

01

ISSN 0013-5860



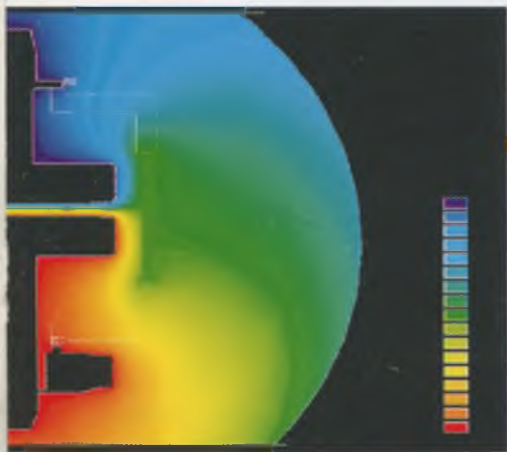
ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
6 2005

ЭНЕРГЕТИКА ИННОВАЦИЙ

Высокий научный потенциал Таврида Электрик помогает компании производить передовое оборудование для электроэнергетики и становиться лидером на рынке России среди производителей силовых выключателей и защитных аппаратов среднего класса напряжения.

Одним из наиболее технологичных элементов вакуумных выключателей серии ВВ/TEL является вакуумная дугогасительная камера (ВДК):

- при создании новых поколений аппаратов Таврида Электрик использует математическое моделирование, позволяющее спрогнозировать все физические процессы и учесть все потенциальные сложности до момента изготовления опытного образца;
- сварной наружный сильфон, обеспечивающий подвижность нижнего контакта камеры, позволяет получить высокий механический ресурс (до 2 000 000 циклов включения-отключения) ВДК;
- исследования в области возникновения внутренних перенапряжений привели компанию Таврида Электрик к созданию уникального контактного слоя ВДК, ограничивающего возникновение опасных перенапряжений лишь несколькими случаями критичных сочетаний параметров сети;
- разработанная технология производства вакуумных камер позволяет поддерживать глубокий вакуум (10^{-6} мм.рт.), что гарантирует высокую электрическую прочность;
- аксиальное магнитное поле межконтактного промежутка поддерживает горение дуги между контактами в диффузной форме, тем самым позволяет сократить коммутационный износ контактов. При 50 000 циклах номинального тока износ главных контактов выключателя составляет менее 1 мм.



ВВ/TEL

ОПН/TEL

LSM/TEL

РВА/TEL

КРУ/TEL



МЕДАЛЬ
"ЗА ЗАСЛУГИ В
ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ"



ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ —
КОЛЛЕКТИВНЫЙ ЧЛЕН АКАДЕМИИ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ НАУК РФ
Издаётся с января 1930 года

УЧРЕДИТЕЛИ

ДЕПАРТАМЕНТ МАШИНОСТРОЕНИЯ МИНПРОМА РФ (г. МОСКВА)
АО «ЭЛЕКТРОВЫПРЯМИТЕЛЬ» (г. САРАНСК)
АООТ «ХОЛДИНГОВАЯ КОМПАНИЯ «ЭЛЕКТРОЗАВОД» (г. МОСКВА)
АО «ЭЛЕКТРОНИКА» (г. ВОРОНЕЖ)
АО «ВЭЛНИИ» (г. НОВОЧЕРКАССК)
АССОЦИАЦИЯ ИНЖЕНЕРОВ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ (г. МОСКВА)
АССОЦИАЦИЯ «АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД» (г. МОСКВА)
НТА «ПРОГРЕССЭЛЕКТРО» (г. МОСКВА)
АО «РОСЭЛПРОМ» (г. МОСКВА)

СОВЕТ УЧРЕДИТЕЛЕЙ

ЧИБИРКИН В.В., МАКАРЕВИЧ Л.В., МЕЩЕРЯКОВ В.М., СОРИН Л.Н.,
КОВАЛЕВ Ф.И. (председатель совета), ЮНЬКОВ М.Г., ПОДАРУЕВ А.И., ГЛОВАЦКИЙ А.В.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор **КОЧЕТКОВ В.Д.**

АНОШИН О.А., БЕЛКИН Г.С., БРЯНЦЕВ А.М., ДАЦКОВСКИЙ Л.Х., ДОЛКАРТ В.М., ЕВСЕЕВ Ю.А., ИНЬКОВ Ю.М.,
КОЗЯРУК А.Е., КОПЫЛОВ И.П., ЛУРЬЕ А.И., МАВЛЯНБЕКОВ Ю.У., МОСКАЛЕНКО В.В., НИКУЛИН А.А.,
РОЗАНОВ Ю.К., СЛЕЖАНОВСКИЙ О.В. (зам. главного редактора), ТРУБАЧЕВ С.Г., ТУБИС Я.Б.,
ФИНКЕЛЬ Э.Э., ФЛОРЕНЦЕВ С.Н.

Содержание журнала можно бесплатно получить в
INTERNET через службу ИНФОМАГ, организован-
ную в Московском физико-техническом институте.
Адрес сайта: <http://www.infomag.ru>

Журнал переводится на английский язык в полном
объёме и выходит в США в издательстве
"ALLERTON PRESS, INC" (18 West 27th Street New
York N.Y. 10001).

Подписаться на журнал можно в почтовых
отделениях связи по объединённому каталогу
Департамента почтовой связи. Подписной индекс
— 71111.

В редакции можно подписаться на журнал с любого
месяца и приобрести отдельные номера за
прошлые и нынешний годы.

При перепечатке ссылка на журнал
«Электротехника» обязательна.
Мнение редакции не всегда совпадает с точкой
зрения авторов статей.
За содержание рекламных материалов редакция
ответственности не несёт.
Рукописи статей не возвращаются.

Издатель: ЗАО "Знак" 101000, Москва, Главпочтамт, а/я 648.

Адрес редакции: 111250, Москва, Красноказарменная ул., 12. Телефон/факс: (095) 361-95-96
E-mail elektrotechnika@mtu-net.ru

Редактор отдела О.В. Кунавина.
Научный редактор Л.А. Романова.
Редактор З.П. Фёдорова

Сдано в набор 04.04.2005. Подписано в печать 23.05.2005. Формат 60×88 1/8
Бумага офсетная № 1. Печать офсетная. Печ. л. 8. Заказ 116.
Цена свободная. Тираж 1000 экз. Зарегистрирован Комитетом РФ по печати, регистрационный №01330.

Макет выполнен и отпечатан в ОАО «Электропривод»
107078, Москва, ул. Садовая Спасская, 1/2, стр. 5

© «Электротехника», 2005 г.

Вологодская областная универсальная научная библиотека
www.booksite.ru

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Вайнер Г.А., Строганов Б.Г. Регулируемый синхронный двигатель в системе с частотной и фазовой обратными связями 3

Вилькин М.А., Семёнов Ю.И., Никифоров Ю.Н. Повышение надёжности работы низковольтных микромашин с нормированным напряжением трогания . 10

ЭЛЕКТРОПРИВОД

Бургин Б.Ш. Управление четырёхмассовой электро-механической системой посредством синтезированной ДЭМС стабилизации скорости 15

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Джумаев С.Д. Разработка и ввод в эксплуатацию нового поколения информационно-измерительной системы "СКАЛА-МИКРО" 18

Сивков А.А., Герасимов Д.Ю., Цыбина А.С. Электроэрозионная наработка материала в коаксиальном магнитоплазменном ускорителе для нанесения покрытий 25

Размыслов В.А., Сериков А.В., Герасименко Т.В. Массогабаритные показатели электрорадиаторов трансформаторного типа 34

Бажунов В.В., Подалинский Ю.А., Кривченко Г.В. Тепловые процессы в герметизированном свинцовом аккумуляторе 37

ИССЛЕДОВАНИЯ И РАСЧЁТЫ

Нархинов В.П., Цыренжапов Б.Б. Измерение параметров сходящихся пучков электронов устройством вращающегося цилиндра Фарадея 40

Копылов С.И. Секционирование сверхпроводящих токоограничивающих устройств 44

Щербakov Г.Н., Анцелевич М.А., Удинцев Д.Н. О предельной глубине обнаружения локальных ферромагнитных объектов в толще полупроводящей среды 48

НАУЧНЫЕ ГИПОТЕЗЫ

Юркевич В.М. Распределённая электромагнитная модель электрона и устойчивость его дискретных состояний, как следствие волнового описания классической физики 53

Андроник Гевондович Иосифьян 62

CONTENTS

ELECTRIC MACHINES

Vayner G.A., Stroganov B.G. The adjustable synchronous engine in system with frequency and phase feedbacks 3

Vilikin M.A., Semyonov Yu.I., Nikiforov Yu.N. Increase of reliability of work of low-voltage micromachines with normalized by voltage start-up 10

ELEKTROPRIVOD

Burgin B.Sh. The automatic control of four-mass electro-mechanical system by means of the synthesized speed-controlled two-mass electromechanical system 15

COMPUTER FACILITIES

Djumaev S.D. Development and putting into operation an information-measuring system of new generation "SKALA-MICRO" 18

Sivkov A.A., Gerasimov D.Yu., Cybina A.S. Electro-erosive production of coating material in a coaxial magnetoplasma accelerator 25

Razmyslov V.A., Serikov A.V., Gerasimenko T.V. Mass and overall coefficients of radiators of a transformer type 34

Bajunov V.V., Podalinskiy Yu.A., Krivchenko G.V. Thermal processes in the hermetically sealed lead accumulator 37

RESEARCHES AND CALCULATIONS

Narhinov V.P., Tsyrenzhapov B.B. Measurement of parameters of converging bunches (beams) electron by device of rotating cylinder Faradeja 40

Kopylov S.I. Sectioning of superconducting fault current limiters 44

Scherbakov G.N., Anceleovich M.A., Udincev D.N. About limiting depth of detection local ferromagnetic object in thickness of the simiconducting environment 48

SCIENCE HYPOTHESES

Yurkevich V.M. Distributed electromagnetic model of the electron and stability of its discrete states, as corollary of undular exposition of classical physics ... 53

Andronic Gevondovich Iosifyan 62

Регулируемый синхронный двигатель в системе с частотной и фазовой обратными связями

ВАЙНЕР Г.А., СТРОГАНОВ Б.Г.

Рассматривается построение системы частотного регулирования синхронного двигателя (СД) с принципами частотной и фазовой автоподстройки, применяемой в радиоэлектронике. Такие системы успешно решают проблемы автоматического ввода в синхронизм и динамической устойчивости двигателя. На основе разработанной авторами математической модели и реализованной с помощью системы Simulink были исследованы механические характеристики привода при различных видах и значениях обратных связей, а также электромеханические переходные процессы, вызванные ступенчатым изменением частоты питающего напряжения и ступенчатым набросом нагрузочного момента на валу двигателя.

При построении системы частотного регулирования синхронного двигателя (СД) могут быть использованы принципы частотной и фазовой автоподстройки, применяемой в радиоэлектронике [1]. В такой системе регулирования в отличие от системы бесколлекторного двигателя постоянного тока СД сохраняет основные присущие ему свойства. В то же время решаются проблемы автоматического ввода в синхронизм и динамической устойчивости двигателя. Исследования замкнутой системы частотного регулирования синхронного двигателя (СД) с частотной (ЧОС) и фазовой (ФОС) обратными связями показали возможность построения хорошо регулируемого, динамически устойчивого электропривода, обладающего также возможностью получения требуемых механических характеристик [2–5].

В последние годы появляются публикации [6,7], указывающие на практическую реализацию САР СД на основе микропроцессорных регуляторов и идей, предложенных в [2–5], однако эти публикации не содержат никаких данных, позволяющих судить о проведённых фирмами-разработчиками исследованиях поведения указанных систем.

In clause the construction of system frequency regulations of the synchronous engine with principles frequency and phase auto tuning used in radioelectronics is considered. Such systems successfully decide problems of automatic input in synchronism and dynamic stability of the engine. On the basis of the mathematical model, developed by the authors, and system, realized with the help, Simulink, the mechanical characteristics of a drive were investigated at various kinds and values of feedbacks, and also electromechanical transients called by step change of frequency of a having voltage and step of the increase moment on the shaft of the engine.

Результаты исследований [2–5] лишь частично раскрывают картину процессов, происходящих в приводе как при синхронном вращении, так и в процессе ввода двигателя в синхронизм. Поэтому необходимо более углублённо исследовать процессы, включая статическую характеристику зависимости скорости от значения нагрузочного момента, динамики отработки возмущающих воздействий, а также процессов втягивания в синхронизм СД, являющегося объектом регулирования указанной замкнутой системы.

Базовая блок-схема системы регулирования приведена на рис.1, где СД – синхронный двигатель; ПЧ – преобразователь частоты; ЗС – задатчик скорости; ЧОС и ФОС – датчики частотной и фазовой обратных связей соответственно; Σ – сумматор.

В данной системе в соответствии со схемой ФОС является обратной связью по отклонению углового перемещения ротора относительно вращающегося поля статора, а ЧОС – обратной связью по скорости этого отклонения.

В соответствии с приведённой структурой электромеханические переходные процессы в системе описываются следующей системой уравнений (1):

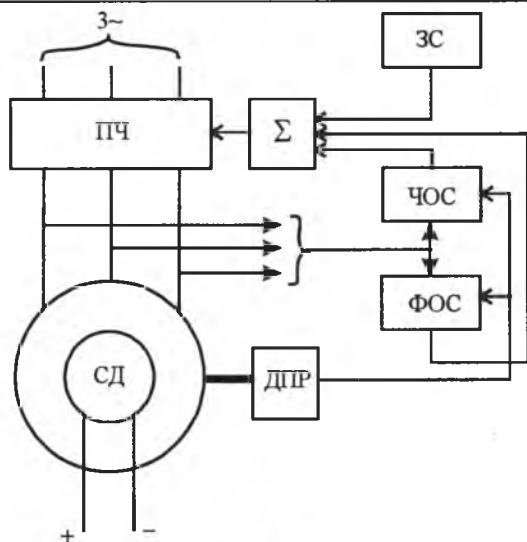


Рис.1

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{d^2\theta}{dt^2} &= -\frac{D}{J} \frac{d\theta}{dt} - \frac{M_m}{J} \sin\theta + \frac{M}{J}; \\
 \omega &= k_1(u_3 - u_\psi - u_\phi); \\
 \frac{du_\psi}{dt} &= k_\psi \frac{d^2\theta}{dt^2}; \\
 \frac{du_\phi}{dt} &= k_\phi \frac{d\theta}{dt}; \\
 M &= M'_{\text{мех}} + M_3 + M_\phi; \\
 M_\psi &= Jk_1 \frac{du_\psi}{dt}; \\
 M_\phi &= Jk_1 \frac{du_\phi}{dt}
 \end{aligned} \right\} (1)$$

где J – приведённый момент инерции двигателя и нагрузки; D – коэффициент демпфирования; M – возмущающее воздействие по моменту на валу; M_m – максимальный электромагнитный момент СД; M_d – динамическая составляющая нагрузочного момента; u_3, u_ψ, u_ϕ – напряжения задания, частотной и фазовой обратных связей, соответственно; k_1, k_ψ, k_ϕ – коэффициенты передачи ПЧ, частотного и фазового детекторов, соответственно; θ – угол внутреннего сдвига СД; ω – угловая синхронная частота; $M_{\text{мех}}$ – момент механической нагрузки на валу двигателя, M_3, M_ψ, M_ϕ – составляющие динамического возмущающего воздействия.

Система уравнений (1) составлена при следующих условиях и допущениях:

- СД – неявнополюсный;
- магнитная цепь СД ненасыщена;
- фазные обмотки статора симметричные и распределение потока в воздушном зазоре синусоидальное;
- к статорным обмоткам двигателя приложена симметричная система синусоидальных напряжений;
- при регулировании частоты вращения двигателя сохраняются постоянный ток возбуждения и постоянное соотношение между частотой и напряжением источника статорных обмоток двигателя:

$$\frac{U}{U_n} = \frac{f}{f_n} = \text{const}, \quad i_b = \text{const};$$

- влиянием активных сопротивлений обмоток двигателя пренебрегаем;
- рассеянием обмоток пренебрегаем;
- электромагнитными переходными процессами в СД и ПЧ вследствие их относительно малой длительности пренебрегаем;
- коэффициент демпфирования двигателя при переходных процессах постоянный;
- фазовый и частотный детекторы являются безынерционными пропорциональными звеньями;
- возмущающим воздействием является ступенчатое увеличение момента на роторе исследуемого СД.

Аналитическое решение системы уравнений (1) представляет значительные трудности. Поэтому исследование проводилось путём математического моделирования в системе Simulink. За основу математической модели СД взята модель, описанная в [5], в которой коэффициенты J, D , и M_m были выбраны соответствующими моменту инерции, коэффициенту демпфирования и максимальному электромагнитному моменту СД реальной физической модели установки, на которой производились экспериментальные исследования:

$$J = 1,213 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}/\text{рад}; \quad D = 0,628 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}/\text{град}; \\
 M_m = 13,38 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Полная математическая модель системы уравнений (1) приведена на рис.2, где обозначения блоков и элементов соответствуют эле-

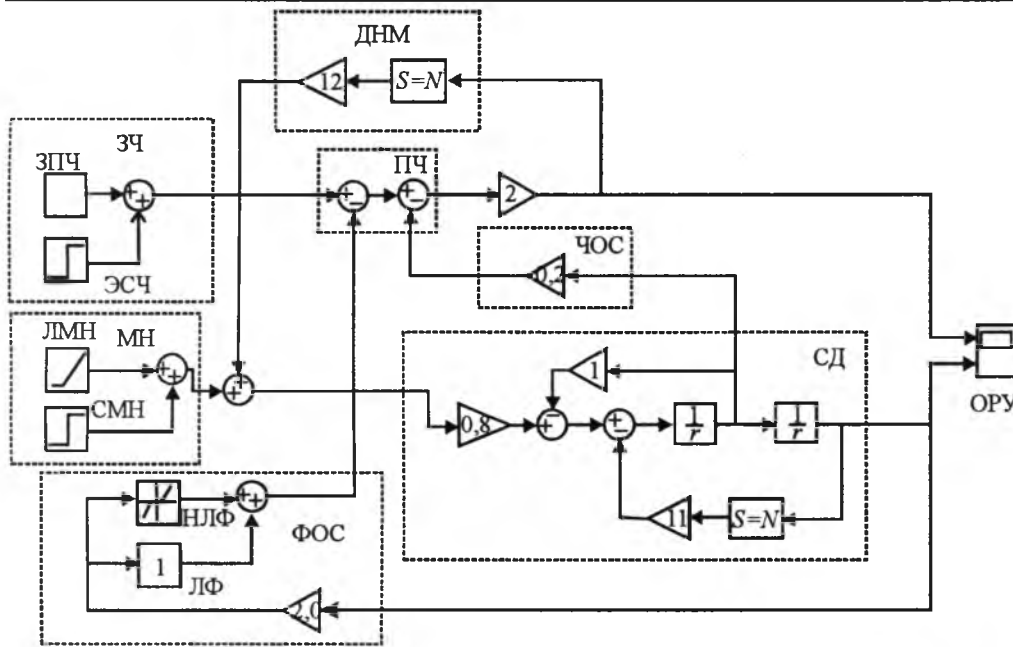


Рис.2

менением частоты питающего напряжения и ступенчатым набросом нагрузочного момента на валу двигателя.

Структурная схема системы и уравнения (1) позволяют получить уравнение частоты вращения ротора в стационарном режиме:

$$n_p = n_c = k_1 \left(u_3 - k_\phi \arcsin \frac{M}{M_m} \right). \quad (2)$$

ментам реальной системы: СД – синхронный двигатель; ЗЧ – блок задания частоты вращения поля статора; ЗПЧ – задание постоянной частоты вращения; ЗСЧ – задание ступенчато-изменяющейся частоты вращения; МН – блок задания момента нагрузки на валу двигателя; ЛМН – задание линейно-нарастающего момента нагрузки; СМН – задание ступенчато-изменяющегося момента нагрузки; ПЧ – преобразователь напряжения задания в частоту вращения поля статора (инвертор); ЧОС – частотная обратная связь; ФАС – фазовая обратная связь; ЛФ – линейная ФАС; НЛФ – нелинейная ФАС; ДНМ – блок динамического нагрузочного

Из уравнения (2) видно, что электропривод имеет падающую механическую характеристику, которая зависит от глубины ФАС (коэффициент K_ϕ).

На рис.3 изображён график зависимости $\omega = f(M_{мех})$ и $\theta = f(M_{мех})$ в системе с линейной ФАС ($K_\phi = 1,5$), полученный с помощью математической модели (рис.2). $M_{мех}$ задавался посредством блока ЛМН, скорость линейного нарастания нагрузки 1 Н·м/с.

