУЖБЫ НАРОДОВ»

**ТРУДЫ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ
КОНФЕРЕНЦИИ
С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ
«ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ – 2018»**

Москва, 3–5 мая 2018 г.

с. 86



Москва

Российский университет дружбы народов
2018

УДК 62:33(063)
ББК 30
Т78

Утверждено
РИС Ученого совета
Российского университета
дружбы народов

Под общей редакцией
кандидата технических наук, доцента *М.И. Харуна*

Ответственный за подготовку издания к публикации –
И.А. Мамиева

Т78 **Труды научно-практической конференции с международным участием «Инженерные системы – 2018».**
Москва, 3–5 мая 2018 г. / под общ. ред. М. И. Харуна. –
Москва : РУДН, 2018. – 208 с. : ил.

ISBN 978-5-209-08702-1

Приводится содержание основных докладов Научно-практической конференции с международным участием «Инженерные системы – 2018», проходившей 3-5 мая 2018 г. в Москве. Конференция была организована департаментом Архитектуры и строительства Инженерной академии, Российского университета дружбы народов.

В рамках Научно-практической конференции с международным участием работали 5 секций. Материалы для публикации отобраны Оргкомитетом конференции в соответствии с рекомендациями независимых рецензентов и расположены по секциям. Труды публикуются с сохранением стиля и орфографии авторов.

Труды Научно-практической конференции с международным участием будут представлять интерес для научных работников, аспирантов, инженеров, занимающихся аналогичными задачами, и будут полезны для преподавателей высших учебных заведений математического и технического профиля.

Подготовлено Оргкомитетом Научно-практической конференции с международным участием «Инженерные системы – 2018».

Мероприятие проведено при финансовой поддержке Инженерной академии РУДН.

УДК 62:33(063)
ББК 30

ISBN 978-5-209-08702-1

© Коллектив авторов, 2018
© Российский университет
дружбы народов, 2018

Секция 2 МЕХАНИКА И МЕХАТРОНИКА

Забудский Е.И. Оптимизация магнитной цепи управляемых реакторов электромашинного типа..... 86

Секция 3 ГЕОЛОГИЯ, ГОРНОЕ И НЕФТЕГАЗОВОЕ ДЕЛО

Георгиевский А.Ф., Бугина В.М., Георгиевский А.А., Перспективы золотонности Сочинского района (Учебный геологический полигон РУДН) 94

Чжан Л. Освоение попутного нефтяного газа и его перспективы в мире..... 105

Доскалов А.И. Выбор и обоснование параметров открытой разработки Оленинского месторождения каменного угля (угольный разрез «холодный»)..... 111

Кравцов В.В. Прогноз геодинамической опасности при освоении месторождений нефти и газа Западной Сибири на основе линейного анализа космических снимков..... 118

Эссо Г. Идентификация стратиграфических последовательностей маастрихта в скважине F1 Ивуарийского осадочного бассейна... 121

Секция 4 МАШИНОСТРОЕНИЕ И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

Алленов Д.Г., Родионова А.В., Феокистова Д.А. Особенности современного испытательного оборудования..... 127

Антипов Ю.А., Халифе Х., Жариков И.А. Пути снижения тепловых и гидравлических потерь при транспортировке нефти в условиях холодного климата..... 132

Алленов Д.Г., Пинаев Р.А., Ба Т.М., Камара А. Применение метода конечных элементов для прочностного расчета и анализа конструкции станка с целью модернизации..... 141

Шкарин К.В., Лапин М.В., Гринин А.О. Расширение возможностей акустического расходомера с помощью ЭВМ..... 145

ОПТИМИЗАЦИЯ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ УПРАВЛЯЕМЫХ РЕАКТОРОВ ЭЛЕКТРОМАШИННОГО ТИПА

Е.И. Забудский, д.т.н., профессор

Российский университет дружбы народов
ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, 117198, Россия

На основе разработанной математической модели установлены взаимосвязи соотношений размеров магнитной цепи и числа полюсов рабочей обмотки с величиной диапазона регулирования реактивной мощности, а также взаимосвязи характеристик устройств и режимов намагничивания.