Применение нелинейной ФАС позволяет получать механические характеристики требуемого вида, например, экскаваторные. На рис.4 приведена механическая характеристика привода с нулевой ФАС в зоне углов $0 < \theta < 0,3$ рад и глубокой ФАС ($K_\phi = 10$) при углах $\theta > 0,3$ рад.

момента на валу двигателя $\left(J \frac{d\omega}{dt} \right)$; ОПУ – осциллографическое регистрирующее устройство.

Механические характеристики привода

На основе математической модели (рис.2), реализованной с помощью системы Simulink, были исследованы механические характеристики привода при различных видах и значениях обратных связей, а также электро-механические переходные процессы, вызванные ступенчатым из-

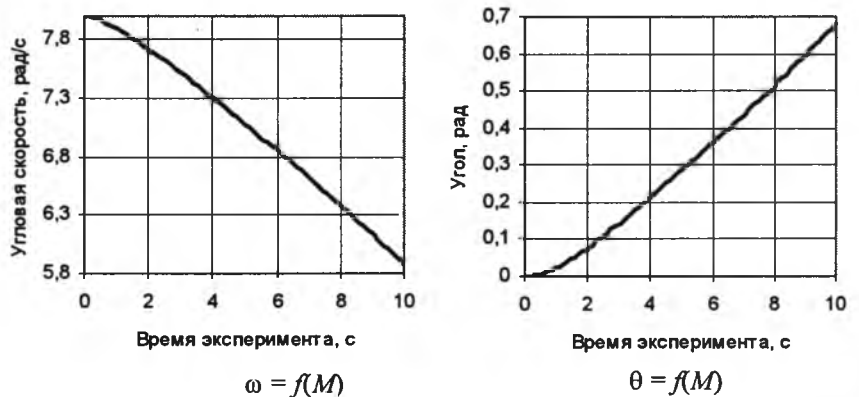


Рис.3

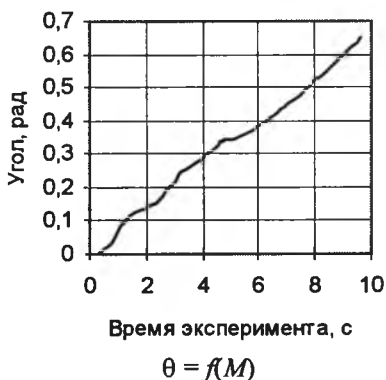
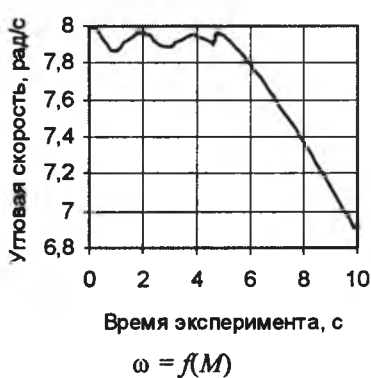


Рис.4

Нелинейная ФОС позволяет получить постоянную частоту вращения, свойственную СД нерегулируемым или работающим в разомкнутой системе регулирования в зоне рабочих углов θ , и, в то же время, увеличить динамическую устойчивость при одновременном снижении угловой скорости при нагрузках, приводящих к увеличению углов θ за заданные допустимые границы.

ЧОС, дополняя нелинейную ФОС, убирает колебания в нечувствительной зоне ФОС.

Зависимость угловой скорости вращения и внутреннего угла θ от момента нагрузки M , полученная на базе физической модели при экспериментальном исследовании СД в замкнутой по фазе системе регулирования, можно видеть на осциллограммах рис.5. СД нагружался с помощью спаренной с ним машины постоянного тока, работающей в режиме генератора. Нагрузочный реостат, подключённый к якорным обмоткам генератора, регулировался вручную. Анализ осциллограмм показывает, что увеличение момента нагрузки (и, соответственно, угла θ) в системе с ФОС, приво-

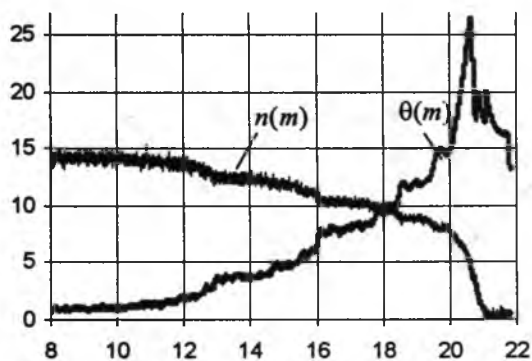


Рис.5



Рис.6



Рис.7

дит к снижению угловой скорости (начальная скорость ХХ $n = 600$ об/мин при частоте напряжения ПЧ 20 гц), вплоть до выпадения из синхронизма и остановки двигателя при достижении максимального электромагнитного момента ($M_m \approx 13$ Н·м).

Электромеханические переходные процессы при синхронной работе СД

Реакция привода на ступенчатое увеличение момента нагрузки также исследовалась как на математической, так и на физической модели. Из графиков, приведённых на рис.6 ($k_\phi = 0$) и рис.7 ($k_\phi = 0,4$), полученных с помощью математической модели, видно, что при ступенчатом набросе момента нагрузки от нуля до 12 Н·м двигатель в системе без ФОС выпадает из синхронизма, а в системе с ФОС плавно замедляет скорость не выходя из режима синхронного вращения.

На рис.8 и 9 приведены осциллограммы реакции привода на скачкообразный наброс момента нагрузки от 0 до 5 Н·м, полученный при исследовании физической модели привода. Ос-

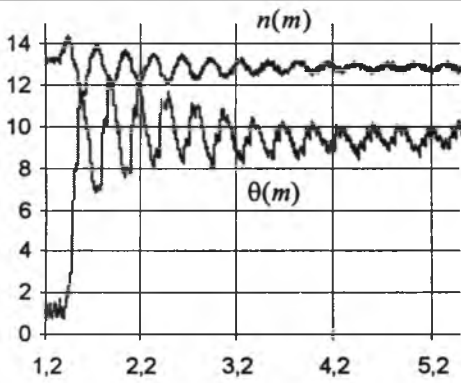


Рис.8

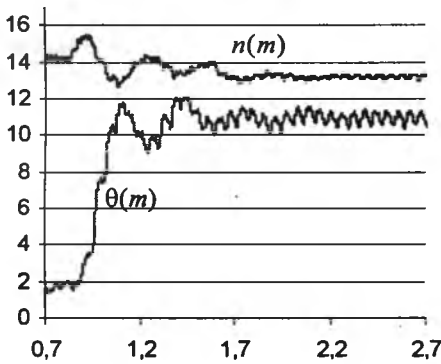


Рис.9

циллограммы на рис.9 получены при наличии в системе ФОС, глубина которой вдвое превышает глубину ФОС в системе, которой соответствуют осциллограммы на рис.8. Из графиков на рис.7–9 видно, что увеличение нагрузки приводит к уменьшению угловой скорости вращения, которая зависит от глубины ФОС.

Приведённые осциллограммы подтверждают позитивное влияние ФОС на улучшение динамических характеристик привода. Аналогичные результаты были получены на математической и физической моделях при ступенчатом изменении питающей частоты.

Синхронизация синхронного двигателя в замкнутой системе частотного регулирования

Как известно, при несинхронном вращении возбужденного синхронного двигателя в СД возникает знакопеременный электромагнитный момент $M_c = f(\theta)$. Кроме того, в СД обычно присутствует короткозамкнутая пусковая обмотка, вызывающая появление асинхронного вращающего момента $M_a = f(s)$.

Классическая теория объясняет динамический процесс синхронизации СД суммарным влиянием

указанных моментов, позволяющим при вращении с подсинхронной скоростью скачкообразно "дотянуть" скорость ротора до синхронной [6,8,9]. При этом процесс синхронизации рассматривается вне прямой связи с временем, занимающим тот или иной этап этого процесса.

Существует также другой подход, при котором фактор времени действия синхронизирующего момента и его составляющих учитывается, как один из важнейших компонентов процесса синхронизации [2,4,10].

При таком подходе СД и частотно-регулируемый СД, в частности, рассматриваются как совокупность двух генераторов (частоты вращения поля статора и частоты вращения поля ротора), частоты которых подстраиваются и удерживаются в синхронизме в результате действия частотной и фазовой автоподстройки. Как известно из радиоэлектроники, правильно построенная ФОС, сравнивающая фазы сигналов двух генераторов и воздействующая на их частоты (частоту), приводит к изменению частот этих генераторов в направлении их синхронизации [1,11]. Данный подход является справедливым также при рассмотрении процессов синхронизации СД, в частности в системе с ФОС.

Как и в случае подстройки частот генераторов радиоэлектронных систем, в системе с СД подстраиваются две частоты, одна из которых частота напряжений ПЧ и, соответственно, угловая частота вращающегося поля статора ω_c , а вторая – угловая частота вращающегося поля ротора двигателя ω_p . В такой системе регулирования датчик ФОС (фазовый детектор ФД) выдает сигнал, воздействующий через источник питания на частоту вращения поля статора.

Поскольку изменение угловой скорости вращения связано с изменением кинетической энергии ротора, то в процессе синхронизации существенное значение имеет время действия синхронизирующего момента $M_c(\theta)\Delta t$, т.е. импульс момента силы. Если рассматривать ФД как безинерционное усилительное звено с коэффициентом усиления K_ϕ , меняющим знак в каждом полупериоде угла θ , т.е.

$$U_{\phi,д} = k_\phi |\theta|,$$

где $U_{\phi,д}$ – напряжение на выходе ФД, причём

$$k_\phi \Big|_{\theta=0}^{\theta=\pi} = -k_\phi \Big|_{\theta=\pi}^{\theta=0}$$

С учётом одновременного ускорения враще-

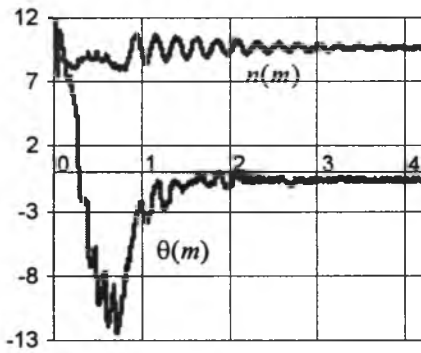


Рис.10

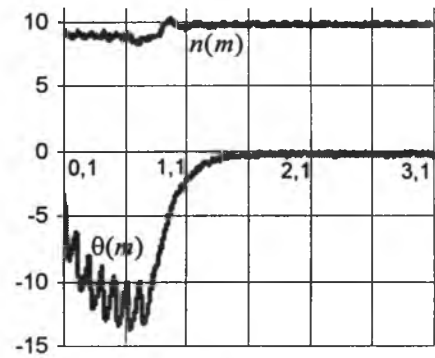


Рис.11

ния ротора под действием синхронного момента и модуляции частоты напряжения ПЧ получаем уравнения уменьшения частоты скольжения ω_s в функции времени действия синхронизирующего момента.

$$\omega_s = (\omega_e - \omega_p)(t) = \omega_{e0} - \int_{t_0}^t k_\phi \omega_{scp} dt - \int_{t_0}^t \frac{M_m}{J} \sin(\omega_{scp} t) dt.$$

Решая данное уравнение для процесса, завершающегося синхронизацией ($\omega_s = 0$) в течение одного положительного полупериода θ , получаем выражение критического скольжения для системы с ФОС:

$$s_0 = s_{0k} = \frac{2}{\omega_{e0}} \sqrt{\frac{M_m}{J}} + \frac{k_\phi \pi}{2\omega_{e0}} = \frac{1}{\omega_{e0}} \left(2\sqrt{\frac{M_m}{J}} + \frac{k_\phi \pi}{2} \right). \quad (3)$$

Из выражения (3) видно, что критическое скольжение возрастает с увеличением коэффициента усиления ФОС и это увеличение обратно пропорционально начальной частоте вращения поля статора.

Влияние ФОС на процесс синхронизации СД можно видеть из осциллограмм, приведённых на рис.10 (20% предельно заданной ФОС) и 11 (50% предельно заданной ФОС). В обоих экспериментах процесс синхронизации завершается в течение одного полупериода изменения угла θ .

Время действия положительного и отрицательного полупериодов синхронного момента

Рассмотрение ведём в предположении, что асинхронный и механический тормозной мо-

менты равны, вследствие чего изменение угловой скорости вращения ротора происходит только под действием синхронного момента.

При положительном полупериоде $0 < \theta < \pi$ ротор ускоряется, а при отрицательном $-\pi < \theta < 0$ ($\pi < \theta < 2\pi$) – замедляется.

В системе регулирования СД без обратных связей средняя частота скольжения при положительном (синхронизирующем) полупериоде синхронного момента

$$\omega_{scp(+)} = \frac{s_0 \omega_{e0}}{2} - \sqrt{\frac{(s_0 \omega_{e0})^2}{4} - \frac{M_m}{J}},$$

а при отрицательном (тормозном) полупериоде средняя частота скольжения увеличивается, так как меняется на противоположный знак (направление) действия синхронного момента, т.е.

$$\omega_{scp(-)} = \frac{s_0 \omega_{e0}}{2} + \sqrt{\frac{(s_0 \omega_{e0})^2}{4} + \frac{M_m}{J}}.$$

Так как время действия каждого полупериода можно определить по формуле $t = \frac{\pi}{\omega_{scp}}$, то

учитывая модуляцию частоты скольжения из-за влияния ФОС, можно вычислить время существования положительного и отрицательного полупериодов:

$$t'_{(+)} = \frac{\pi}{\frac{s_0 \omega_0}{2} - \frac{k_\phi \pi}{4} - \sqrt{\left(\frac{s_0 \omega_0}{2} - \frac{k_\phi \pi}{4} \right)^2 - \frac{M_m}{J}}}; \quad (4)$$

$$t'_{(-)} = \frac{\pi}{\frac{s_0 \omega_0}{2} + \frac{k_\phi \pi}{4} + \sqrt{\left(\frac{s_0 \omega_0}{2} + \frac{k_\phi \pi}{4} \right)^2 + \frac{M_m}{J}}}. \quad (5)$$

Сравнивая выражения (4) и (5) можно видеть, что время действия положительного момента больше времени действия отрицательно. Так как средние моменты в оба полупериода равны, то разность импульсов момента сил, действующих при положительном и отрицательном полупериодах

$$\Delta(Mt) = \frac{2M_m}{\pi} [t_{(+)} - t_{(-)}].$$

Разность импульсов моментов сил, действующих при положительном и отрицательном полупериодах синхронного момента, является одним из важных факторов, приводящих к многоступенчатому (более, чем за один период) изменению синхронного момента, уменьшению частоты скольжения и втягиванию СД в синхронизм.

Влияние ЧОС на процесс синхронизации

Если СД ещё не вошел в синхронизм или вследствие какой-либо причины выпал из синхронизма, то ЧОС, если таковая имеется в системе, влияет на процесс синхронизации. Датчик ЧОС сравнивает частоты вращения ротора и поля статора и выдаёт сигнал, являющийся функцией разности $\omega_e - \omega_0$. Этот сигнал, воздействуя на частоту питающего статор напряжения, приближает её к изменяющейся частоте вращения ротора, иными словами, уменьшает начальное скольжение, с которого начинается процесс синхронизации.

Как в системе с ФОС, так и без ФОС уменьшение частоты поля статора ω_e , а также частоты скольжения ω_s , с которой начинается процесс синхронизации, способствует облегчению процесса синхронизации.

Выводы

1. При синхронном вращении СД, работающего в замкнутой системе частотного регулирования, ФОС повышает динамическую устойчивость САР, уменьшая при этом жёсткость механических характеристик.

2. Нелинейная ФОС устраняет противоречие между увеличением жёсткости механических характеристик и улучшением динамики системы, в частности, возможно получить семейство экскаваторных характеристик. В зоне нечувствительности ФОС, воздействующей на частоту инвертора, динамическая устойчивость может быть улучшена за счёт ЧОС.

3. ЧОС при несинхронном вращении СД подстраивает частоту вращения поля в воздушном

зазоре двигателя к частоте вращения ротора, не устраняя полностью рассогласования.

4. В возбуждённом СД, не вращающемся с синхронной скоростью, возникает знакопеременный электромагнитный момент, который приводит к модуляции частоты вращения ротора и, соответственно, частоты скольжения, вследствие чего длительность существования положительного (втягивающего в синхронизм) полупериода электромагнитного момента превышает длительность существования отрицательного полупериода. Постоянная составляющая импульса электромагнитного момента действует в направлении втягивания двигателя в синхронизм.

5. Синхронизирующая постоянная составляющая импульса электромагнитного момента возрастает с уменьшением частоты скольжения.

6. Фазовая обратная связь приводит к модуляции частоты вращения поля в воздушном зазоре в дополнение к модуляции частоты вращения ротора. Тем самым существенно увеличивается постоянная составляющая импульса электромагнитного момента, и двигатель, даже при большом начальном скольжении, может войти в синхронизм либо в течение одного периода изменения внутреннего угла θ , либо путем ступенчатого приближения скорости вращения ротора к скорости поля статора, вплоть до синхронизации двигателя.

Список литературы

1. Шахгильдян В.В., Ляховкин А.Л. Фазовая автоподстройка частоты. М.: Связь, 1966.
2. Романовский В.Э., Вайнер Г.А. Частотное регулирование синхронного двигателя в системе с обратными связями // Изв. вузов. Электромеханика. 1975. №9. С.958–966.
3. Строганов Б.Г., Вайнер Г.А. Частотное регулирование синхронных двигателей. Образование, наука и производство // Межвузовский сборник научных трудов. Т.1. 2001. С. 196–199.
4. Романовский В.Э., Вайнер Г.А. Синхронизация двигателя в замкнутой системе частотного регулирования // Механосборочное производство. Технология и автоматизация производственных процессов. 1975.
5. Вайнер Г.А., Строганов Б.Г. Экономичный электропривод повышенной устойчивости на базе синхронизированного двигателя переменного тока. М.: Информэлектро, 2003. №1(1). С. 69–71.
6. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. М.: Мир, 1998. С. 671–680.
7. Rama Reddy S. Fundamentals of power electronics/ New Delhi: Narosa Publishing House, 2000. P.143.
8. Сипайлов Г.А. и др. Электрические машины. М.: Высшая школа, 1987. С. 149–160, 166–176, 176–179.
9. Mohan N., Undeland T.M., Robins W.P. Power Electronics. John. N-Y. Wiley & Sons, Inc. 1995. P.439, 440.

10. Kostenko M. and Piotrovsky L. Elektrical mashines. Moscow: Part two. P. 289–291.

11. Титов М.П. Частотно-регулируемый синхронный двигатель. Братск: БРИИ, 1998. С. 105, 121

12. Юферов Ф.М. Электрические машины автоматических устройств. М.: Высшая школа, 1976. С. 125–131

Вайнер Григорий – заочный аспирант Московского государственного индустриального университета, по кафедре электротехника и энергетические машины.

Строганов Борис – к.т.н., доцент, защитил диссертацию в 1980 году в МЭИ на тему "Исследование специальных тр-ров тока в переходных режимах".

Повышение надёжности работы низковольтных микромашин с нормированным напряжением трогания

ВИЛЬКИН М.А., СЕМЁНОВ Ю.И., НИКИФОРОВ Ю.Н.

Исследовано влияние содержания графита в серебрографитовых композициях на износ щёток и коллекторные характеристики прецизионных электрических машин малой мощности с нормированным и низким напряжением трогания. Выявлено влияние размеров частиц минеральных примесей в природном графите на износ палладий-никелевых гальванопокрытий коллекторов и напряжение срабатывания ЭМММ. Приведены результаты влияния модернизации подготовки графита на повышение сохраняемости гальванопокрытий и ресурс электрических машин.

Работоспособность прецизионных электрических машин постоянного тока малой мощности (ЭМММ), в том числе тахогенераторов, моментных двигателей, разнообразных приводов систем автоматического регулирования, в значительной степени зависит от стабильности электрического сопротивления в контакте щётка–коллектор, определяющего надёжный запуск и значение напряжения трогания подобных электрических машин с общим сроком службы до 25 лет в различных климатических условиях.

В ряде публикаций [1,2], посвящённых изучению надёжности запуска микродвигателей с различными марками серийных щёток на медных коллекторах после хранения при повышенной влажности (95–100%) и температуре +40°C, было выявлено существенное увеличение напряжения трогания, вплоть до незапуска машин, особенно проявляющееся при снижении мощности ЭМММ, напряжения питания и увеличении срока хранения. Причиной увеличения напряжения трогания является развитие коррозионных и адгезионных процессов в контакте щётка – коллектор, приводящих к увеличению контактного сопротивления и росту статического момента трения щёток.

Особенно высокие требования по стабильности электрического сопротивления в контакте щётка–коллектор имеют ЭМММ аппаратов

автоматического регулирования и следящих устройств с заданным низким и нормированным напряжением срабатывания, а также приводные микродвигатели систем звукозаписи и звукопроизводства.

На работоспособность микродвигателей аппаратуры точной магнитной записи (АТМЗ) помимо стабильности сопротивления в контакте щётка–коллектор оказывают влияние мгновенные пульсации электросопротивления в других участках цепи якоря, приводящие к колебаниям частоты вращения двигателя и снижению точности записи и воспроизводства информации.

В качестве щёток для подобных машин используются материалы серебрографитных композиций, работоспособность которых в основном зависит от содержания и свойств применяемого графита, придающего щётке требуемые коммуникационные и антифрикционные свойства.

В табл.1 приведены результаты испытаний серебрографитовых щёток с различным содержанием графита на установке с короткозамкнутым медным коллектором КЗК-II диаметром 11 мм, при скорости 3000 об/мин и плотности тока 10 А/см², а в табл.2 – с различными марками графита.

Как видно из табл.1, при содержании графита менее 8–10 вес.% износ щёток при указанном режиме работы значительно возрастает.

Таблица 1

Состав, вес, %			$2\Delta U$, В	Износ за 50 ч, мм (макс.)
Графит электроугольный марки ЭУТ-II	Серебро	Легирующая добавка		
1,5	95,5	Олово 3	—	Полный износ при шлифовке
3,0	94	—	0,034	Полный износ за 50 ч
4,0	93	—	0,021	
7,0	90	—	0,049	0,95
10,0	87	—	0,054	0,56
15	80	Олово 5	0,060	0,23
17	80	Олово 3	0,070	0,21
18	80	Индий 2	0,040	0,07
18	80	—	0,060	0,15

Из табл.2 следует, что лучшую износостойкость показали материалы, содержащие мало-зольный натуральный графит тайгинского месторождения марки ЭУТ-II по ГОСТ 10274-79. Износ щёток, содержащих термически обеззоленный тайгинский графит, а также химически обеззоленный завальевский графит марки ЭУЗ-М, выше в 2–3 раза.

Для стабилизации сопротивления в щёточном контакте ЭМММ в мировой практике рекомендуется применять вместо медных коллекторов из неокисляющихся благородных металлов коллекторы на основе сплавов золото-медь, палладий-серебро и др. Использование подобных материалов значительно увеличива-

ет стоимость электрических машин и не обеспечивает необходимый ресурс эксплуатации.

Экономичным решением явилась разработка и промышленное освоение микромашин серии ДПР и др. с применением медных коллекторов с электрохимическим покрытием палладием, никель-палладием, палладий-никель-палладием и др. [3–5]. Толщина покрытий составляет не более 10–20 мкм, что резко снижает расход благородных и редких металлов.

Получение качественных покрытий является достаточно сложным процессом. Покрытия весьма чувствительны к истиранию при трении щёток, что в свою очередь обусловило появление жёстких требований к щёткам, которые, с одной стороны, должны иметь антифрикционные свойства и не изнашивать покрытие коллектора, с другой, – поддерживать стабильное электросопротивление в скользящем контакте в различных режимах работы и при воздействии дестабилизирующих факторов внешней среды.

Испытания электродвигателей ДПР-32-Ф1-13 с контактной парой: коллектор с гальванопокрытием Pd толщиной 20 мкм и щётками СГО1, содержащими (по массе) 15% графита марки ЭУТ-II, 80% серебра, 5% олова, показали (табл.3), что после 30 ч работы электродвигателя в реверсивном режиме при напряжении питания 20 В и частоте реверса 2 Гц наблюдается значительный износ гальванопокрытия со вскрытием медной подложки. При последующем испытании при воздействии повышенной влажности (при относительной влажности $95 \pm 3\%$ и температуре $+40^\circ\text{C}$ в течение 10 сут) выявлено значительное повышение

напряжения трогания (с 0,9 до 4,5 В).

При рентгеновском микроанализе щёток СГО1 на свежих сколах обнаружены частицы минералов, содержащие алюминий и кремний, диаметром до 15 мкм, имеющие повышенную твёрдость и, вероятно, явившиеся причиной повышенного износа покрытия.

Детальные исследования элементного со-

Таблица 2

Марка графита (вес. % золы)	Состав, вес. %			$2\Delta U$, В	Износ за 50 ч работы, мм (макс.)
	Графит	Серебро	Олово		
Графит тайгинский природный ЭУТ-II (4,8 %)	15	80	5	0,060	0,23
Графит тайгинский природный, термически обеззоленный (0,2 %)	15	80	5	0,070	0,85
Графит завальевский химически обеззоленный ЭУЗ-М (1,1 %)	15	80	5	0,033	0,72
Графит завальевский химически обеззоленный ЭУЗ-М (4,2 %)	15	80	5	0,031	0,43*

* Выработка коллектора.

Щётки	$U_{\text{тр}}, \text{В}$		Износ щёток, мм (средний)	Состояние коллектора
	до испытаний	после испытаний		
Серийные СГО1	0,9	4,5	0,07	Износ гальванопокрытий 5 – 8 мкм. Максимальный износ 15 мкм со вскрытием медной подложки у 1/3 ламелей.
СГО1 с термически обеззоленным графитом	1,0	3,2	0,71	Износ гальванопокрытия 3–4 мкм без вскрытия медной подложки. Политура толстая, неравномерная.
СГО1 с дополнительным просевом природного графита через сито с размером ячейки 71 мкм	0,9	2,1	0,06	Износ гальванопокрытия 3–4 мкм без вскрытия медной подложки.

става и характера распределения минеральных примесей трёх различных партий графита, применяемого в производстве микрощёток, проведённые на сканирующем микроскопе с кристалл-дифракционной приставкой, позволили оценить размер и количество отдельных минеральных примесей в графите. Количественный анализ состава зольных примесей, проведённый химическим методом и на рентгенофлуоресцентной установке, показал: примеси находятся в виде отдельных включений различных природных минералов размером 15 мкм; имеются единичные включения размером до 50 мкм. Зольные примеси содержат алюминий, кремний и железо. Концентрационные соотношения этих элементов для различных включений отличаются.

Повышенный износ гальванопокрытий коллектора и результаты изучения минеральных включений показали, что необходимо изменять регламент подготовки графита для изготовления микрощёток.

Для исключения попадания крупных частиц минералов, содержащихся в графите, в состав щёток в технологический регламент подготовки графита для производства микрощёток помимо принятого просева через сито с ячейкой размером 250 мкм была дополнительно включена операция просева через более мелкое сито с размером ячейки 65–71 мкм.

На рис. 1–3 приведены спектры рентгеновских флуоресценций Fe, Si и Al исходного графита и фракции – 71 мкм и + 71 мкм. Для сравнения приведены спектры этой же партии графита после термообработки при 2200–2300°C.

Из представленных данных видно, что содержание железа, кремния и алюминия в просеянном графите существенно ниже, чем в исходном.

Количественным анализом установлено, что содержание железа в остатке на сите в 3–5

раз, а кремния в 6–8 раз выше.

Об эффективности дополнительного просева графита на повышение сохранности гальванопокрытий свидетельствуют данные испытаний

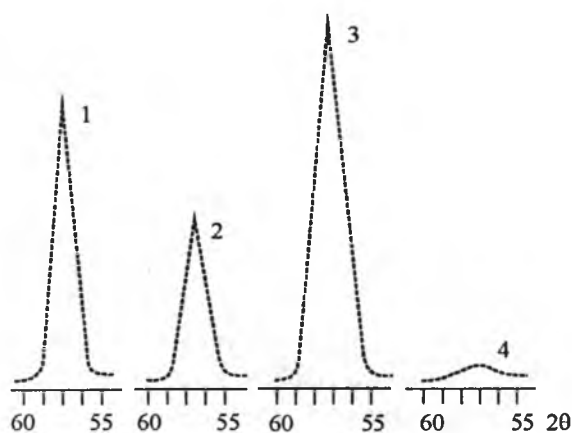


Рис. 1. Спектры РФА железа:

1 – графит тайгинский сырой, остаток на сите – 71 мкм; 2 – графит тайгинский сырой, проход через сито – 71 мкм; 3 – исходный тайгинский графит; 4 – графит тайгинский после обработки при 2300°C

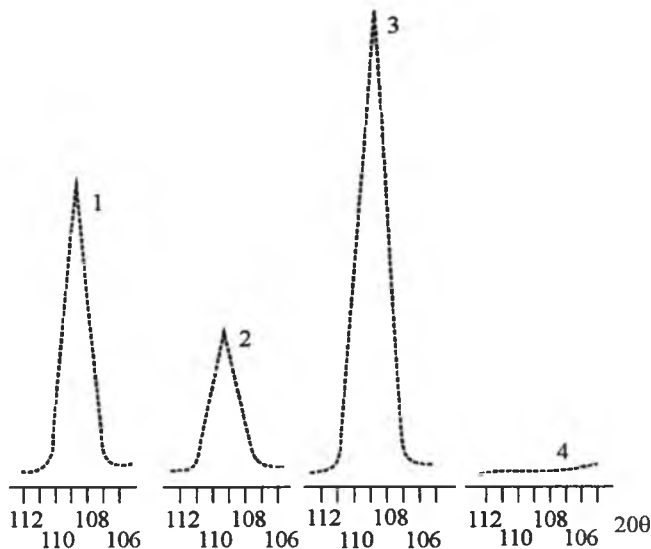


Рис. 2. Спектры РФА кремния:

1–4 – то же, что и на рис. 1

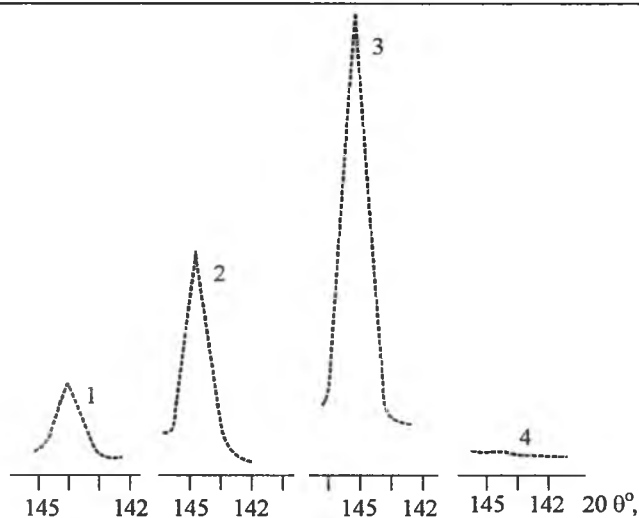


Рис.3. Спектры РФА алюминия:

1-4 – то же, что и на рис.1

щёток марки СГО1 на двигателях ДПР-32-Ф1 – 13, приведённые в табл.3. Испытания однозначно подтвердили, что одной из существенных причин износа палладий-никелевого покрытия коллектора является повышенная абразивность зольных включений в графитовой составляющей щёток.

Из данных табл.3 также следует, что при полном удалении зольных примесей графита износ щёток увеличивается практически на порядок. На отдельных ламелях коллектора появляются следы эрозионного износа, свидетельствующие об увеличении искрения при электрическом пробое более толстых плёнок коллекторной политуры.

В малогабаритных электрических машинах с размерами щёток $0,6 \times 1,0 \times 4,0$; $1,0 \times 1,6 \times 5,0$; $1,6 \times 2,0 \times 6,3$ мм и выше ввиду ряда особенностей конструкции ЭМММ и неприменимости имевшихся в то время методов крепления провода к щёткам подобных размеров использовались щёточные узлы с щётками без токоведущего провода. Щёткодержатели подобных микромашин не имеют щёточной обоймы; крепление щёток производится их пайкой к нажимной пружине.

Общим недостатком подобных конструкций является сложность замены щёток в эксплуатации, вследствие чего ресурс работы электрических машин определяется износостойкостью установленного комплекта щёток.

Подобная система монтажа щёток неприменима для электрических машин с повышенным ресурсом работы, в которых обычно предус-

матривается многократная замена щёток.

На электрических машинах с длительным ресурсом работы щётки устанавливаются в обойме щёткодержателя, что облегчает возможность их замены. При применении в подобных типах щёткодержателей щёток без токоведущего провода значительно усложняется механизм передачи тока, который осуществляется через стенки обоймы щёткодержателя и в месте контакта щётки и рычагом нажимной пружины. При подобном конструктивном решении в цепи якоря фактически появляется дополнительный подвижный электрический контакт, который в процессе работы, особенно в условиях вибрации, а также при хранении, становится дополнительным источником колебаний электросопротивления.

Для определения степени влияния токоведущего провода в щётках на характеристики скользящего электрического контакта при работе серебрографитовых щёток на короткозамкнутом коллекторе с гальванопокрытием слоем палладия проведены испытания нескольких комплектов щёток с проводом и тех же щёток после удаления провода.

Испытания проводились с щётками марки СГИ1 размером $1,6 \times 2,0 \times 8,0$ мм на короткозамкнутом коллекторе двигателя аппаратуры точной магнитной записи диаметром 14 мм при токе 500 мА и частоте вращения 700 об/мин на 3 работающих параллельно парах щёток. Определялись средние значения общего падения напряжения трёх пар щёток и каждой пары в отдельности, представленные в табл.4. При проведении испытаний и замеров ток нагрузки не менялся.

Как следует из табл.4, применение щёток с токоведущим проводом оказывает существен-

Таблица 4

Комплект	Переходное падение напряжения, мВ			
	Конструкция щёток			
	Без провода		С проводом	
	\bar{X}	δ_{n-1}	\bar{X}	δ_{n-1}
1 пара щёток	604,0	163,5	456,1	81,7
2 пары щёток	438,0	123,2	391,9	46,0
3 пары щёток	414,0	64,7	305,0	50,0
1, 2, 3 пары при параллельной работе	230,6	72,2	147,6	33,8
Примечания: \bar{X} – среднее переходное падение напряжения; δ_{n-1} – среднее квадратичное отклонение.				

Таблица 5

Марка щётки	Напряжение питания, средний ток, частота вращения	Время наработки до полного износа щёток, ч	Тип покрытия коллектора	Износ щёток за 100 ч, мм		Состояние покрытия коллектора
				Средний	Максимальный	
СГО1	20 В	500	Pd	0,38	0,44	Износ гальванопокрытия 8–10 мкм без вскрытия медной подложки
	0,1 А 3000 об/мин	960	Pd-(PdNi)-Pd	0,17	0,31	Износ гальванопокрытия 7–10 мкм без вскрытия медной подложки

ное влияние на значения переходного падения напряжения в контакте и их стабильность по сравнению с теми же щётками с удалённым проводом: переходное падение напряжения снижается в 1,2–1,5 раза, средние квадратичные отклонения – в 2,0–3,0 раза. Соответственно снижаются изменения мгновенной частоты вращения двигателей, вызванные нестабильностью электросопротивления в щёточном контакте.

Для современных ЭМММ актуальна задача повышения ресурса работы. Создание серебрографитных щёток повышенной износостойкости (марки СГО1, СГИ1, СГО2 и др.), а также малогабаритных конструкций щёткодержателей, обеспечивающих возможность смены комплектов щёток в эксплуатации (для прецизионных низковольтных электрических машин преимущественно щёток с проводом) позволяет значительно повысить ресурс работы.

Для одновременного обеспечения требований по сохраняемости необходимо использование более износостойких гальванопокрытий коллектора. В настоящее время помимо однослойного покрытия коллектора разработаны и нашли применение покрытия сплавом палладий-никель [4] и покрытия из трёх слоёв палладий – (палладий-никель) – палладий [5].

Применение более износоустойчивых щёток и покрытий коллектора позволило значительно увеличить ресурс работы электрических машин с повышенными требованиями по сохраняемости. Например, применение трёхслойного

гальванопокрытия в паре со щётками СГО1 в двигателях типа ДПР-42 обеспечило увеличение их наработки почти в два раза по сравнению с палладиевым покрытием (табл.5) без вскрытия медной подложки, что позволило повысить гарантийный ресурс работы при обеспечении заданного уровня надёжности.

Список литературы

1. Вилькин М.А., Семёнов Ю.И., Дридзо М.Л. Исследование стабильности напряжения коллекторных электродвигателей постоянного тока малой мощности // Электротехника. 1973. № 8.
2. Семёнов Ю.И., Вилькин М.А. Результаты исследования надёжности запуска микродвигателей постоянного тока после хранения при повышенной влажности // Труды ВНИИЭИ. Т.3. 1975.
3. Микродвигатели для систем автоматики: технический справочник. М.: Энергия, 1969.
4. А.с. 767879 СССР. Коллектор для микромашин постоянного тока / Харизман Ю.Д., Кефели В.С., Цирлин И.А. и др. // Открытия. Изобретения. 1980. № 36.
5. А.с. 1129678 СССР. Коллектор для микромашин постоянного тока / Шеминов В.Г., Харизман Ю.Д. и др. // Открытия. Изобретения. 1984. № 46.

Вилькин Матвей Айзикович – канд. техн. наук. Работает в ФГУП «НИИЭИ». Окончил Ивановский химико-технологический институт в 1949 г. Защитил диссертацию в 1965 г.

Семёнов Юрий Иванович – канд. техн. наук. Работает в ФГУП «НИИЭИ». Окончил факультет «Электрооборудование летательных аппаратов» МАП в 1968 г. Защитил диссертацию в 1978 г.

Никифоров Юрий Николаевич – работает в ФГУП «НИИЭИ». Окончил Ленинградский электротехнический институт им. В.И.Ульянова в 1963 г.

Управление четырёхмассовой электромеханической системой средством синтезированной ДЭМС стабилизации скорости

БУРГИН Б.Ш.

Предложено использование синтезированной ДЭМС стабилизации скорости для управления четырёхмассовой электромеханической системой, построенной на базе ДЭМС с эквивалентным двигателем и измерением лишь угловой скорости двигателя. Приведена структурная схема астатической четырёхмассовой электромеханической системы, позволяющая анализировать динамические свойства этой системы при различных сочетаниях значений параметров присоединённого к ДЭМС блока. Представлены результаты цифрового моделирования.

The synthesized speed-controlled two-mass electromechanical system is proposed for the automatic control of four-mass electromechanical system. The block diagram of the zero-constant-error speed-controlled four-mass electromechanical system allows one to analyze the dynamics of this system with various combinations of the connected block parameters. Numerical simulations of the system and transient responses are presented.

Для управления четырёхмассовой электромеханической системой (ЧЭМС) возможен такой же подход, как предложенный в [1] для трёхмассовой электромеханической системы (ТЭМС): используется синтезированная ДЭМС с эквивалентным двигателем и обратными связями по угловой скорости и ускорению двигателя. Измеряется лишь угловая скорость двигателя, а оценка углового ускорения осуществляется применением дифференцирующего фильтра второго порядка [2,3].