Ключевые слова: управляемый реактор, вращающееся поле, поперечная магнитная цепь, математическая модель, оптимизация

Область применения управляемых реакторов с вращающимся полем (УРВ) разнообразна, но наиболее перспективно их применение в качестве регулирующего элемента статического компенсатора реактивной мощности [1]. Активная часть УРВ подобна таковой у асинхронного электродвигателя, однако функциональное назначение УРВ – регулирование диапазона потребляемой им реактивной мощности – обуславливает и отличие, а именно в УРВ зазор δ между статором и ротором уменьшен до технологического минимума, так как внутренний сердечник (он называется по аналогии ротором) неподвижен (рис. 1). В пазах магнитопровода расположены трехфазная пространственно-распределенная рабочая обмотка (РО) с числом пар полюсов p_1 и две тороидальные обмотки управления постоянного тока (i_{0a}, i_{0i}). Одна из них (ОУ1) охватывает поперечное сечение ярма статора, другая (ОУ2) – сечение ярма ротора.

Поскольку воздушный зазор между статором и ротором практически исключен, то УРВ – существенно более нелинейное устройство, чем асинхронная электрическая машина. С точки зрения максимума коэффициента регулирования реактивной мощности УРВ нелинейность характеристик его должна быть максимально выражена, однако наличие зубцово-пазового слоя обуславливает некоторую линеаризацию характеристик. Очевидно, что при определенных соотношениях размеров поперечной магнитной цепи линеаризация характеристик УРВ будет наименьшей. Поэтому *важнейшая задача – отыскать оптимальные соотношения размеров поперечной магнитной цепи*. Критерий оптимальности – максимум коэффициента (диапазона) регулирования реактивной мощности, потребляемой УРВ

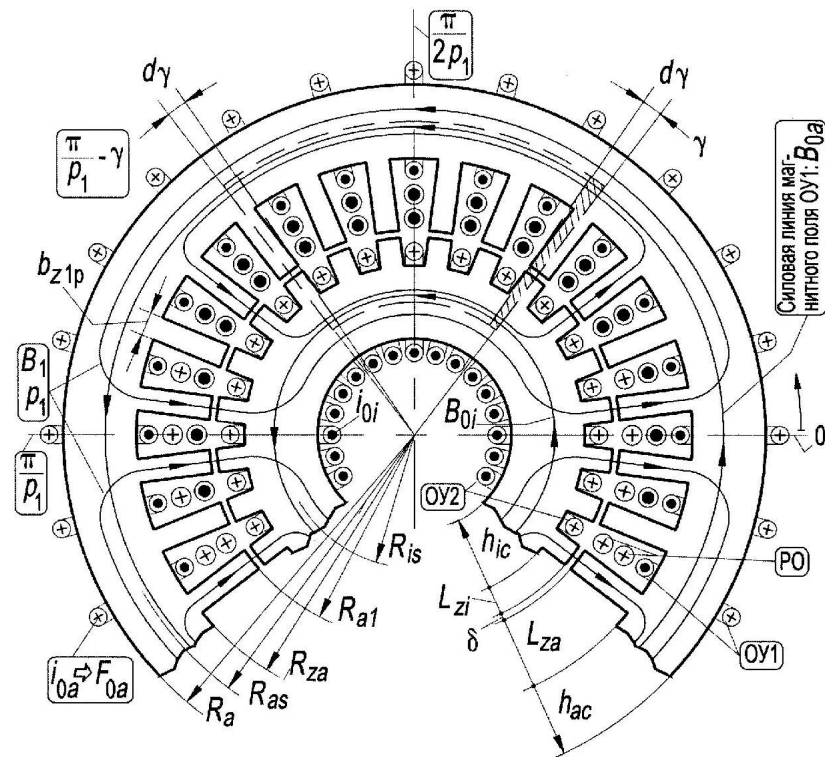


Рис. 1. Поперечная магнитная цепь УРВ
(изображение схематическое)

Результаты выполненных исследований используются при проектировании УРВ. При этом необходимо определить величины, характеризующие поперечную геометрию магнитопровода: ширину (b_{z1p}, b_{z2p}) и высоту (L_{za}, L_{zi}) зубцов, высоту ярм (h_{ac}, h_{ic}), радиальную длину зазора δ между статором и ротором. Необходимо также выбрать рациональное число пар полюсов p_1 рабочей обмотки. От этих величин зависит мощность цепи управления, обеспечивающая заданный диапазон регулирования, и приведенные расчетные затраты на изготовление и эксплуатацию реактора.

Для определения соотношений, характеризующих поперечную геометрию магнитопровода УРВ, выведено расчетное нелинейное трансцендентное уравнение (НТУ) магнитной цепи (1), состоящей из ярм, немагнитного

ззора и зубцово-пазового слоя (каждое ярмо охватывается своей тороидальной обмоткой управления, а трехфазная распределенная обмотка уложена в пазы статора). Учтены, как и в теории электрических машин, тангенциальная составляющая магнитной индукции в ярмах и радиальная – в зубцах. Не учитываются активное сопротивление и индуктивность рассеяния обмоток, потери на гистерезис и вихревые токи, а распределение магнитного поля принято одинаковым по всей длине магнитопровода

$$\begin{aligned}
 & -\sum_{\mu} F_{\mu}^* p_{\mu} \sin(\omega_{\mu} t - p_{\mu} \gamma + \xi_{\mu}) + \frac{F_{0a}^*}{\pi} \mp \frac{F_{0i}^*}{\pi} = \\
 & = -2\{\text{Sh}[B_{0a}^* + \sum_{\nu} B_{\nu}^* \sin(\omega_{\nu} t - p_{\nu} \gamma + \psi_{\nu})] + \\
 & + k_s \text{Sh}[\mp B_{0a}^* + \sum_{\nu} B_{\nu}^* \sin(\omega_{\nu} t - p_{\nu} \gamma + \psi_{\nu})] + \\
 & + L_{za}^* d_a^* \sum_{\nu} B_{\nu}^* p_{\nu}^2 \sin(\omega_{\nu} t - p_{\nu} \gamma + \psi_{\nu}) \text{Ch} d_a^* B_{\nu}^* p_{\nu} \cos(\omega_{\nu} t - p_{\nu} \gamma + \psi_{\nu}) + \\
 & + L_{zi}^* d_i^* \sum_{\nu} B_{\nu}^* p_{\nu}^2 \sin(\omega_{\nu} t - p_{\nu} \gamma + \psi_{\nu}) \text{Ch} d_i^* B_{\nu}^* p_{\nu} \cos(\omega_{\nu} t - p_{\nu} \gamma + \psi_{\nu}) + \\
 & + \delta^* \sum_{\nu} B_{\nu}^* p_{\nu}^2 \sin(\omega_{\nu} t - p_{\nu} \gamma + \psi_{\nu})\}. \quad (1)
 \end{aligned}$$

В уравнении (1) отношения

$$\begin{aligned}
 F_{\mu}^* &= F_{\mu}/\alpha R_{as}; \quad F_{0a}^* = F_{0a}/\alpha R_{as}; \quad F_{0i}^* = F_{0i}/\alpha R_{as}; \quad B_{\nu}^* = \beta B_{\nu} \\
 L_{za}^* &= L_{za}/R_{as}; \quad L_{zi}^* = L_{zi}/R_{as}; \quad d_a^* = \frac{2\pi h_{ac}}{z_1 b_{z1p}}; \quad d_i^* = \frac{2\pi h_{ic}}{z_2 b_{z2p}}; \\
 k_s &= R_{is}/R_{as}; \quad \delta^* = \delta h_{ac}/\alpha \beta \mu_0 R_{a1} R_{as} - \text{безразмерные величины.} \quad (2)
 \end{aligned}$$

При заданных амплитуде основной гармоники магнитного поля в ярме B_1^* и величинах МДС подмагничивания F_{0a}^* и F_{0i}^* уравнение (1) решается на ПК относительно искомым амплитуд гармоник насыщения магнитной индукции B_{ν}^* и МДС F_{μ}^* трехфазных пространственно-распределенных обмоток. Для решения необходимо задаться количеством учитываемых ν -х гармоник насыщения и диапазоном значений соотношений размеров (2), характеризующих поперечную геометрию магнитной цепи.