Структурная схема ЧЭМС на базе синтезированной ДЭМС стабилизации скорости с эквивалентным двигателем с обратными связями по угловой скорости и ускорению двигателя и с компенсацией ЭДС двигателя приведена на рис.1. К синтезированной ДЭМС присоединён блок, состоящий из последовательно соединённых элементов: жёсткости C_3 , момента инерции J_3 , жёсткости C_4 и момента инерции J_4 . Между J_2 и J_3 действует упругий момент M_2 ; между J_3 и J_4 упругий момент M_x . Мо-

мент нагрузки M_c приложен к J_4 . Демпфирующие моменты на второй, третьей и четвёртой массах не учитываются. На входе сигнала задания синтезированной ДЭМС установлен фильтр с постоянной времени T_0 , значение которой должно ограничивать перерегулирование

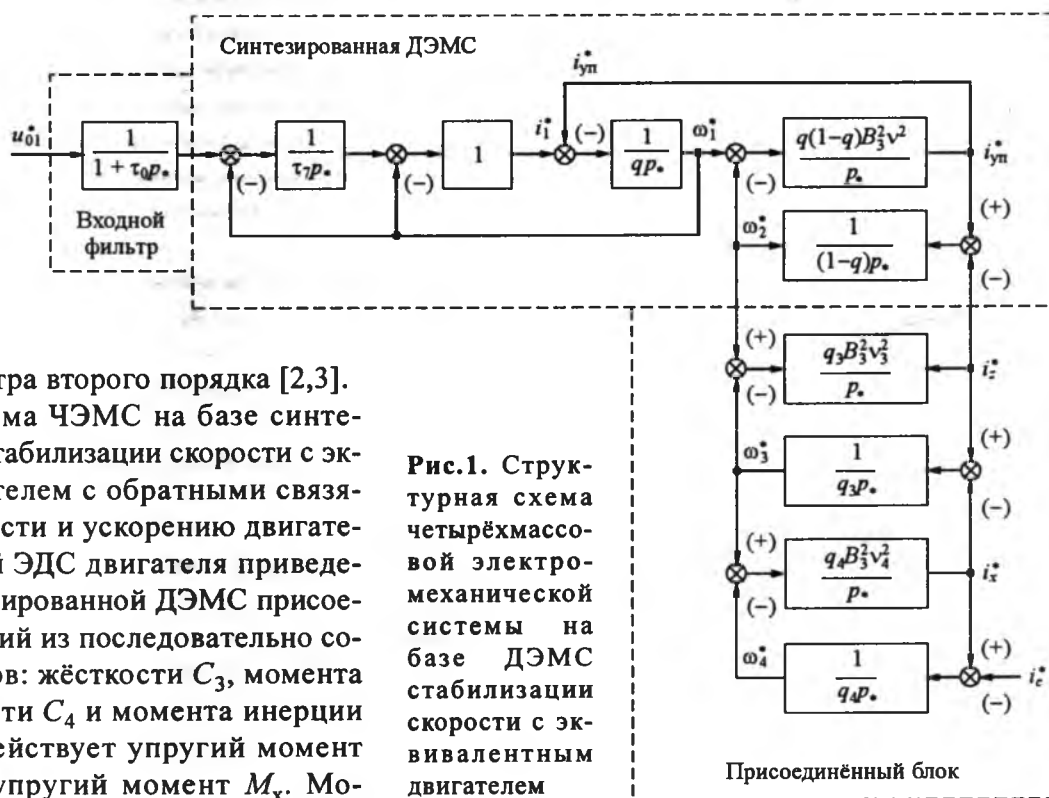


Рис.1. Структурная схема четырёхмассовой электромеханической системы на базе ДЭМС стабилизации скорости с эквивалентным двигателем

угловых скоростей при скачке управляющего сигнала в зависимости от различных значений присоединённых инерционных масс. Преобразователь рассматривается как безынерционный. Для компенсации влияния ЭДС двигателя введена положительная обратная связь по угловой скорости двигателя.

Система уравнений ЧЭМС представлена в относительных величинах и в относительном времени:

$$\begin{aligned} \omega_1^* &= \frac{\omega_1}{\omega_0}; \quad \omega_2^* = \frac{\omega_2}{\omega_0}; \quad i_1^* = \frac{I_1}{I_{K3}}; \quad i_{yn}^* = \frac{I_{yn}}{I_{K3}}; \\ i_c^* &= \frac{I_c}{I_{K3}}; \quad e^* = \frac{U_d}{U_{d0}}; \quad u_{01}^* = \frac{k_E''}{K_{OC}} u_0^*; \\ U_{d0} &= k_E'' \omega_0 = I_{K3} r; \quad M_{yn} = k_M I_{yn}; \quad M_z = k_M I_z; \\ M_x &= k_M I_x; \quad M_c = k_M I_c; \quad v^2 = C \frac{J_1 + J_2}{J_1 J_2}; \\ q_3 &= \frac{J_3}{J_1 + J_2}; \quad v_3^2 = \frac{C_3}{J_3}; \quad q_4 = \frac{J_4}{J_1 + J_2}; \quad v_4^2 = \frac{C_4}{J_4}; \\ \omega_3^* &= \frac{\omega_3}{\omega_0}; \quad \omega_4^* = \frac{\omega_4}{\omega_0}; \quad i_z^* = \frac{I_z}{I_{K3}}; \quad i_x^* = \frac{I_x}{I_{K3}}; \\ u_{01}^* &= \frac{k_E''}{k_E} u_0^*; \quad \tau = \frac{t}{B_3}; \quad p_* = B_3 p; \\ q &= \frac{J_1}{J_1 + J_2} = \frac{1}{\frac{A_1}{A_3} \left(\frac{A_2 - A_1}{A_3} \right)}; \quad B_3 = \frac{(J_1 + J_2) r}{k_E'' k_M}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_3 &= 0; \quad k_E'' = k_E \frac{B}{B_3}; \quad B_3 v^2 = \frac{\left(\frac{A_2 - A_1}{A_3} \right)^3}{A_3^2}; \\ \tau_7 &= \frac{T_7}{B_3} = \frac{A_3^2}{A_2 - \frac{A_1}{A_3}}; \quad \tau_0 = \frac{T_0}{B_3}. \end{aligned}$$

Система уравнений ЧЭМС в операторной форме в соответствии со структурной схемой рис.1 имеет вид:

$$\begin{aligned} e^*(p_*) &= \omega_1^*(p_*) + i_1^*(p_*); \quad qp_* \omega_1^*(p_*) = i_1^*(p_*) - \\ &- i_{yn}^*(p_*); \quad p_* i_{yn}^*(p_*) = q(1-q) B_3^2 v^2 [\omega_1^*(p_*) - \\ &- \omega_2^*(p_*)]; \quad (1-q) p_* \omega_2^*(p_*) = i_x^*(p_*) - i_z^*(p_*); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p_* i_z^*(p_*) &= q_3 B_3^2 v_3^2 [\omega_2^*(p_*) - \omega_3^*(p_*)]; \quad q_3 p_* \omega_3^*(p_*) = \\ &= i_z^*(p_*) - i_x^*(p_*); \quad p_* i_x^*(p_*) = q_4 B_3^2 v_4^2 [\omega_3^*(p_*) - \\ &- \omega_4^*(p_*)]; \quad q_4 p_* \omega_4^*(p_*) = i_x^*(p_*) - i_c^*(p_*); \end{aligned}$$

$$\tau_7 p_* e^*(p_*) = \frac{u_{01}^*(p_*)}{1 + \tau_0 p_*}.$$

Заметим также, что

$$\frac{v_3^2}{v^2} = \frac{(q_3 B_3^2 v_3^2)}{q_3 (B_3^2 v^2)}; \quad \frac{v_4^2}{v^2} = \frac{(q_4 B_3^2 v_4^2)}{q_4 (B_3^2 v^2)}.$$

Величина $(B_3^2 v^2)$ определяется коэффициентом распределения масс q синтезированной ДЭМС в зависимости от выбранных коэффициентов формы A_1, A_2, A_3 . Результаты исследования динамики синтезированной ДЭМС стабилизации скорости на базе эквивалентного двигателя с обратными связями по угловой скорости и ускорению двигателя [4] позволяют рекомендовать выбор значений коэффициентов формы при $q < 0,70$ по методике [2], а для значений $q \geq 0,70$ по третьему варианту методики [4]. Рекомендуемые значения A_1, A_2, A_3 и соответствующие им значения τ_7 и $B_3^2 v^2$ при $q < 0,70$ приведены в [3, табл.2], а при $q \geq 0,70$ – в [4, табл.2]. Там же [4] приведены показатели динамики синтезированных ДЭМС стабилизации скорости с эквивалентным двигателем и с обратными связями по угловой скорости и ускорению двигателя при скачке управляющего и возмущающего воздействий.

Связь натурального времени t с относительным временем τ :

$$t = B_3 \tau = \frac{(B_3 v)}{v} \tau = \frac{\left(\frac{A_2 - A_1}{A_3} \right)^{3/2}}{A_3} \frac{\tau}{v},$$

т.е. t зависит от коэффициента распределения масс q и собственной частоты колебаний v двухмассовой системы.

При заданных параметрах присоединённого блока $q_3, q_4, v_3^2/v^2$ и v_4^2/v^2 можно определить коэффициенты в системе уравнений ЧЭМС:

$$(q_3 B_3^2 v_3^2) = q_3 (B_3^2 v^2) \frac{v_3^2}{v^2}; \quad (q_4 B_3^2 v_4^2) = q_4 (B_3^2 v^2) \frac{v_4^2}{v^2},$$

где

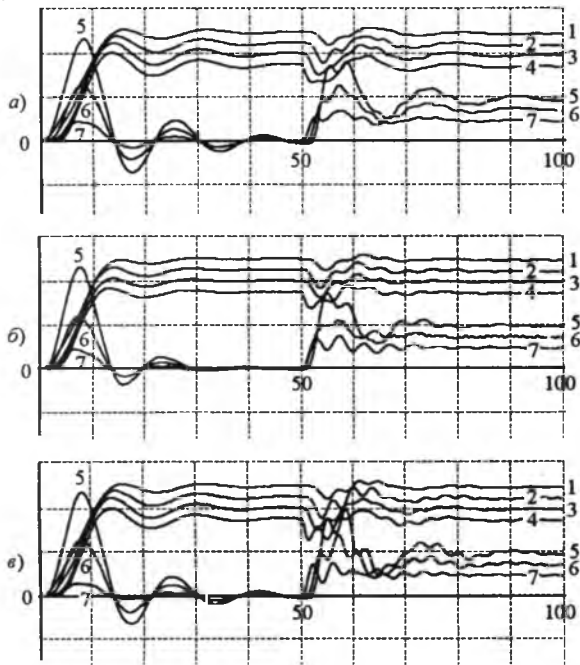


Рис.2. Результаты цифрового моделирования при $q = 0,5, u_{01}^* = 0,5; \tau_0 = 5; i_c^* = 0,05$:

1 – $\omega_1^*(\tau)$; 2 – $\omega_2^*(\tau)$; 3 – $\omega_3^*(\tau)$; 4 – $\omega_4^*(\tau)$;
5 – $i_{yn}^*(\tau)$; 6 – $i_z^*(\tau)$; 7 – $i_x^*(\tau)$

$$B_3^2 v^2 = \frac{\left(A_2 - \frac{A_1}{A_3} \right)^3}{A_3^2}$$

На рис.2 приведены переходные процессы ЧЭМС при скачке сигнала задания $u_{01}^* = 0,5$ и $i_c^* = 0$ за время от $\tau = 0$ до $\tau = 50$, а затем – при приложении возмущающего воздействия $i_c^* = 0,05$. Цифровое моделирование выполнено для ЧЭМС с использованием синтезированной ДЭМС с параметрами:

$q = 0,50; B_3^2 v^2 = 2,500; A_1 = 2,0; A_2 = 3,3; A_3 = 2,5; \tau_7 = 2,5; \tau_0 = 5$ для трёх вариантов присоединённого блока:

а) $q_3 = 0,50; q_4 = 0,50; v_3^2/v^2 = 0,403; v_4^2/v^2 = 0,403;$

б) $q_3 = 0,50; q_4 = 0,50; v_3^2/v^2 = 4,032; v_3^2/v^2 = 0,403;$

в) $q_3 = 0,75; q_4 = 0,30; v_3^2/v^2 = 0,269; v_3^2/v^2 = 0,673.$

Принятые при моделировании значения па-

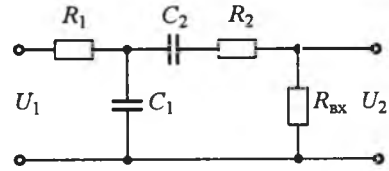


Рис.3. Четырёхполюсник – дифференцирующий фильтр второго порядка

раметров – такие же, как в [5, табли.1, варианты а, б и в]. Сравнивая форму переходных процессов рис.2 данной статьи и рис.2 [5], следует иметь в виду, что масштаб времени в [5] иной, т.е. сравнение следует вести в натуральном времени. Различие в постоянной времени T_0 фильтра на входе задающего сигнала не сказывается на реакции системы на скачок возмущающего воздействия.

В качестве дифференцирующего фильтра второго порядка может быть использована не только приведённая в [2] схема, но и схема простого четырёхполюсника (рис.3).

Для этой схемы справедливо:

$$\frac{U_2(p)}{U_1(p)} = \frac{T_4 p}{T_5^2 p^2 + 2\zeta T_5 p + 1},$$

где $T_4 = R_{вх} C_2; T_5 = C_1 C_2 (R_{вх} + R_2) R_1; 2\xi T_5 = C_1 R_1 + C_2 (R_{вх} + R_2 + R_1); R_{вх}$ – входное сопротивление последующего звена – усилителя.

Совместность этих уравнений обеспечивается при условии

$$\xi \geq 1 + \frac{T_4 R_1}{2T_5 R_{вх}}$$

Для $\xi = 1 + \frac{T_4 R_1}{2T_5 R_{вх}}$ и, соответственно, $R_1 =$

$$= \frac{2T_5 R_{вх} (\xi - 1)}{T_4} \text{ получим:}$$

$$\alpha = \frac{R_{вх}}{R_{вх} + R_2} = \frac{T_4}{T_5} < 1; C_2 = \frac{T_4}{R_{вх}}; C_1 = \frac{\alpha T_5^2}{R_1 T_4};$$

$$R_2 = \frac{1 - \alpha}{\alpha} R_{вх}.$$

Выводы

1. Предложенный вариант управления четырёхмассовой электромеханической системой с использованием синтезированной ДЭМС стабилизации скорости с обратными связями по уг-

ловой скорости и ускорению двигателя обеспечивает приемлемые переходные процессы системы в достаточно широком диапазоне значений параметров присоединённого блока.

2. Для детального представления различных режимов работы четырёхмассовой электромеханической системы целесообразно использовать структурное моделирование по предложенной в статье методике.

Список литературы

1. Бургин Б.Ш. О возможности использования синтезированной ДЭМС стабилизации скорости для управления трёхмассовой электромеханической системой // Электротехника. 2001. №10. С.27–31.

2. Бургин Б.Ш. Астатическая ДЭМС стабилизации скорости с обратными связями по угловой скорости и ускорению двигателя // Научный вестник. Новосибирск: НГТУ, 1995. №1. С.33–43.

3. Бургин Б.Ш. Особенности вариантов астатической двухмассовой электромеханической системы стабилизации скорости // Электротехника. 1997. №7. С.11–16.

4. Бургин Б.Ш. О выборе коэффициентов формы ДЭМС стабилизации скорости на базе эквивалентного двигателя // Автоматизированные электромеханические системы. Новосибирск: НГТУ, 2001. С.14–21.

5. Бургин Б.Ш. Использование синтезированной ДЭМС стабилизации скорости для управления четырёхмассовой электромеханической системой // Электротехника. 2004. №11. С.25–28.

Бургин Борис Шимельевич – профессор кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Новосибирского государственного технического университета, доктор техн. наук, чл.-кор. АЭН РФ. Окончил Ленинградский технологический институт в 1950 г. В 1974 г. в Томском политехническом институте защитил докторскую диссертацию по теме "Основы теории автоматизированного электропривода черпающего комплекса драг".

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Разработка и ввод в эксплуатацию нового поколения информационно-измерительной системы "СКАЛА-МИКРО"

ДЖУМАЕВ С.Д., ИНЖ.

НПП ВНИИЭМ

Приведено описание информационно-измерительной системы "СКАЛА-МИКРО", построенной на основе микропроцессорных средств управляющей вычислительной техники серии В10Р и персональных компьютеров в промышленном исполнении, и предназначенной для контроля технологического процесса энергоблоков атомных электростанций с канальными реакторами типа РБМК-1000.

Одной из основных современных тенденций развития систем контроля и представления информации на объектах атомной энергетики является применение более открытых и "прозрачных" системных решений. Реальности рынка аппаратных и программных средств на сегодняшний день таковы, что наиболее эффективным путем достижения этой цели является применение вычислительных средств, взаимодействующих между собой по сетям Ethernet.

The present description deals with an information-measuring system "SKALA-MICRO" constructed on base of microprocessor facilities of control computation hardware of series V10R and industrial PC and designed to monitor technological processes of NPP power units equipped with channel reactors RBMK-1000.

В проекте "СКАЛА-МИКРО" было решено применить микросредства управляющей вычислительной техники серии В10Р и персональные компьютеры в промышленном исполнении [комплект компьютерный специального назначения (ККСН) "ЭКСПРО"], разработанные и изготавливаемые в НПП ВНИИЭМ.

Микросредства управляющей техники (МСУВТ) серии В10Р имеют в своём составе микропроцессорные устройства и устройства

дискретного и аналогового ввода-вывода, объединённые шиной ВКМ. Протокол взаимодействия устройств по шине ВКМ разработан в НПП ВНИИЭМ. Процессорные устройства серии В10Р выполняют роль шлюза – либо с сетью Ethernet, либо с сетью дистанционной контроллерной магистрали (ДКМ). Персональные компьютеры в промышленном исполнении ККСН "ЭКСПРО" выполнены с использованием комплектации фирм "Portwell" (корпус, объединительная панель, процессорная плата) и "Advantech" (устройства ввода-вывода). Сборка ККСН "ЭКСПРО" производится в НПП ВНИИЭМ. Это позволяет создавать ЭВМ, максимально соответствующие решаемым каждым устройством задачам.

Структура системы "СКАЛА-МИКРО" разработана на основе следующих концептуальных положений:

- все компоненты системы реализованы с повышенной надёжностью, все устройства резервированы (дублированы); это обеспечивает непрерывное функционирование системы "СКАЛА-МИКРО" при сбоях или отказах в отдельных устройствах и частичной потере электропитания;

- система обладает свойством открытости, обеспечивающим возможность расширения

объёма контролируемых параметров и развития функций системы без специального останова системы на реконструкцию;

- компоненты системы постоянно ведут самодиагностику, её результаты в удобной форме могут быть представлены обслуживающему персоналу;

- при реконструкции системы сохранены старые кабельные связи с объектом.

Архитектура системы

Структура системы "СКАЛА-МИКРО" представлена на рис.1, где АЗРГК – аварийная защита по расходу в групповых коллекторах; БЩУ – блочный щит управления; КСКУЗ – комплексная система контроля, управления и защиты; МИП – магнитоиндукционный преобразователь; МТК – мнемотабло каналов; РСО – рабочая станция оператора; СУЗ – система управления и защиты; ЭКП – экран коллективного пользования.

Система реализована в виде локальной управляющей вычислительной сети с четырьмя уровнями обработки информации.

Первый уровень (нижний) – уровень приёма и первичной обработки информации, поступающей от индивидуальных датчиков. В дальнейшем в статье этот уровень может имено-

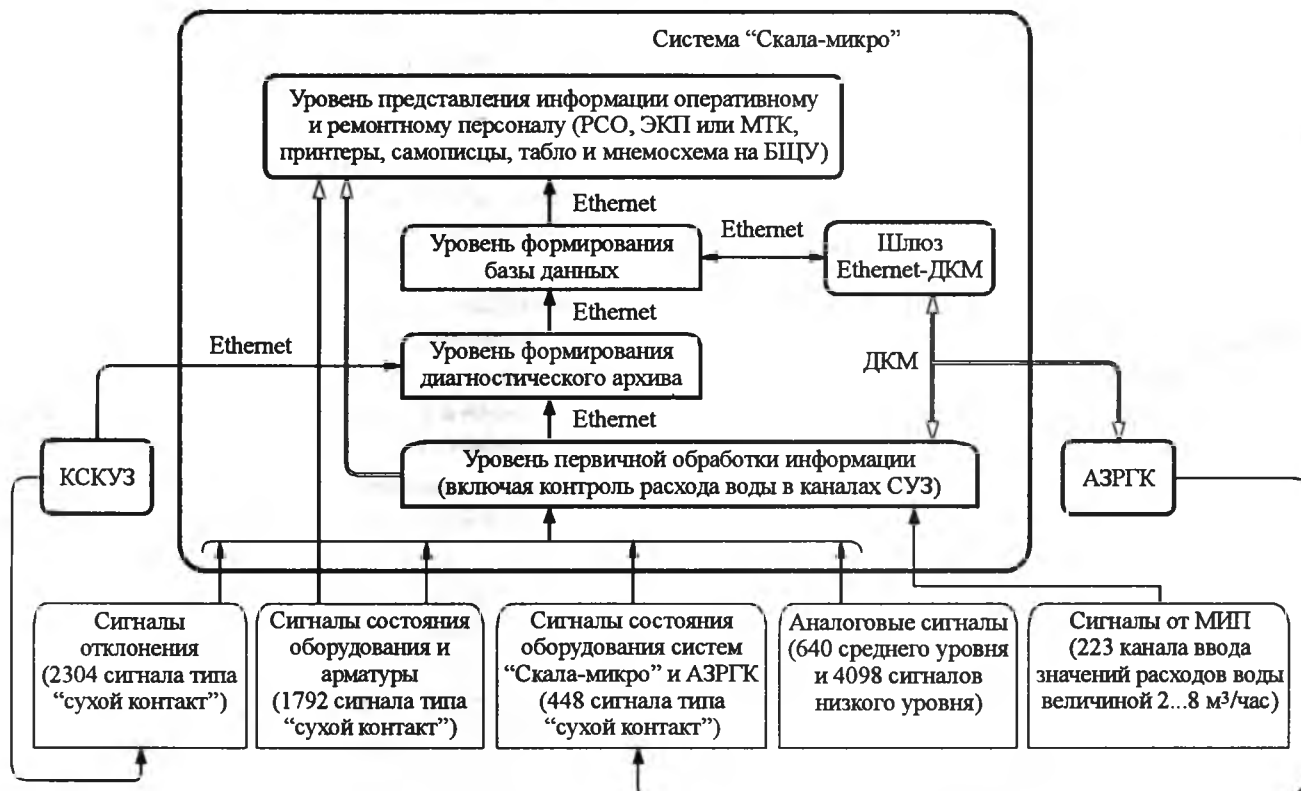


Рис.1. Структура системы "Скала-микро"

ваться как уровень первичной обработки информации.