Уравнение (1) применимо и для расчета магнитной цепи асинхронных двигателей с учетом насыщения, а также режимов работы статических ферромагнитных устройств с ВМП другого функционального назначения.

Система НТУ, количество которых соответствует числу неизвестных, составлена по методу Галеркина [1]. С этой целью принята на отрезке $\pi/2 \leq \gamma \leq 3\pi/2$ полная ортогональная тригонометрическая система 1, $\sin \gamma$, $\cos 2\gamma$, $\sin 3\gamma$, ... базисных функций и записаны, согласно методу, условия ортогональности уравнения (1) для базисных функций.

Для решения системы НТУ принят безытерационный метод [1], согласно которому эта система преобразуется в систему нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ). Последняя решается методом

Рунге-Кутта с модификацией Фельберга. С целью приведения системы НТУ к системе нелинейных ОДУ в уравнения системы НТУ вводится параметр λ , принимающий значения $-0 \leq \lambda \leq 1$. Параметр λ вводится в систему так, чтобы выполнялись условия: при $\lambda = 1$ эта система обращалась в исходную систему НТУ; при $\lambda = 0$ можно было без затруднения найти ее решение.

Для нахождения решения системы параметр λ принимается за независимую переменную, а неизвестные F_1^* , B_2^* , B_3^* , ..., B_{0a}^* , B_{0i}^* считаются функциями от λ ; уравнения системы дифференцируются по этой переменной. В результате получается система алгебраических уравнений, линейных (ЛАУ) относительно производных (система решается методом Гаусса):

$$\frac{dF_1^*}{d\lambda}, \frac{dB_2^*}{d\lambda}, \frac{dB_3^*}{d\lambda}, \dots, \frac{dB_{0a}^*}{d\lambda}, \frac{dB_{0i}^*}{d\lambda}.$$

Чтобы найти далее решение системы НТУ, численно интегрируются по параметру λ значения производных. Интегрирование проводится с заданной точностью на интервале $0 \leq \lambda \leq 1$ при начальных условиях $F_1^* = F_1^{*0}$, $B_{0a}^* = B_{0a}^{*0}$, $B_{0i}^* = B_{0i}^{*0}$, $B_2^* = B_2^{*0}$, $B_3^* = B_3^{*0}$, ..., $\lambda = 0$. При значении параметра $\lambda = 1$ получаем искомое решение исходной системы НТУ.

В результате реализации алгоритма на ПК определяются оптимальные значения коэффициентов (2), характеризующих соотношение размеров поперечной магнитной цепи; находится рациональное число пар полюсов трехфазной рабочей обмотки реактора; определяется зависимость амплитуд B_{ν}^* учитываемых гармоник насыщения, от всех варьируемых величин; отыскивают оптимальный режим намагничивания реактора [2] с точки зрения его основного назначения – регулирования реактивной мощности.

Далее приведены некоторые результаты расчета, их анализ и установлены рациональные геометрические соотношения L_{za}^* и d_a^* магнитопровода реактора и число пар полюсов РО реактора p_1 . Критерии для выбора значений этих величин – минимум амплитуды МДС F_1^* при холостом ходе реактора (см. рис. 2,а,б) и ее максимум в рабочем режиме (то есть при подмагничивании, см. рис. 3,а,б). Это, в свою очередь, определяет наибольшее значение коэффициента регулирования рабочего тока k_{γ} .