Второй уровень – уровень диагностической обработки информации с формированием диагностического архива. В дальнейшем в статье этот уровень может именоваться как уровень формирования диагностического архива.

Третий уровень – уровень формирования базы данных.

Четвертый уровень (верхний) – уровень представления информации оперативному и ремонтному персоналу.

Каждый уровень реализован на основе небольшого количества однотипных устройств, при этом при расширении объёма контролируемой информации возможно добавлением одной или нескольких единиц оборудования, что требует лишь перепрограммирования системы, но не требует доработки аппаратной базы на заводе-изготовителе.

Уровень первичной обработки информации (нижний уровень)

Нижний уровень системы "СКАЛА-МИКРО" реализован на основе некоторого количества устройств, точное число которых варьируется в зависимости от энергоблока. Всего применяется восемь типов устройств, выполняющих различные функции по сбору и обработке информации.

В настоящее время к числу функций, выполняемых нижним уровнем системы "СКАЛА-МИКРО", относятся:

- приём сигналов отклонения (2304 дискретных сигнала), сигналов состояния оборудования и арматуры (1792 дискретных сигнала от внешнего оборудования и 448 дискретных сигналов от оборудования систем "СКАЛА-МИКРО" и АЗРГК); цикл контроля 0,5 с;

- приём сигналов от датчиков температуры (4098 аналоговых сигналов); цикл контроля 4 с;

- приём расходов воды в каналах СУЗ (223 канала); цикл контроля 2 с;

- приём индивидуальных аналоговых параметров (640 сигналов); цикл контроля 1 с.

Устройства нижнего уровня реализованы на базе контроллеров МС УВТ В10Р. Каждый контроллер включает в себя процессорный узел, который может быть абонентом в сети Ethernet, и до 16 устройств ввода-вывода сигналов. Исключение составляют контроллеры,

предназначенные для ввода расходов, которые связаны с остальной системой по сети ДКМ и имеют уникальный набор устройств серии В10Р.

Для повышения живучести устройств предусмотрено:

- дублирование электропитания каждого из контроллеров от двух вводов сети постоянного тока 27 В (через выпрямители, входящие в состав системы);

- дублирование устройств приёма информации;

- радиальная связь каждого контроллера с верхним уровнем;

- развитый контроль неисправностей в процессе функционирования с оперативной передачей информации на верхний уровень по сети Ethernet и по кабельным трассам.

Устройства, осуществляющие ввод сигналов отклонений в "СКАЛУ-МИКРО", после первичной обработки выдают световую и звуковую сигнализацию оперативному персоналу на БЩУ, таким образом совмещая в себе принадлежность к двум уровням – уровню сбора и уровню представления информации оперативному персоналу.

Для сохранения старых кабельных связей с датчиками и панелями блочного щита предусмотрена возможность подключения устройств системы "СКАЛА-МИКРО" к существующим кроссовым шкафам.

Уровень формирования диагностического архива

Основной структурной единицей уровня диагностической обработки информации является устройство ДРЕГ-Ц. Эти устройства реализованы на базе промышленных персональных компьютеров ККСН "ЭКСПРО" и коммутаторов сети Ethernet, установленных в шкаф фирмы "Rittal" с габаритами 2000×600×800. Общий вид ККСН "ЭКСПРО" приведён на рис.2.

Основная задача устройств второго уровня – формирования архива данных на основе информации, принятой от устройств нижнего уровня по сети Ethernet. Архив формируется в виде файлов на жестких дисках ККСН "ЭКСПРО". Для повышения надёжности в состав всех устройств второго уровня входят источники бесперебойного электропитания, которые позволяют выполнять архивирование в течение 15 мин после исчезновения внешнего питания.



Рис.2. Промышленный персональный компьютер ККСН ЭКСПРО

Глубина архива – примерно 30 сут. При переполнении жёсткого диска самые ранние, по времени поступления в ДРЕГ-Ц, данные автоматически стираются.

При поступлении в ДРЕГ-Ц сигнала об аварийном останове блока происходит формирование аварийного архива, в который записывается предыстория работы блока за 15 мин и вся вновь поступающая в "СКАЛУ-МИКРО" информация в течение 15 мин после останова энергоблока. Это позволяет в дальнейшем выполнить анализ режимов работы энергоблока, состояния основных параметров и определить причины, приведшие к аварийному останову, его развитие и последствия. Основная разница между аварийным и диагностическим архивами заключается в том, что аварийный архив не может быть удален с жёсткого диска автоматически при нехватке дискового пространства.

Процедура представления оперативному или ремонтному персоналу информации, содержащейся в архивах устройств ДРЕГ-Ц, на языке обслуживающего персонала именуется "вскрытием". Вскрытие осуществляется с консоли любого устройства ДРЕГ-Ц или рабочей станции отображения (PCO) оператора, информация представляется в графическом или текстовом виде. Обычно необходимость подобной процедуры возникает при аварийных остановах энергоблока, так как именно в "СКАЛА-МИКРО" поступают сигналы, позволяющие однозначно определить состояние всех основных систем энергоблока.

Информация, поступающая на второй уровень, необходима не только для регистрации, но и для формирования базы данных с последую-

щим использованием в нейтронно-физических расчётах. В связи с этим устройства ДРЕГ-Ц обеспечивают передачу всей полученной информации от устройств нижнего уровня на третий.

Кроме того, на уровень формирования диагностического архива поступает информация от смежной КСКУЗ. Эта информация включает значения токов датчиков внутриреакторного контроля (по радиусу и высоте), положения стержней СУЗ, значения параметров индивидуального контроля системы аварийной защиты реактора по технологическим параметрам (АЗРТ). Сигналы, по которым происходит аварийный останов энергоблока, также поступают в "СКАЛУ-МИКРО" через устройства ДРЕГ-Ц. Их приём осуществляется от КСКУЗ по сети Ethernet. Для повышения надёжности выполнения функции регистрации аварийных остановов в устройствах ДРЕГ-Ц предусматривается приём ограниченного количества (до 24) инициативных дискретных сигналов – сообщений о срабатывании основных защит.

В дальнейшем большую часть принятой информации устройства второго уровня передают на третий уровень для формирования оперативной базы данных.

Уровень формирования базы данных

Эта часть системы "СКАЛА-МИКРО" представляет совокупность рабочих станций на основе промышленных персональных компьютеров ККСН "ЭКСПРО", размещённых в устройствах, конструктивно близких к устройствам ДРЕГ-Ц. Все компьютеры на этом уровне разделяются на три класса – серверы, расчётные станции и шлюзы между магистралями Ethernet и ДКМ.

Серверы обеспечивают предоставление своих ресурсов и услуг (дисковое пространство, очередь сетевой печати, межсетевую маршрутизацию и т.д.) другим рабочим станциям локальной сети верхнего уровня (ЛСВУ). Ресурсы серверов используются для выполнения следующих задач:

- хранение текущего среза оперативной базы данных (измеренные и рассчитанные параметры, уставки, события, сообщения и т.д.);
- хранение информационной базы данных (масштабы, размерности и т.д.);
- хранение программного обеспечения рабочих станций и обеспечение возможности их загрузки с сетевых дисков;

– маршрутизацию (т.е. передачу информации между сегментами ЛСВУ) и сегментацию (т.е. сокращения избыточных передач из сегмента в сегмент);

– поддержание целостности ресурсов ЛСВУ и разграничение прав доступа рабочих станций к данным и программному обеспечению;

– управление очередью сетевой печати;

– связь с общестанционной сетью.

Расчётные станции реализуют комплекс программ расчёта внутриреакторного энерго-распределения с формированием текущего среза оперативной базы данных расчётных параметров.

Шлюзы Ethernet-ДКМ служат для ввода в "СКАЛА-МИКРО" информации о расходах воды в технологических каналах и каналах СУЗ. Расходы вводятся как через нижний уровень системы "СКАЛА-МИКРО", так и через отдельную систему АЗРГК (также разработки и изготовления НПП ВНИИЭМ). Система АЗРГК, помимо информационных функций (приём расходов воды в технологических каналах), выполняет функции аварийного останова энергоблока при снижении расхода воды в каналах. Она построена на базе микроконтроллера K1816BE51 и устройств ввода информации от магнитоиндукционных преобразователей. Поскольку отсутствие информации о расходах может быть причиной останова энергоблока по команде оператора БЩУ, есть необходимость в создании сети, которая гарантирует доставку пакетов на всех уровнях. Такой сетью является сеть ДКМ, физически построенная на основе интерфейса RS-485. Протоколы передачи информации по этой сети разработаны НПП ВНИИЭМ и гарантируют доставку сообщений от нижнего уровня к устройствам, обеспечивающим формирование базы данных.

Уровень представления информации

Представление информации в рамках системы "СКАЛА-МИКРО" реализовано на базовой информационной модели реактора, расположенной на БЩУ, и на РСО, входящих в состав системы. Базовые средства информационной модели, к числу которых относятся табло отклонений, мнемотабло каналов (предназначено для представления информации о состоянии параметров каналов реактора на ламповое табло, представляющее собой схематический разрез реактора), самописцы, обеспечивают опе-

раторов энергоблока представлением информации об основных событиях технологического процесса.

Для повышения надёжности любая критическая информация, выводимая на табло, всегда дублируется звуковой сигнализацией и сборной световой сигнализацией, т.е. на одно недопустимое событие система реагирует минимум тремя способами. Кроме того, на мнемотабло и самописцы информация выводится после её обработки на всех уровнях "СКАЛА-МИКРО". На табло отклонений вывод осуществляется непосредственно после первичной обработки принятых сигналов устройствами нижнего уровня. Таким образом, даже при отказе функций формирования диагностического архива и формирования базы данных оперативный персонал, осуществляющий управление энергоблоком, не теряет информации о его состоянии.

В системе "СКАЛА-МИКРО" реализована развитая система информационной поддержки операторов, обеспечивающая:

– автоматическое представление на программируемых средствах БЩУ-0;

– представление информации по вызову на экранах рабочих станций операторов;

– регистрацию информации на устройствах быстрой печати по запросу персонала;

– вскрытие диагностического архива.

В настоящее время на 2-м блоке Курской АЭС функция представления параметров поканального контроля реализована не посредством лампового мнемотабло, а с использованием экрана коллективного пользования. Подсистема представления информации на экране коллективного пользования включает:

– видеосистему (разработки и поставки фирмы BARCO);

– две рабочие станции РСО-ЭКП.

Видеосистема включает шесть видеокубов в конфигурации 3×2 и представляет собой единый экран с видимым изображением 2000×2250 мм и разрешением экрана 2048×2304 пикселей. С точки зрения управления видеосистема представляет собой монитор с управлением от персонального компьютера по интерфейсу Panel Link. Система "СКАЛА-МИКРО" обеспечивает дублированное управление экраном коллективного пользования. Программное обеспечение "СКАЛЫ-МИКРО" обеспечивает возможность сохранения работоспособности экрана коллективного пользования при отказе отдель-

ного видеокуба или потере одного из вводов электропитания путём изменения формата отображения по команде оператора с сохранением основной информации.

Основным средством индивидуальной информационной поддержки операторов является РСО. Рабочие станции размещаются на пультах операторов-технологов, осуществляющих управление энергоблоком (включая начальника смены станции или блока), а также на рабочих местах оперативного персонала системы "СКАЛА-МИКРО". Конструктивно РСО представляет собой двухэкранную станцию отображения с общими системными блоками, клавиатурой и мышью. Для операторов-технологов предусмотрено по две двухэкранных РСО. В качестве монитора РСО в настоящее время применяется жидкокристаллический плоский экран с диагональю 18,1", использование которого улучшает компоновку рабочих мест операторов по сравнению с экранами на электронно-лучевой трубке. В комплект поставки системы "СКАЛА-МИКРО" обычно входит от 15 до 20 подобного рода РСО.

Ресурсы РСО позволяют реализовать на каждом рабочем месте информационную поддержку любого оператора, при этом предусмотрена возможность индивидуальной настройки каждой РСО путём конфигурации программного обеспечения (например, можно запретить отдельные функции на данном рабочем месте).

С точки зрения пользователя все экраны одного рабочего места взаимозаменяемы, что обеспечивает сохранение работоспособности функции информационной поддержки операторов при любых одиночных отказах в системе и потере одного из вводов первичного электропитания.

В системе "СКАЛА-МИКРО" предусмотрена возможность печати картограмм и списков параметров по запросу персонала. Вызов на печать осуществляется с клавиатуры одной из РСО оператора, очередь сетевой печати организуется и поддерживается автоматически. В качестве устройства быстрой печати в настоящее время используется принтер DFX-8500.

В проекте "СКАЛА-МИКРО" предусмотрена функция оперативного контроля состояния системы. Она реализована на верхнем уровне в качестве отдельной программы, работающей на РСО. Все устройства непрерывно проводят

собственную диагностику, результаты которой затем передаются на уровень формирования базы данных по сети Ethernet и могут быть представлены персоналу, осуществляющему оперативное обслуживание и ремонт оборудования "СКАЛА-МИКРО". Для повышения надёжности выполнения этой функции наиболее важные сигналы заведены проводными соединениями в устройства нижнего уровня. К числу таких сигналов относятся сигнал об отсутствии электропитания на входе устройства и сигнал несанкционированного доступа к устройству. Выделение этих сигналов в отдельную группу связано с тем, чтобы при потере связи с устройством на любом уровне можно было достоверно определить, является ли это следствием внутренней ошибки системы или это результат внешних обстоятельств (потеря первичного электропитания, несанкционированный доступ).

Результаты внедрения информационно-измерительной системы "СКАЛА-МИКРО"

Реализация проекта модернизации систем "СКАЛА" произошла на новых базовых средствах при условии использования существующих на АЭС первичных датчиков локальной автоматики и большей части коммуникационных связей. Отдельные элементы системы "СКАЛА-МИКРО" были внедрены в 2002 г. на 1-м энергоблоке Курской АЭС, в июне 2004 г. завершена модернизация энергоблока Курской АЭС. Принято решение концерном "Росэнергоатом" о модернизации всех действующих комплектов системы "СКАЛА" на основе проекта "СКАЛА-МИКРО". В настоящее время система "СКАЛА-МИКРО" в полном объёме внедряется на 1-м блоке Ленинградской АЭС.

В результате внедрения системы "СКАЛА-МИКРО" существенно повышены эксплуатационная надёжность и качество контроля энергоблока:

- обеспечена толерантность системы к одиночным отказам, включая потерю одного из вводов энергопитания;

- сохранены существующие кабельные присоединения при замене устройств нижнего уровня;

- сохранена действующая система энергопитания, повышение надёжности электроснабжения обеспечено внутрисистемными сред-

ствами (дублированное электропитание постоянным током для устройств В10Р и применение источников бесперебойного питания);

– обеспечен оперативный обмен информации с новой системой управления и защиты реактора (двухкомплектной КСКУЗ) по цифровому каналу связи;

– обеспечен приём информации непосредственно от датчиков расхода воды в каналах реактора с исключением промежуточных преобразователей;

– существенно повышена оперативность контроля измеряемых параметров – период контроля поканальных расходов воды снижен до 2 с (вместо 60 с), температурных параметров до 4 с (вместо 60 с), индивидуальных аналоговых параметров до 1 с (вместо 10 с) и дискретных параметров до 0,5с (вместо 10 с);

– реализован оперативный контроль трёхмерного энергораспределения реактора с циклом 5 с (ранее цикл контроля двумерного энергораспределения составлял 5 мин);

– реализована развитая система информационной поддержки операторов энергоблока с применением индивидуальных (двухэкранные рабочие станции отображения) и коллективных (экран коллективного пользования) средств представления информации;

– расширен объём и увеличена разрешающая способность системы диагностической регистрации (количество контролируемых параметров увеличено в 2–3 раза, глубина архивирования возросла до 30 сут вместо 30 мин).

Двухлетняя практика безаварийной опытно-промышленной эксплуатации оборудования части устройств системы "СКАЛА-МИКРО" на 1-м энергоблоке Курской АЭС подтвердила правильность выбора пути модернизации на базе средств МС УВТ В10Р и промышленных компьютеров ККСН "ЭКСПРО", а также выявила высокую надёжность новых аппаратно-программных средств и их явное преимущество по многим другим параметрам перед ранее используемыми средствами.

Помимо оценки новых проектных решений была проведена всесторонняя оценка качества продукции, выпускаемой НПП ВНИИЭМ, анализ поставщиков и комплектующих изделий, что позволит в дальнейшем избежать серьезных временных задержек при изготовлении и наладке системы. Структура технических средств "СКАЛА-МИКРО" такова, что расширение объёма принимаемой информации требует лишь добавления ещё одного устройства на нижний уровень, при этом существующая ёмкость устройств второго и третьего уровней намного превышают существующие потребности. Система легко адаптируется. По существу для каждого нового энергоблока требуется лишь доработка программного обеспечения в плане привязки к объекту, доработки же оборудования не требуется.

Ввод в эксплуатацию нового поколения системы "СКАЛА-МИКРО" на 2-м энергоблоке Курской АЭС позволил сделать реальный шаг в направлении автоматизации широкого круга мероприятий, связанных с наладкой, эксплуатацией электрооборудования и повышением уровня безопасности канального реактора.

В результате реализации долговременной программы технической модернизации энергоблоков РБМК первого поколения, в число которых вошло внедрение системы "СКАЛА-МИКРО" на двух блоках Курской АЭС, созданы необходимые условия для продления срока их эксплуатации. Решена задача повышения безопасности данных энергоблоков до уровня современных международных требований. Действующие мощности Курской АЭС увеличены на 600 МВт.

Список литературы

1. Адасько В.И., Десятников И.И., Долкарт В.М. "Информационные системы энергоблоков АЭС с реакторами РБМК-1000. Опыт создания и перспективы развития" // Электротехника. 1991. № 9. С.53–60.
2. Десятников И.И., Джумаев С.Д., Савин А.К. Опыт разработки и эксплуатации информационных систем верхнего уровня АЭС с реакторами РБМК // Труды НПП ВНИИЭМ. 2001. Т.100. С.197–206.

Электроэрозионная наработка материала в коаксиальном магнитоплазменном ускорителе для нанесения покрытий

СИВКОВ А.А., ГЕРАСИМОВ Д.Ю., ЦЫБИНА А.С.

Установлены основные закономерности электрической эрозии поверхности ускорительного канала коаксиального магнитоплазменного ускорителя и наработки рабочего материала для нанесения покрытий. Интегральное значение эродированной массы возрастает с увеличением подведённой к ускорителю энергии и связано с ней квадратичной зависимостью. Показана возможность нанесения функционального покрытия состава нержавеющей стали на различные металлические поверхности.

Экспериментальные исследования показали возможность использования импульсного силовоточного коаксиального магнитоплазменного ускорителя (КМПУ) для нанесения различных функциональных покрытий на металлические поверхности. Нанесённое таким способом медное покрытие на алюминиевую поверхность [1] обеспечивает электрическое соединение контактной пары медь–алюминий с существенно меньшим переходным сопротивлением. К уникальным возможностям способа следует отнести: реализацию в рабочем цикле динамического синтеза сверхтвёрдых материалов (оксидов, нитридов, карбидов металлов) [2] и нанесения композиционных упрочняющих покрытий; сверхглубокую модификацию металлических поверхностей путём её обработки гиперзвуковой струёй плотной электроразрядной плазмы; нанесение смесевых металлических покрытий на металлические поверхности, в том числе покрытий состава нержавеющей стали. Свойства получаемых покрытий определяются динамическими характеристиками струйного течения из ствола КМПУ и массой вынесенного рабочего материала, обеспечивающей необходимую толщину покрытия и площадь обрабатываемой поверхности. КМПУ является электроэрозионным ускорителем, так как рабочий материал нарабатывается электроэрозионным путём с поверхности ускорительного канала (УК). Поэтому исследования процесса электроэрозионного износа поверхности УК с целью изучения характера износа по длине ствола, выявления наиболее значимого фактора, опре-

The basic laws of surface electrical erosion of a coaxial magnetoplasma accelerator channel and production of coating material have been determined. The integral quantity of the eroded mass of grows with increase of the energy supplied to the accelerator and is connected to her by squarelaw dependence. The opportunity of drawing of a functional coating stainless steel on various metal surfaces has been shown.

деляющего его значение, оптимизации электроэрозионной наработки рабочего материала и конструкции ускорителя являются актуальной практической задачей. Электроэрозионные процессы на поверхности электродов, направляющих в рельсотронных электродинамических ускорителях, и их влияние на динамику разгона плазменного поршня подробно проанализированы в работах [3,4]. Однако рассматриваемая в настоящей работе гибридная коаксиальная ускорительная система имеет существенные отличия от рельсотрона. В ней поверхность цельнометаллического цилиндрического УК подвергается не только тепловому воздействию больших токов, протекающих через опорные дуговые пятна. В течение всего времени работы в УК в том или ином виде существует дуговой разряд типа Z-пинч, оказывающий тепловое воздействие на его поверхность. Это, естественно, должно повлиять на уровень электроэрозионного износа. Устройство и принцип действия КМПУ в режиме ускорения электроразрядной плазмы при электропитании от ёмкостного накопителя энергии C показаны на рис.1 [1]. Исследования проведены в основном с использованием стволов 2 из нержавеющей стали и меди.

В исходном состоянии вершина центрального электрода 1 (рис.1,а,в) электрически соединена с цилиндрической поверхностью УК в начале ствола пучком электровзрывающихся проводников (ЭВП) 4. Такая конструкция узла центрального электрода и фонтанообразная конфигурация пучка ЭВП обеспечивают формирова-

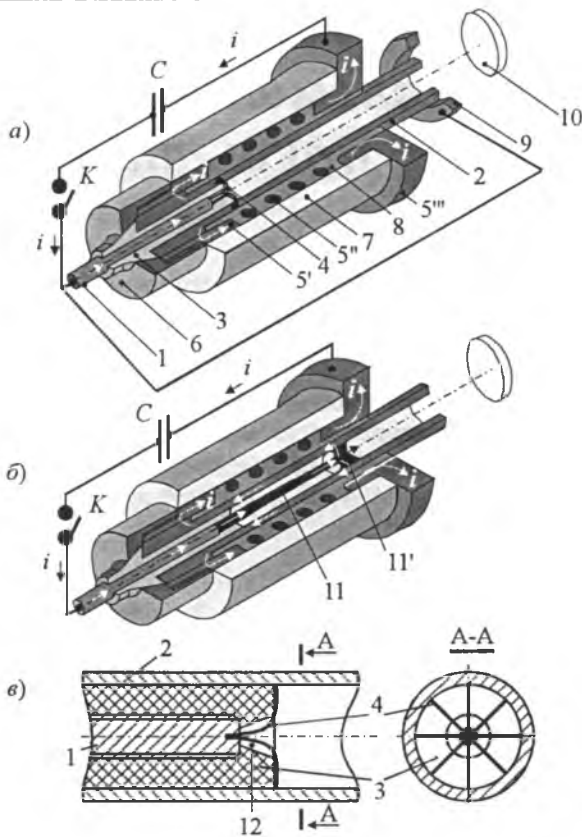


Рис.1. Устройство и принцип действия КМПУ:

a – исходное состояние; *б* – в процессе работы; *в* – узел формирования плазменной структуры

1 – центральный электрод; 2 – электрод-ствол; 3 – изолятор центрального электрода; 4 – электровзрывающиеся проводники; 5' – контактный цилиндр индуктора; 5'' – соленоид индуктора; 5''' – контактный фланец индуктора; 6 – заглушка; 7 – корпус (стеклопластик); 8 – изолятор соленоида (стеклопластик); 9 – кольцевой электрод системы шунтирования; 10 – мишень; 11 – плазменный жгут (Z-пинч); 11' – круговая плазменная перемычка, 12 – газогенерирующий канал

ние плазменной структуры сильноточного дугового разряда типа Z-пинч 11 (рис.1,б) с круговой плазменной перемычкой 11'. Для увеличения начальной скорости движения плазменной структуры в КМПУ за счёт использования электротермохимического механизма преобразования энергии канал 12 в изоляторе у вершины центрального электрода (рис.1,в) заполнялся газогенерирующим водородонасыщенным веществом (техническим вазелином или трансформаторным маслом). Изменение геометрии этого канала, числа и размеров ЭВП, наличие или отсутствие газогенерирующего вещества позволяют регулировать ввод энергии, динамику ускорительного и электроэрозионного процессов.

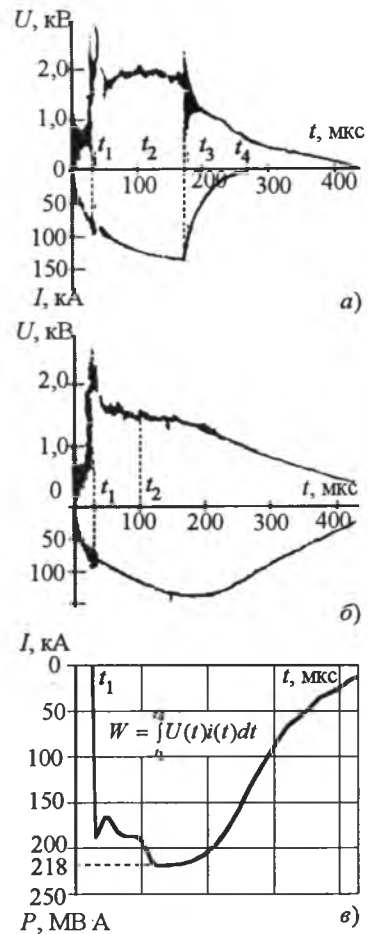


Рис.2. Типичные осциллограммы напряжения на электродах $U(t)$, рабочего тока $i(t)$ и кривая электрической мощности КМПУ при $l = 270$ мм, $d = 16$ мм, $C = 12 \cdot 10^{-3}$ Ф, $U_C = 4,0$ кВ:

a – режим работы с отсечкой хвостовой части импульса тока; *б* – режим работы при полном импульсе тока; *в* – кривая электрической мощности при полном импульсе тока

В экспериментах регистрировались рабочий ток $i(t)$ и напряжение $U(t)$ на электродах КМПУ. Подведённая к ускорителю энергия W определялась интегрированием кривой мощности (рис.2). Она менялась путём изменения зарядного напряжения U_C от 2,0 до 4,0 кВ и ёмкости C конденсаторной батареи от $12 \cdot 10^{-3}$ до $48 \cdot 10^{-3}$ Ф. Для сохранения условий ввода энергии изменение W производилось также путём отсечки хвостовой части импульса тока с помощью системы шунтирования разряда.

Динамика плазменной структуры в УК и гиперзвуковой струи в свободном пространстве исследовались с помощью высокоскоростной кадрированной фотосъёмки на ВФУ-1 соответственно в срез ствола и в профиль.

Масса металла, эродированная с поверхности УК и вынесенная струей, определялась

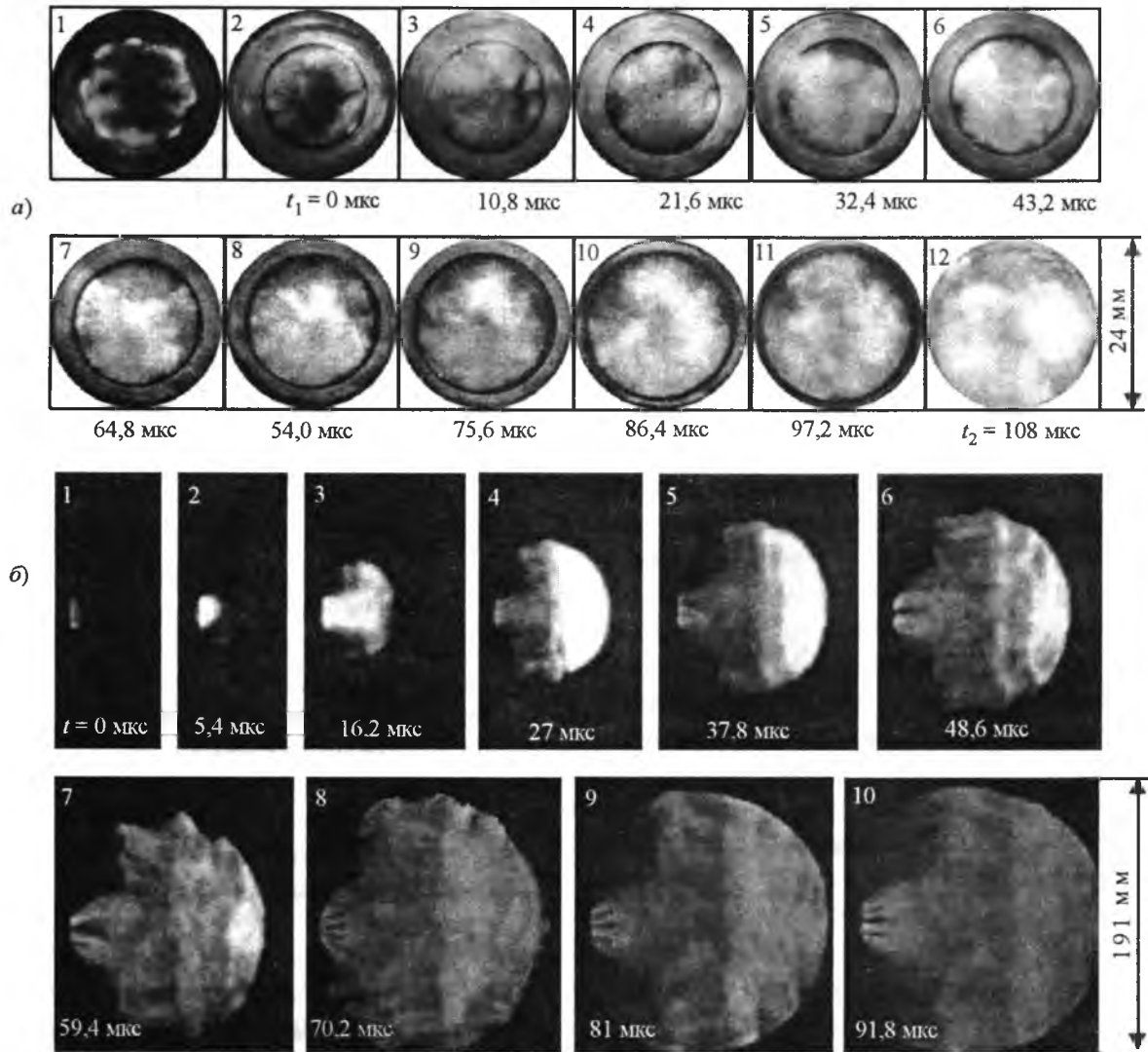


Рис.3. Кадры скоростной фотосъемки в срез ствола КМПУ при $l = 266$ мм, $d = 24$ мм, $C = 48 \cdot 10^{-3}$ Ф, $U_C = 3,0$ кВ (а) и процесса истечения сверхзвуковой струи из ствола КМПУ при: $l = 269$ мм, $d = 19$ мм, $C = 48 \cdot 10^{-3}$ Ф, $U_C = 3,0$ кВ (б)

взвешиванием ствола до и после выстрела. Характер износа по длине УК изучался путём разрезания отработанного ствола на отрезки длиной 10–20 мм, их взвешивания, определения дефекта массы в сравнении с эталонным отрезком, построения и анализа эпюр дифференциального электроэрозионного износа.

В момент времени $t = 0$ (рис.2) замыкается цепь электропитания и по обозначенному стрелками контуру (рис.1,а) начинает протекать рабочий ток $i(t)$. В момент t_1 происходит электровзрыв проводников 4, сопровождающийся электровзрывным импульсом напряжения и возникновением дугового разряда. Этот момент принят за начало ускорительного процесса. По мере формирования плазменной структуры на электродах КМПУ снижается до

уровня дуговой стадии и происходит ограничение скорости нарастания тока. Высокоэффективное ускорение плазмы до гиперзвуковых скоростей происходит в режиме нарастающего тока (рис.2). Расширение разогретых разрядом газообразных продуктов термического разложения газогенерирующего вещества, в составе которых более 10% водорода, задаёт начальную динамику ускорения круговой плазменной перемычки, за которой вытягивается токоведущий плазменный жгут. Устойчивое компактное состояние плазменной структуры обеспечивается азимутальным магнитным полем собственного тока и аксиальным полем соленоида 5 внешней индукционной системы КМПУ. В такой коаксиальной магнитоплазменной системе, аналогичной коаксиальному рель-

Таблица 1

сотрону, на круговую плазменную перемычку действует ускоряющая электродинамическая сила Лоренца. Ускоряющим фактором является и внешнее магнитное поле соленоида.

Истечение плазмы из ствола начинается в момент t_2 , установленный с помощью ВФУ-1 (рис.3) с точностью $\pm 2,7$ мкс (время экспозиции одного кадра). На осциллограммах (рис.2,а) резкое снижение напряжения и тока в момент t_3 вызвано срабатыванием системы отсечки хвостовой части импульса тока. Происходит это при перекрытии плазмой и пробое кольцевого зазора между срезом ствола 2 и кольцевым электродом 9 (рис.1,а). Разряд в УК шунтируется цепью с малым сопротивлением и ток в нем быстро убывает до нуля. Момент t_3 легко регулируется изменением кольцевого зазора и положения электрода 9 относительно среза ствола. Осциллограммы на рис.2,б соответствуют плазменному выстрелу при полном импульсе тока. Основные моменты и этапы ускорения плазменной структуры при однократном прохождении по УК видны на фотографии съёмки в торец ствола (рис.3). Фотоизображения представляют собой перспективу внутри УК. Внутренний круг на кадре 1 со светлыми пятнами – это торец изолятора с радиально расходящимися ЭВП. Внешняя окружность – срез УК диаметром 24 мм. Кольцо между ними – поверхность УК длиной 266 мм. Кадр 1 непосредственно предшествует электрическому взрыву ЭВП, точки контактов которых с поверхностью УК ярко светятся. Кадр 2 соответствует взрыву проводников, образованию круговой плазменной перемычки и началу ускорения. На последующих кадрах видно последовательное увеличение диаметра светящегося диска – фронтальной границы плазменной структуры, свидетельствующее о её перемещении к срезу ствола. Большая глубина резкости объектива ВФУ-1 обеспечивает достаточно чёткую съёмку по всей длине УК. Кадр 12 соответствует положению передней границы плазменной структуры на срезе ствола. Несколько затемнённые области в центре и по периметру, неравномерность свечения фронта плазменной перемычки могут говорить о её фонтанообразной форме и дискретной структуре. Особенно хорошо это видно при визуализации кадрированной съёмки в виде компьютерного видеоклипа. Кроме того, при его

Параметры опытов	Номер опыта				
	1	2	3	4	5
Диаметр ускорительного канала d , мм	16	16	16	19	24
Длина ускорительного канала l , мм	271	272	272	270	266
Зарядное напряжение U_C , кВ	4	4	3	3	3
Ёмкость накопителя энергии C , мФ	12	12	48	48	48
Энергия накопителя W_C , кДж	96	96	216	216	216
Максимальный ток I_m , кА	139	139	159	140	144
Напряжение дуги U , кВ	1,8	1,8	1,8	2,1	2,2
Подведённая энергия W , кДж	30,0	50,0	117,4	140,1	136,1
Перенесённый заряд q , Кл	20	42	94	92	103
Длительность импульса тока Δt_{0-4} , мс	~0,3	~0,5	~1,0	~1,0	~1,0
Эродированная масса m , г	1,1	3,5	37,1	34,4	20,0
Время ускорения Δt_{1-2} , мкс	75	75	61	69	86
Скорость на срезе ствола v , км/с	5,5	5,5	7,0	6,3	4,8

просмотре отчётливо видно вращение плазменной перемычки при прохождении участка ствола, охваченного соленоидом. Кадрированные фотографии съёмки в торец ствола использовались для определения закона движения и характера изменения скорости фронта плазменной структуры по длине УК (рис.4). Скорость на срезе ствола уточнялась путём экстраполяции кривых затухания скорости головной ударной волны, полученных при обработке данных съёмки в профиль (рис.3,б). На рис.4 представлены типичные эпюры дифференциального электроэрозионного износа Δt поверхности УК по его длине l , а в табл.1 – данные соответствующих опытов.

Эпюра 1 соответствует опыту с однократным прохождением плазменной структуры по УК и последующей отсечкой тока. Эпюра 2 показывает износ от полного импульса тока. Разница значений этих эпюр, представленная кривой 2-1, характеризует износ, вызванный выделением энергии после прохождения плазменной перемычки по стволу. Его равномерность (на участке длиной около 140 мм) сви-

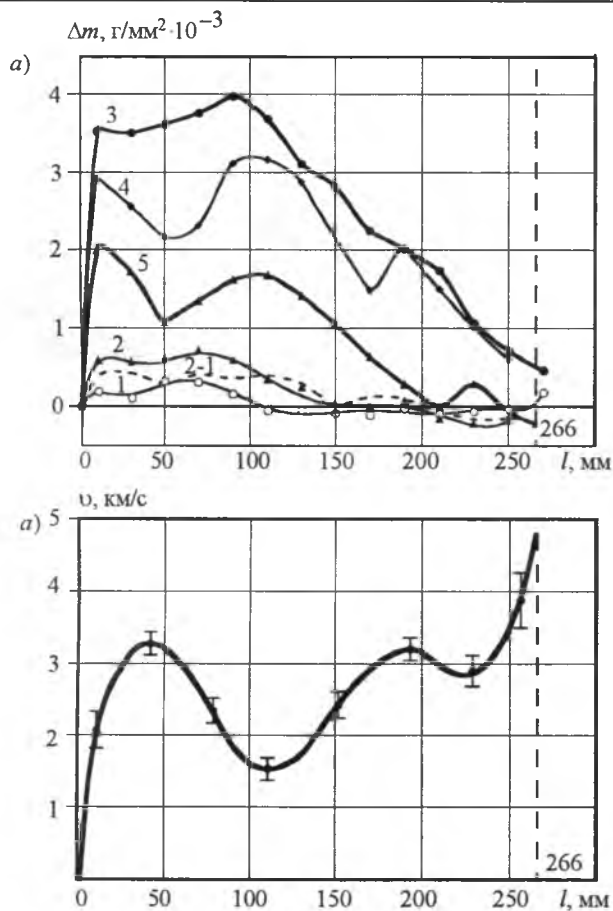


Рис.4. Типичные эпюры дифференциального электроэрозионного износа поверхности ускорительного канала по его длине для стволов из нержавеющей стали (а), номера кривых соответствуют номерам опытов в табл.1, и кривая скорости фронта плазменной структуры по длине ускорительного канала (б)

детельствует о том, что характер износа задается первым прохождением. Сравнение эпюр 1, 2, 3 показывает, что Δm увеличивается с ростом тока, подведенной энергии и перенесенного заряда при одинаковых условиях работы ускорителя и его конструктивных параметрах. Увеличение диаметра УК приводит к уменьшению Δm даже при возрастании значений воздействующих факторов, что видно из сравнения эпюр 3, 4, 5 и данных табл.1. Вид приведенных эпюр указывает на существование общих закономерностей процесса электроэрозионного износа поверхности УК КМПУ. Высокий уровень Δm на начальном участке обусловлен близостью устья канала 12, в котором максимально джоулево тепловыделение, и низкой скоростью плазменной структуры. Далее наблюдается спад Δm с последующим, характерным для

всех эпюр, возобновлением роста до некоторого максимума. Положение этого максимума смещается вправо, к срезу ствола, с увеличением энергии и диаметра УК. На оставшейся его длине Δm снижается до нуля с возможными последующими экстремумами, явно выраженными на эпюре 4 и 5 (рис.4). Вид эпюр Δm наталкивает на предположение о волновой природе фактора, определяющего электроэрозионный износ по длине УК.