Из анализа зависимостей, представленных на рис. 2 и 3, следует, что для получения наибольшего k_{γ} трехфазную обмотку необходимо выполнить с $p_1 = 1$, а магнитную систему изготовить из пластин серийной 4-полюсной электрической машины переменного тока, причем, относительный зазор – $\delta^* \leq 50$. Если $\delta^* > 50$, то возможен либо названный вариант, либо вариант с той же обмоткой при $p_1 = 1$, но с магнитопроводом, изготовленным на базе пластин 2-полюсной машины. Пластины статора серийных 4- и 2-полюсных машин характеризуются соответственно относительными величинами $L_{za}^* \approx 0,22$, $d_a^* \approx 0,6$ и $L_{za}^* \approx 0,22$, $d_a^* \approx 1,1$. Значения этих величин необходимо использовать при проектировании реактора.

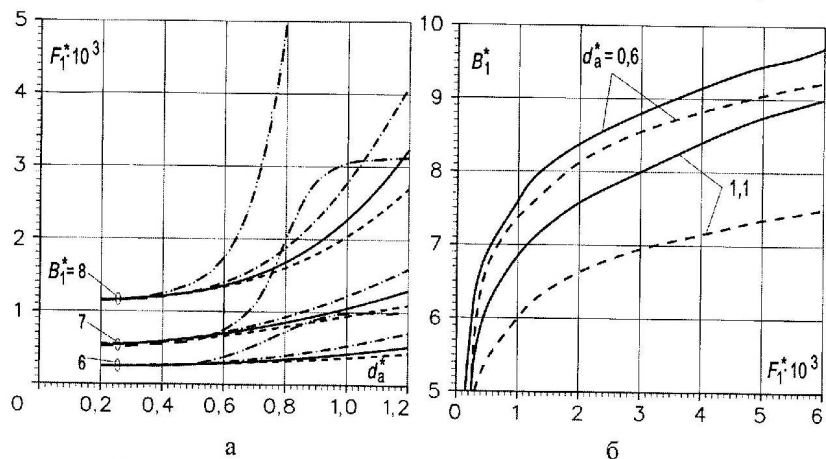


Рис. 2. Графическая интерпретация результатов математического моделирования магнитной цепи реактора при холостом ходе:

a – зависимость $F_1^* = f(d_a^*)$ при $\delta^* = 0, F_0^* = 0$: $p_1 = 1, L_{za}^* = 0,11$ (пунктирные); $p_1 = 1, L_{za}^* = 0,22$ (сплошные); $p_1 = 1, L_{za}^* = 0,44$ (штрих-пунктирные); $p_1 = 2, L_{za}^* = 0,22$ (штрих-пунктирные); *б* – зависимость $F_1^* = f(B_1^*)$ при $\delta^* = 0, F_0^* = 0, L_{za}^* = 0,22$: $p_1 = 1$ (сплошные); $p_1 = 2$ (пунктирные)

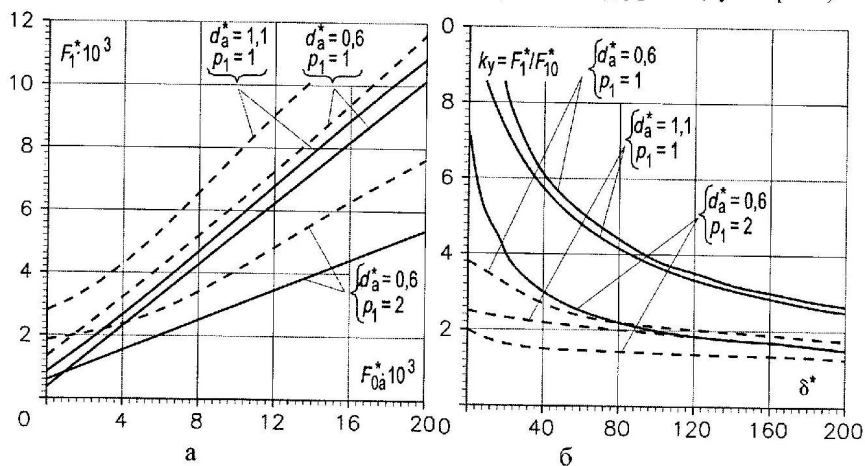


Рис. 3. Графическая интерпретация результатов математического моделирования магнитной цепи реактора при подмагничивании:

a – зависимость $F_1^* = f(F_{0a}^*)$ при $\delta^* = 0, L_{za}^* = 0,22$: $B_1^* = 6$ (сплошные); $B_1^* = 8$ (пунктирные). *б* – зависимость $k_y = f(\delta^*)$ при $L_{za}^* = 0,22, F_{0a}^* = 9000$: $B_1^* = 6$ (сплошные); $B_1^* = 8$ (пунктирные)

Для проверки расчетных данных был изготовлен опытный образец УРВ на базе магнитопровода серийного двухполюсного асинхронного двигателя с РО, выполненной с $p_1 = 1$, и образец с РО, имеющей также $p_1 = 1$, но магнитопровод его изготовлен на основе четырёхполюсного двигателя. Результаты эксперимента подтвердили правильность выводов, сделанных на основе анализа математической модели (1) магнитной цепи УРВ.

Выводы

1. Разработана на основе теории нелинейных магнитных цепей обобщенная математическая модель (ее алгоритм и программная реализация) поперечной магнитной цепи статических ферромагнитных устройств электромашинного типа и режимов их намагничивания, которая позволяет исследовать и установить: неизвестные ранее взаимосвязи соотношений размеров магнитной цепи и числа пар полюсов РО с величиной диапазона регулирования реактивной мощности; взаимосвязи между характеристиками устройств и их режимами намагничивания – вынужденное намагничивание, свободное намагничивание по 2-й гармонике насыщения магнитного поля, предложенный автором режим симметричного намагничивания.

2. Показано, что оптимальным, с точки зрения максимума коэффициента усиления по току, является управляемый реактор с ВМП в режиме симметричного намагничивания, имеющий трёхфазную двухполюсную рабочую обмотку и поперечную геометрию магнитопровода, соответствующую статорным пластинам серийных четырёхполюсных электрических машин переменного тока общепромышленного назначения. Последнее позволяет осуществить производство реакторов с вращающимся полем на электромашиностроительных заводах без больших дополнительных затрат.

3. Установлено, что в режиме симметричного намагничивания реактор электромашинного типа выгодно отличаются следующие качества: увеличенный диапазон регулирования реактивной мощности, усиленный стабилизирующий эффект по регулируемому току, пониженные потери в стали, повышенное быстродействие и отсутствие "трясущих" вибраций магнитопровода. Определено, что режим свободного намагничивания по 2-й гармонике близок по своим достоинствам к режиму симметричного намагничивания. Перечисленные режимы реализованы в конструкциях реакторов не только электромашинного, но и трансформаторного типа.

Список литературы

1. *Забудский Е.И.* Математическое моделирование управляемых электромагнитных реакторов: монография. М. : ООО «Мегаполис». 2018. 355с.
2. *Zabudsky Evgeny.* Modeling and Analysis of Electromagnetic Modes of Electric Power Devices // International Journal "Information Technologies & Knowledge", Vol. 9, Number 1, ITHEA, Sofia (Bulgaria). June 2015. P. 80–99.

Abstract. Based on the developed mathematical model, the relationships between the sizes of the magnetic circuit and the number of poles of the working winding with the magnitude of the reactive power control range are established, as well as the interconnection of the characteristics of devices and magnetization regimes.

Key words: controlled reactor, rotating field, transverse magnetic circuit, mathematical model, optimization

Научно-практическая конференция
с международным участием

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ - 2018

СЕКЦИЯ 3

ГЕОЛОГИЯ,
ГОРНОЕ И НЕФТЕГАЗОВОЕ ДЕЛО

3 - 5 мая, 2018