Из рис.4 видно, что длина подверженного эрозии участка возрастает с увеличением энергии и в рассматриваемых условиях не превышает 280–320 мм независимо от длины соленоида внешней индукционной системы. На длине, превышающей эродированный участок, имеет место наслоение металла на поверхность УК (Δm в опытах 1, 2, 5 принимает отрицательные значения). Поэтому эродированная с поверхности УК масса определялась интегрированием "положительного" участка эпюры $\Delta m(l)$. Интеграл "отрицательного" участка эпюры равен массе наслоенного металла, а полный интеграл соответствует массе вынесенного из ствола металла, равной разнице масс ствола до и после выстрела. Согласно полученным данным оптимальной длиной УК КМПУ в диапазоне подведенной энергии 100–150 кДж следует считать 200 мм, так как на ней происходит относительно равномерный износ и нарабатывается до 90% эродированной и выносимой из ствола массы металла.

Анализ кривой скорости фронта плазменной структуры, полученной путём обработки фотоканалов съёмки в торец ствола (рис.3), соответствующей опыту 5 (рис.4,б), показывает соответствие характера эпюры Δm и кривой скорости. Увеличение скорости соответствует снижению Δm и наоборот. Совпадают положения экстремумов кривых. Отсюда следует: чем выше скорость плазменной структуры, тем слабее тепловой поток со стороны движущегося разряда на стенку УК и меньше эрозия его поверхности. Волновой характер изменения скорости плазменной структуры, по всей вероятности, обусловлен газодинамическими закономерностями сверхзвуковых течений в каналах [5]. Динамика движения разряда дает основания предположить, что в УК формируется квазистационарный режим сверхзвукового течения с бочкообразной ударно-волновой структурой,

с одним или несколькими скачками уплотнения. В них имеет место снижение числа Маха (скорости) и увеличение давления, плотности и температуры. Это предположение подтверждается результатами исследований ударных волн в разрядной и электромагнитной ударных трубах [6,7]. К такому выводу склоняются и авторы [8–11], которые установили сильную волновую неустойчивость скорости передней границы движущегося в рельсотроне разряда и его продольного размера. И показали, что ни одна из существующих моделей движения сильнооточного разряда в магнитном поле не дает достаточно точного описания его поведения. В этой связи наиболее вероятно доминирующее влияние процесса формирования классической для сверхзвуковых течений ударно-волновой структуры. Как и в случае КМПУ (рис.2) в указанных работах установлено относительное постоянство напряжения на разряде в широком диапазоне изменения нарастающего тока и в квазистационарном режиме горения разряда. Это позволяет предположить, что разряд в рельсотроне и круговая плазменная перемычка в КМПУ (в режиме ускорения плазмы) не компактны, а распределены на некоторой длине [9,12]. Тогда становится понятным сохранение характера электроэрозионного износа УК КМПУ в большом диапазоне изменения подведенной энергии как в режиме работы с однократным прохождением плазменной структуры по УК, так и при полном импульсе. При этом роль электромагнитного ускорения после начального формирования квазистационарного течения в стволе сводится к его поддержанию. Большая ширина основного "горба" на эпюрах износа обусловлена, по-видимому, некоторым перемещением скачка уплотнения вследствие нестационарности параметров течения, которые естественно пропорциональны мощности разряда (рис.2,в).

С практической точки зрения необходимо знать значение удельного электроэрозионного износа относительно определяющего его наиболее значимого фактора. В работах, посвященных исследованию электрической эрозии электродов рельсотронных ускорителей, удельная эрозия принимается относительно электрического заряда $\int i(t)dt$, перенесенного движущимся разрядом [3,13], либо относительно ин-

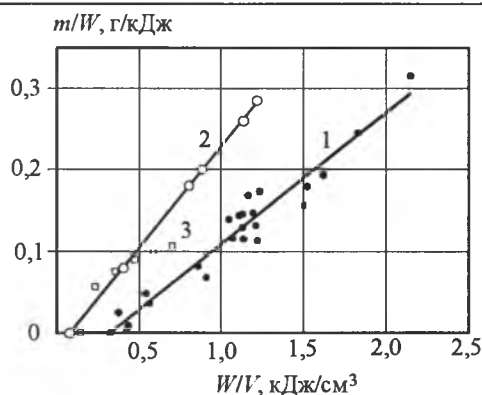


Рис.5. Зависимости m/W от удельной подведенной энергии W/V :

1 – ствол из нержавеющей стали; 2 – ствол из меди; 3 – данные [4] для рельсотрона с медными электродами

теграла действия $\int i^2(t)dt$ [2]. Однако анализ полученных для КМПУ экспериментальных результатов показал отсутствие корреляционной связи Δm и m от этих факторов, но позволил установить определяющее влияние подведенной к ускорителю энергии W . Обобщить все результаты, полученные в широком диапазоне изменения конструктивных параметров КМПУ и параметров электропитания, удаётся в виде зависимости удельного интегрального износа m/W от удельной (на единицу объема ускорительного канала V) подведенной энергии W/V (рис.5). Она аппроксимируется линейной функцией:

$$m/W = A(W/V - B), \tag{1}$$

где $A = 0,160 \text{ г} \cdot \text{см}^3 / \text{кДж}^2$; $B = 0,300 \text{ кДж} / \text{см}^3$.

В [4] показано, что в рельсотронном ускорителе плазмы значение унесенной массы линейно зависит от $\int i^2(t)dt$ и, при постоянстве сопротивления разряда, от W . В отличие от этого, как следует из выражения (1), в КМПУ существует квадратичная зависимость электроэрозионного износа от значения подведенной энергии. Определяющий наклон зависимости коэффициент электроэрозионного износа A не зависит от параметров контура электропитания, но меняется при изменении некоторых условий работы собственно ускорителя. В частности, он увеличивается при отсутствии газогенерирующего вещества в зоне формирования плазменной структуры. Уменьшение A замечено при ослаблении внешнего магнитного поля (дополнительным экраном) либо при его отсут-

ствии (обычный пинч-ускоритель). Аналогичная зависимость 2 (рис.5) для КМПУ с медным стволом аппроксимируется линейной функцией с коэффициентами: $A = 0,250 \text{ г}\cdot\text{см}^3/\text{кДж}^2$; $B = 0,075 \text{ кДж}/\text{см}^3$. Большее значение коэффициента A и меньшее B для меди обусловлено в основном более низкой температурой плавления. Из выражения (1) следует существование критического значения подведённой энергии, при котором электроэрозионный износ m практически отсутствует:

$$W_* = BV. \quad (2)$$

Это соотношение не лишено физического смысла. В эксперименте при $W = W_*$ на начальном участке поверхности УК длиной до 40 мм остаются лишь следы плавления, а вынос металла отсутствует, т.е. B представляет из себя критическое значение удельной (на 1 см^3 объёма ствола) подведённой энергии, ещё не вызывающее электроэрозионного износа из-за недостаточного прогрева металлической поверхности. Естественно, что для меди B ниже, чем для нержавеющей стали также из-за более низкой температуры плавления. Зависимость 3 (рис.5) построена в принятых нами координатах по экспериментальным результатам для рельсотрона с медными электродами, взятыми из [4], с учётом приведённых данных по геометрии УК (сечение $8 \times 8 \text{ мм}$, длина 100 мм) и постоянства сопротивления плазменной перемычки (около $0,7 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$). Вдвое меньшее значение B и существенное превышение m/W (при $W/V > 0,5 \text{ кДж}/\text{см}^3$) в КМПУ по сравнению с рельсотроном, а также отличие функциональных зависимостей $m(W)$ (линейная для рельсотрона и квадратичная для КМПУ), обусловлены различием магнитоплазменных систем этих типов ускорителей.

Далее представлены результаты исследований металлических образцов с нанесёнными покрытиями состава нержавеющей стали. На рис.6 приведены микрофотографии шлифов вертикального среза образцов из чёрной стали и меди, полученные на растровом электронном микроскопе Jeol-840. Видно, что покрытия абсолютно плотно прилегают к поверхности подложки. Методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) установлено, что состав покрытия в обоих случаях по всей толщине соответствует составу нержавеющей ста-

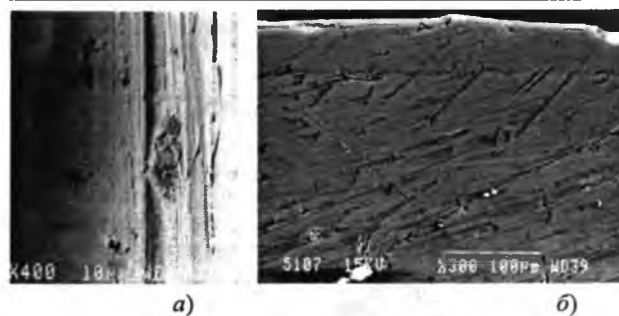


Рис.6. Микроскопическая фотография шлифа вертикального среза образца с покрытием из нержавеющей стали на:

a – чёрную сталь (справа покрытие, слева подложка); b – медь (верх покрытие, низ подложка)

ли $75\text{--}77\%\text{Fe}$; $13\text{--}16\%\text{Cr}$; $8\text{--}9\%\text{Ni}$. Видимая граница раздела покрытие–подложка представляет собой слой взаимного перемешивания материалов толщиной $10\text{--}20 \text{ мкм}$. В случае рис.6, a в этом слое содержится до $9\%\text{Cr}$ и $6,5\%\text{Ni}$. В случае рис.6, b состав слоя включает примерно $43\%\text{Fe}$ и Cu , около $7\%\text{Cr}$ и $8\%\text{Ni}$. Кроме того, граница не является ровной линией, а имеет множество микросцеплений. Все это обеспечивает предельно высокую адгезию. Следует отметить высокую плотность покрытия и отсутствие пор. Особый интерес представляет нанесение покрытий состава нержавеющей стали на поверхности изделий из алюминиевых сплавов. Покрытие характеризуется высокой плотностью, отсутствием пор и абсолютно плотным прилеганием к поверхности подложки. По данным РФЭС состав покрытия соответствует составу нержавеющей стали (примерно $82,3\%\text{Fe}$, $11,4\%\text{Cr}$, $6,4\%\text{Ni}$), элементы которой обнаруживаются этим методом на глубине до 70 мкм . Такая толщина слоя взаимного перемешивания обусловлена тепловыми и гидродинамическими явлениями, возникающими при воздействии высокоскоростной плотной струи на дюралюминиевую поверхность. При этом на границе образуются множественные микросцепления материалов, обеспечивающие предельно высокую адгезию. В случае чрезмерно высокой энергии струи происходит плавление поверхности слоя легкоплавкого дюралюминия и покрытие отслаивается от подложки. Исследование образца методом ОЖЕ-электронной спектроскопии показывает насыщение поверхностного слоя толщиной более 300 мкм угле-

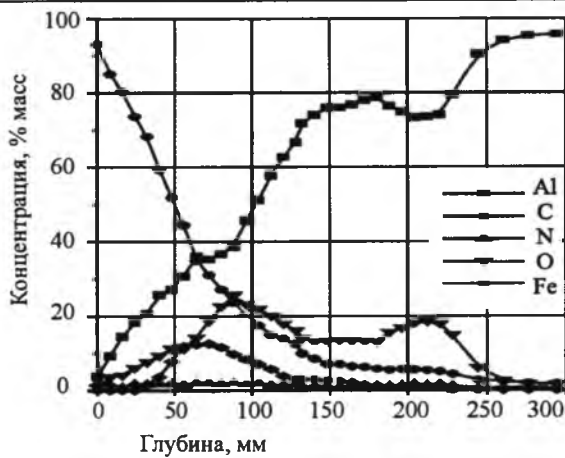


Рис.7. Кривые массовой концентрации элементов в граничном слое поверхности подложки из дюралюминия, обработанной плазменным потоком состава нержавеющей стали (данные получены методом ОЖЕ- электронной спектроскопии)

родом, кислородом, железом, азотом (рис.7). Железо является основной составляющей вещества высокоскоростной струи. Углерод в большом количестве присутствует в струе как основной продукт электротермического разложения газогенерирующего вещества. Наиболее вероятно, что углерод присутствует в подложке в виде алмазоподобной фазы и в составе карбидов. Кислород и азот захватываются из окружающей атмосферы и внедряются в подложку в составе оксидных и нитридных соединений металлов. Из микрофотографии видно, что поверхностный слой подложки толщиной порядка 1,0 мм насыщен множественными струйными включениями более плотного материала, перпендикулярными поверхности образца. Поперечный размер включений порядка 1–5 мкм. Струйное сверхглубокое проникание плотного вещества в тело подложки объясняется возникновением микрокумулятивных процессов при воздействии плотной гиперзвуковой струи на поверхность подложки и внедрением в неё микрокумулятивных струй [2]. Всё это в совокупности с ударно-волновым уплотнением является причиной очень сильного увеличения микротвёрдости поверхностного слоя толщиной более 0,5 мкм. Результаты исследования микротвёрдости Н по поверхности шлифа вертикального среза отожжённого при 325°C образца, полученные с помощью Nano-hardness tester CSEM-instruments, представлены на рис.8. Видно, что в слое взаимного перемешивания ма-

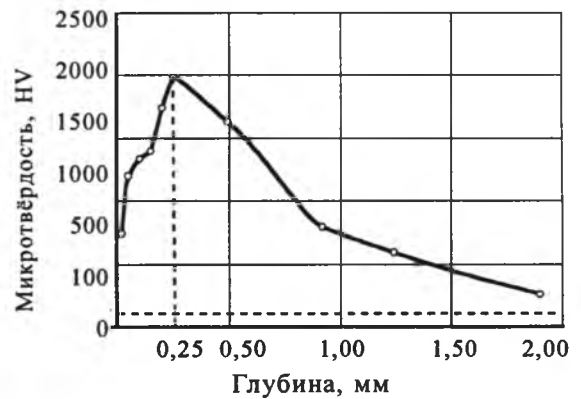


Рис.8. Кривая микротвёрдости граничного слоя образца из дюралюминия, обработанного плазменным потоком состава нержавеющей стали: - - - - микротвёрдость исходного образца дюралюминия

териалов микротвёрдость близка к микротвёрдости стали. С углублением до 250 мкм она увеличивается, достигая примерно 2000 НВ. Далее микротвёрдость плавно снижается и на глубине более 2,0 мм приближается к микротвёрдости исходного дюралюминия.

Таблица 2

Температура, °С	S_1 , мкм ²	S_2 , мкм ²	S_1/S_2
25	35349	306	115,5
125	134622	2391	56,3
225	94002	4124	22,8
325	767406	4804	160

В табл.2 представлены результаты сравнительных высокотемпературных трибологических испытаний дюралюминиевого исходного образца и образца с покрытием из нержавеющей стали (толщина покрытия около 50 мкм). Испытания проведены с помощью high temperature tribometr CSEM-instruments (пара трения шар – диск). Износ определялся с помощью трёхмерного профилографа Micro Measures 3D station как площадь S поперечного сечения кругового трека, оставленного шарообразным алмазным индентором диаметром 3 мм на испытуемой поверхности дискообразного образца. В табл.2: S_1 – площадь на исходном образце; S_2 – на образце с покрытием. Соотношение S_1/S_2 показывает, что износостойкость обработанного образца увеличилась более чем на 2 порядка при температуре 25 и 325°C и более чем на порядок при температу-

ре 125 и 225°C. Кроме того, такого типа покрытие состава нержавеющей стали выполняет антикоррозионные, антиэлектроэрозионные и термобарьерные функции. Совокупность приобретённых свойств позволяет повысить рабочие параметры деталей и конструктивных элементов из алюминиевых сплавов, в частности рабочей поверхности поршней двигателей внутреннего сгорания.

Выводы

1. Установлены общие закономерности электроэрозионного износа поверхности ускорительного канала КМПУ, которые определяются как энергетическими характеристиками, так и газодинамическими закономерностями гиперзвуковых струйных течений в цилиндрическом канале.

2. Интегральное значение эродированной с поверхности УК массы возрастает с увеличением подведённой к ускорителю энергии и связано с ней квадратичной зависимостью.

3. Показана возможность нанесения функциональных покрытий состава нержавеющей стали на поверхность изделий из различных металлов (сталь, медь, алюминиевые сплавы и др.) со сверхглубокой модификацией поверхностных слоёв.

Список литературы

1. Сивков А.А., Корольков Л.В., Сайгаш А.С. Нанесение медного покрытия на алюминиевые контактные поверхности с помощью магнитоплазменного ускорителя // *Электротехника*. 2003. № 3. С. 41–46.

2. Сивков А.А., Ильин А.П., Громов А.М., Бычин Н.В. Сверхглубокое проникание вещества высокоскоростного плазменного потока в металлическую преграду // *Физика и химия обработки материалов*. 2003. № 1. С. 42–48.

3. Лебедев А.Д., Малевинский К.В. Влияние структуры электродного материала на динамику плазменного поршня и эрозионные процессы // *Материалы I Всесоюзного семинара по динамике сильноточного дугового разряда в магнитном поле*. Новосибирск, 10-13 апреля 1990. Институт теплофизики СО АН СССР, 1990. С. 190–187.

4. Анисимов А.Г., Губарева Н.В., Мали В.И. и др. Взаимодействие плазменного сгустка с поверхностью электродов // *Материалы I Всесоюзного семинара по ди-*

намике сильноточного дугового разряда в магнитном поле. Новосибирск, 10-13 апреля 1990. С. 195–207.

5. Пирумов У.Г., Росляков Г.С. Газовая динамика сопел. М.: Наука, 1990.

6. Гречихин Л.И., Минько Л.Я. Получение и исследование ударных волн и сверхзвуковых плазменных потоков в разрядной ударной трубе // *ЖТФ*. 1965. Т. XXXV, вып. 8. С. 1454–1460.

7. Бужинский О.И., Волков Л.П. Исследование ударных волн, возбуждаемых в электромагнитной ударной трубе // *ЖТФ*. 1975. Т. XLII, вып. 8. С. 1733–1739.

8. Железный В.В., Жуков М.Ф., Лебедев А.Д., Плеханов А.В. Влияние начальной динамики формирования плазменного проводника на эффективность работы электродинамического ускорителя // *ЖТФ*. 1992. Т. 62, вып.3. С. 126–136.

9. Лебедев А.Д., Назарчук В.И., Плюшкин А.П., Щербик Н.М. Экспериментальные исследования движения сильноточного дугового разряда в поперечном магнитном поле // *Изв. СО АН СССР. Серия техн. наук*. 1989. Вып. 6. С. 76–81.

10. Лебедев А.Д., Урюков Б.А. Импульсные ускорители плазмы высокого давления. Новосибирск: Институт теплофизики СО АН СССР. 1990.

11. Кухтецкий С.В., Лебедев А.Д., Любочко В.А. Движение сильноточного разряда в плотном газе // *Теплофизика высоких температур*. 1985. Т. 23, №3. С. 422–429.

12. Арцимович Л.А., Лукьянов С. Ю., Подгорный И.М., Чуватин С.А. Электродинамическое ускорение сгустков плазмы // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 1957. Т. 33, вып 1(7). С. 3–8.

13. *Материалы I Всесоюзного семинара по динамике сильноточного дугового разряда в магнитном поле*. Новосибирск, 10–13 апреля 1990. Институт теплофизики СО АН СССР. 1990.

Сивков Александр Анатольевич – старший научный сотрудник Государственного научного учреждения НИИ высоких напряжений при Томском политехническом университете, канд. техн. наук. Окончил электрофизический факультет Томского политехнического института в 1975 г. Защитил диссертацию по теме "Взрывная коммутация и электромагнитное ускорение масс" в 2002 г.

Герасимов Дмитрий Юрьевич – работает в Государственном научном учреждении НИИ высоких напряжений при Томском политехническом университете. Окончил факультет автоматизации и электроэнергетики Томского политехнического университета в 2002 г.

Цыбина Анастасия Сергеевна – работает в Государственном научном учреждении НИИ высоких напряжений при Томском политехническом университете.

Массогабаритные показатели электрорадиаторов трансформаторного типа

РАЗМЫСЛОВ В.А., СЕРИКОВ А.В., ГЕРАСИМЕНКО Т.В.

Рассмотрены особенности конструкции и преимущества электроотопительных устройств трансформаторного типа. Приведены результаты расчёта электрорадиаторов трансформаторного типа мощностью 0,5–2 кВт. Дан сравнительный анализ массогабаритных показателей.

Проблемы безопасности и надёжности бытовых электроотопительных приборов для дополнительного обогрева являются актуальными. Традиционные нагревательные элементы, используемые в этих устройствах, обладают рядом недостатков, ограничивающих срок службы и уменьшающих безопасность эксплуатации приборов.

Разрабатываемые в настоящее время электроотопительные устройства трансформаторного типа [1] выгодно отличаются от традиционных высоким уровнем электро- и пожаробезопасности, обладают малой тепловой инерцией и большим сроком службы. Электроотопительные устройства трансформаторного типа по принятой в мире классификации следует отнести к электрорадиаторам.

Целью работы является сравнение массогабаритных показателей электрорадиаторов традиционных конструкций и радиаторов трансформаторного типа, обоснование целесообразности производства таких устройств.

Электрорадиаторы – это электроотопительные приборы, которые отдают тепло в обогреваемое помещение как конвекцией, так и тепловым излучением. В настоящее время применяются электрорадиаторы двух типов: с промежуточным теплоносителем (маслонаполненные) и без промежуточного теплоносителя (сухие). Маслонаполненные электрорадиаторы являются пожароопасными из-за возможности разгерметизации и вытекания масла. Кроме того, они обладают большой тепловой инерцией, время выхода на установившийся тепловой режим у них составляет 25–30 мин. Сухие электрорадиаторы имеют высокую температуру нагревательного элемента, поскольку он размещается внутри электрической изоляции с низкой теплопроводностью. Этот фактор ограничивает срок службы сухих электрорадиаторов.

Here particulars of the construction and advantages of radiators of a transformer type are considered. There are some results of calculation of radiators of a transformer type with capacity 0,5–2 kilowatt. A comparative analysis of mass and overall coefficients is given here.

Электрорадиатор трансформаторного типа представляет собой однофазный трансформатор с короткозамкнутым вторичным контуром [1]. Он имеет индуктор, состоящий из первичной (сетевой) обмотки, и замкнутый шихтованный сердечник. Индуктор может выполняться тороидальным и двухстержневым (ленточным или пластинчатым с шихтованными стыками). Вторичный контур, в котором выделяется большая часть тепла (96–98%), не имеет электрической изоляции и обладает развитой поверхностью для улучшения теплоотдачи и уменьшения его температуры. Для избежания возгонки пыли температура вторичного контура не должны превышать 85–95°C. Отсутствие теплового барьера в виде электрической изоляции между теплоотдающей поверхностью и окружающим воздухом обеспечивает высокую эффективность теплоотдачи. Средний коэффициент теплоотдачи от вторичного контура составляет около 7 Вт/(м²·°C). Электромагнитный потенциал вторичного контура очень низкий и не представляет опасности поражения электрическим током при прикосновении к нему. ЭДС вторичного контура составляет всего 0,3–0,7 В. По электромагнитным и технологическим условиям вторичный контур целесообразно выполнять из листов деформируемых сплавов алюминия толщиной 1–2 мм. Для уменьшения габаритных размеров листы гофрируются. Эти гофрированные листы одновременно выполняют роль корпуса, закрывая индуктор. В электрическом отношении листы путём сварки замыкаются алюминиевым стержнем, проходящим через окно индуктора. При использовании тороидального индуктора стержень имеет круглое сечение, при использовании стержневого индуктора замыкающий стержень выполняется из прямоугольной шины. Гофрирование корпуса может быть двухсторонним, когда листы

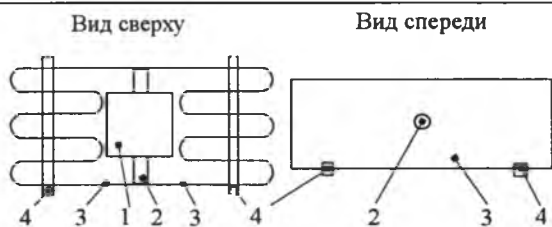


Рис.1. Электрорадиатор с продольным гофрированием листов и двухсторонним расположением тепловыделяющего вторичного контура:

1 – индуктор; 2 – стержень; 3 – вторичный тепловыделяющий контур; 4 – опоры

располагают по обе стороны от индуктора (рис.1) или односторонним, когда листы располагаются по одну сторону от индуктора (рис.2).

Разработанная методика расчёта электрорадиатора трансформаторного типа учитывает особенности конструкции, работы и эксплуатации таких устройств. Она включает в себя расчёт индуктора и расчёт вторичного одновиткового короткозамкнутого контура, в котором выделяется основная доля тепла, идущего на обогрев отапливаемого помещения. Расчёт индуктора выполняется по традиционной методике с использованием рекомендаций, приведённых в [2, 3]. Особенностью расчёта вторичного электрического контура является определение его геометрических размеров, которые должны обеспечить необходимое активное сопротивление, соответствующее заданной мощности. С другой стороны, вторичный контур должен иметь развитую поверхность для ограничения температуры на поверхности. Для проверки правильности выбора электромагнитных нагрузок и размеров выполняется тепловой расчёт на основе тепловых схем замещения [4].

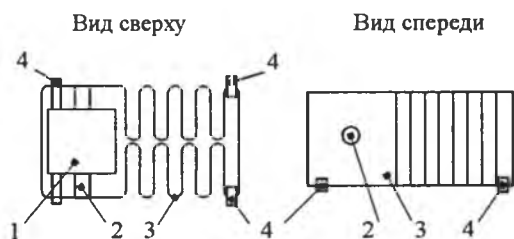


Рис.2. Электрорадиатор с поперечным гофрированием листов и односторонним расположением вторичного тепловыделяющего контура:

1–4 – то же, что и на рис.1

В данной работе приведены результаты расчёта электрорадиаторов трансформаторного типа мощностью 0,5–2 кВт на напряжение 220 В частоты 50 Гц. Индуктор тороидальный, первичная обмотка выполнена из медного эмалированного провода марки ПЭТВ, сердечник – из электротехнической стали 3405 толщиной листа 0,3 мм. Индуктор имеет пластмассовый кожух. Вторичный контур выполнен из листа алюминиевого сплава марки АМг5М толщиной 1,5 мм. Замыкающий стержень круглого сечения из алюминия марки АД0. Корпус (вторичный контур) двухсторонний с продольными гофрами. Число гофров на одну сторону при мощности 0,5 кВт 3, при больших мощностях – 4. Магнитная индукция в сердечнике принята равной 1,7 Тл. Плотность тока в первичной обмотке (A/mm^2)

$$I = 2,5 + \frac{800}{P}, \quad (1)$$

где P – мощность прибора, Вт.

Температура корпуса при температуре окружающего воздуха $20^\circ C$ не превышает $85^\circ C$. Коэффициент мощности приборов $\cos\phi \leq 0,99$, что было подтверждено и испытаниями опытных образцов. Число витков первичной обмотки определялось по условию наименьшей стоимости обмоточного провода и электротехнической стали. Для этого была выполнена серия расчётов для каждой мощности прибора при разных числах витков первичной обмотки. С целью снижения вторичного тока и уменьшения сечения замыкающего стержня вторичного контура число витков обмотки было взято несколько меньше оптимальных значений. Следует заметить, что масса листов вторичного контура не зависит от числа витков первичной обмотки и оптимизации не подлежит, она определяется только мощностью прибора и принятой толщиной листа. Толщина листа была выбрана по условию механической прочности.

Некоторые технические данные электрорадиаторов трансформаторного типа приведены в табл.1. В табл.2 для сравнения приведены массогабаритные показатели некоторых выпускаемых в настоящее время маслonaполненных и сухих электрорадиаторов [5].

Расчёты показали, что электрорадиаторы трансформаторного типа имеют примерно на 50% меньше удельную массу, чем маслonaполненные, и незначительно тяжелее сухих. Габа-

Технические данные электрорадиаторов трансформаторного типа

Параметр	Мощность, кВт					
	0,5	0,8	1,0	1,25	1,5	2,0
Число витков первичной обмотки	700	560	460	358	360	310
ЭДС вторичного контура, В	0,302	0,380	0,465	0,600	0,614	0,695
Масса обмоточного провода, кг	0,55	0,86	0,96	1,07	1,37	1,80
Масса сердечника, кг	1,53	2,06	2,63	3,47	4,02	4,75
Масса вторичного контура, кг	2,49	3,84	4,79	5,90	7,13	9,50
Масса электрорадиатора, кг	6,0	8,4	10,0	12,1	14,4	18,1
Удельная масса прибора, кг/кВт	12,0	10,5	10,0	9,7	9,6	9,1

Таблица 2

Массогабаритные показатели электрорадиаторов

Тип электрорадиатора	Мощность, кВт	Масса, кг	Удельная масса, кг/кВт	Габаритные размеры, длина × высота × ширина, мм
Трансформаторного типа	0,5	6,0	12	520×251×86
	0,8	8,4	10,5	520×306×91
	1,0	10,0	10	615×312×99
	1,25	12,1	9,7	770×304×104
	1,50	14,4	9,6	796×347×106
	2,00	18,1	9,1	890×400×112
Маслонаполненный «Термо-1», СНГ	0,5	9,0	18	670×540×200
Маслонаполненный «Термо-2», СНГ	0,8	13,0	16,25	850×590×200
Маслонаполненный «Термо-3», СНГ	1,25	18,5	14,8	1250×650×200
Сухой «Беллинг», Англия	1,0	8,0	8,0	840×600×128
Сухой АСЕС, тип V, Бельгия	0,12	3,0	10	320×260×100

риты радиаторов трансформаторного типа меньше, чем традиционных устройств.

Таким образом, проведённые расчёты показывают целесообразность производства электрорадиаторов трансформаторного типа.

Список литературы

1. Кузьмин В.М. Электронагревательные устройства трансформаторного типа. Владивосток: Дальнаука, 2001.
2. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов: Учеб. пособие для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1986.
3. Белопольский И.И., Каретникова Е.И., Пикалова Л.Г. Расчёт трансформаторов и дросселей малой мощности. М.: Энергия, 1973.
4. Сипайлов Г.А., Санников Д.И., Жадан В.А. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчёты в электрических машинах: Учеб. для вузов. М.: Высш. шк., 1989.
5. Привалов С.Ф. Электробытовые устройства и приборы. СПб.: Лениздат, 1994.

Размыслов Валерьян Александрович – доцент кафедры "Электромеханика" ГОУВПО "Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет", канд. техн. наук. В 1977 г. окончил электромеханический факультет Ленинградского политехнического института. В 1982 г. защитил диссертацию по теме "Расчёт и анализ электромагнитных полей в элементах ротора турбогенератора".

Сериков Александр Владимирович – доцент кафедры "Электромеханика" ГОУВПО "Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет", канд. техн. наук. В 1991 г. окончил электротехнический факультет Комсомольского-на-Амуре политехнического института. В 1997 г. защитил диссертацию по теме "Трансформаторы для установок электронагрева".

Герасименко Татьяна Владимировна – работает на кафедре "Электромеханика" ГОУВПО "Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет". В 1997 г. окончила электротехнический факультет Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета.

Тепловые процессы в герметизированном свинцовом аккумуляторе

БАЮНОВ В.В., ПОДАЛИНСКИЙ Ю.А., КРИВЧЕНКО Г.В.

ОАО "НИАИ "Источник", г. Санкт-Петербург

Рассмотрено влияние тепловыделений, происходящих при разряде герметизированного свинцового аккумулятора малой ёмкости, на изменение его температуры в зависимости от условий разряда.

В последнее десятилетие характерной особенностью развития герметизированных свинцовых аккумуляторов ГСА является увеличение их номинальной ёмкости выше 3000 А·ч. Интенсивность электрохимических процессов во время разрядов различными режимами существенно меняется. В настоящей работе проводится количественная оценка теплового режима работы электродов герметизированного свинцового аккумулятора.

Во время разряда свинцовый аккумулятор поглощает тепловую энергию и обращает её в полезную работу. В связи с этим происходит понижение температуры аккумулятора. Обратимая теплота в свинцовом аккумуляторе возникает в связи с протеканием электрохимических реакций и определяется из уравнения Гиббса-Гельмгольца:

$$E - TdE/dT = 4,183 \Delta H/ZF, \quad (1)$$

где E – ЭДС; T – абсолютная температура; dE/dT – температурный коэффициент ЭДС; ΔH – изменение энтальпии; F – константа Фарадея.

В процессе разряда аккумулятора тепловые явления изменяются в связи с изменением составляющих внутреннего электрического сопротивления и изменением режима разряда.

При расчёте было принято, что всё тепловыделение идёт на нагрев (охлаждение) аккумулятора, а в окружающую среду тепло не выделяется.

Тепловыделение в единицу времени – тепловой поток P аккумулятора складывается из теплового потока P_a на активных составляющих электрического сопротивления R_a (токоотводы, активная масса, электролит с сепарацией, контакт между активной массой и токоотводом), теплового потока P_n на сопротивлениях поляризации R_n и обратимой теплоты основного процесса q :

$$P = P_a + P_n - q = P_R - q, \quad (2)$$

где $P_R = P_a + P_n$.

Составляющие теплового потока, как известно, определяются по зависимостям:

$$q = IT \frac{dE}{dT}; \quad (3)$$

$$P_a = I^2 R_a; P_n = I^2 R_n; P_R = I^2 (R_a + R_n), \quad (4)$$

где I – ток, А.

Составляющие сопротивлений R_a и R_n определены расчётным путём с использованием экспериментальных данных.

Суммарные тепловыделения за весь разряд Q (Дж) или за часть продолжительности разряда τ_p определяются по зависимостям:

$$Q = Q_R - Q_q = d(\tau_p), \quad (5)$$

где $Q_R = Q_a + Q_n$; $Q_a = P_a \tau_p = I^2 R_a \tau_p$; $Q_n = P_n \tau_p = I^2 R_n \tau_p$; $Q_q = q \tau_p = IT \frac{dE}{dT} \tau_p$.

Теплоёмкость герметизированного свинцового аккумулятора СГ-6 (С, Дж/К, Дж/°С) рассчитана по удельной теплоёмкости материалов и деталей, входящих в аккумулятор (С, Дж/кг·К) и их массам.

Используя данные, полученные по зависимостям (5), и значения теплоёмкости аккумулятора СГ-6, находим зависимости изменения температуры аккумулятора Δt (°С) от длительности разряда τ_p , вызванные суммарным тепловыделением Q (Δt) и Q_R (Δt_R) и обратимой теплотой Q_q (Δt_q):

$$\Delta t(\tau_p) = \Delta t_R(\tau_p) - \Delta t_q(\tau_p). \quad (6)$$

Расчёт тепловыделений проведён для герметизированного аккумулятора СГ-6 на режимах разряда 0,1С; 0,4С; 1С; 3С при температурах –10, 20, 45°С.

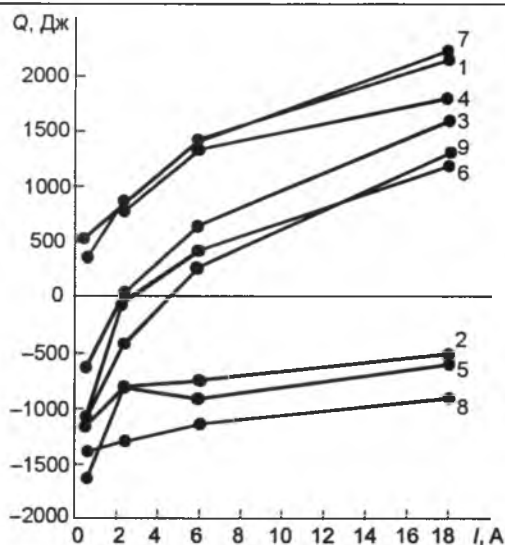


Рис.1. Изменение тепловыделений Q_R (1, 4, 7), Q_q (2, 5, 8), Q (3, 6, 9) в конце разряда в зависимости от тока разряда I (0,1С – 3С) и температуры аккумулятора -10°C (1, 2, 3), 20°C (4, 5, 6), 45°C (7, 8, 9)

Тепловыделение Q и его составляющие Q_R и Q_q в конце разряда токами 0,1–3С для температуры аккумулятора -10 , 20 , 45°C представлены на рис.1, а в процессе разряда токами 0,1С и 3С при температуре -10°C в зависимости от степени разряженности – на рис.2.

Как следует из приведенных данных, тепловыделения на активных составляющих сопротивления Q_R в течение разряда при температурах -10°C и 45°C имеют близкие значения. Данное обстоятельство связано с тем, что с повышением температуры тепловыделения на активных сопротивлениях увеличиваются, а тепловыделения, вызванные сопротивлениями электролита и поляризации, уменьшаются, при понижении температуры – наоборот.

Обратимая теплота Q_q возрастает с увеличением температуры аккумулятора с -10°C до 45°C на разрядах током ОДС и 3С на 18 и 37% соответственно. С увеличением тока разряда от 0,1 до 3С при температурах -10 и 45°C Q_q уменьшается на 53 и 33 % соответственно (рис.1).

Отношение тепловыделений $Q_R:Q:Q_q$ при разряде током 0,1С и температурах -10 , 45°C составляет 1 : 2,2 : 1,2 и 1 : 3,7 : 3,0 соответственно, а при разряде током 3С 1 : 0,26 : 0,74 и 1 : 0,42 : 0,58 соответственно. Тепловыделение Q_R с повышением тока разряда с 0,1С до 3С возрастает при температурах -10 и 45°C в 4,0 и 6,7 раза соответственно.

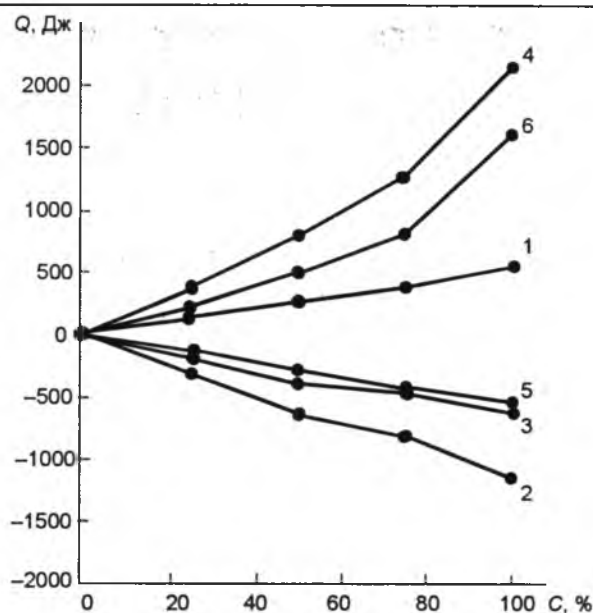


Рис.2. Изменение тепловыделений Q_R (1, 4), Q_q (2, 5), Q (3, 6) в зависимости от степени разряженности аккумулятора токами 0,1С (1, 2, 3) и 3С (4, 5, 6) при температуре -10°C

Суммарные тепловыделения Q свидетельствуют о том, что при разрядах токами менее 0,4С при температурах -10 и 45°C происходит поглощение тепла, а при разрядах большими токами происходит выделение тепла в аккумуляторе.

За счёт обратимой теплоты Q_q , за время разряда токами 0,1С; 1С; 3С температура аккумулятора снижается при температуре -10°C на 2,9; 1,9; 1,4 $^\circ\text{C}$ соответственно, а при температуре 45°C – соответственно на 3,5; 2,9; 2,3 $^\circ\text{C}$.

Суммарные тепловыделения Q при разряде током 0,1С и температурах -10 , 20 , 45°C понижают температуру аккумулятора на 1,58; 2,73; 2,62 $^\circ\text{C}$ соответственно, а при токе разряда 3С температура аккумулятора повышается на 4,0; 2,92; 3,23 $^\circ\text{C}$ соответственно (рис.3). Изменение температуры аккумулятора в зависимости от степени разряженности, режима разряда и температуры представлены на рис.4. Приведённые данные свидетельствуют о том, что при разряженности аккумулятора от 25 до 75 % происходит равномерное повышение его температуры при токе 3С и понижение – при токах 0,1С и 0,4С. При разряженности более 75 % и токах 0,4С; 1С и 3С происходит более резкое изменение температуры аккумулятора в сторону повышения в связи с увеличением со-

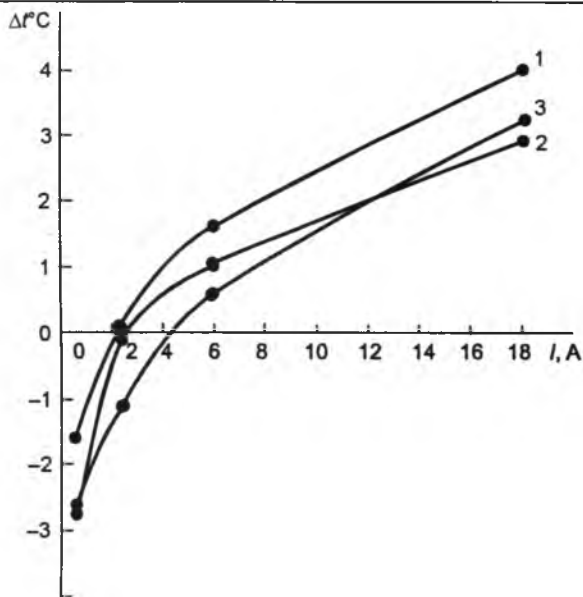


Рис.3. Изменение температуры аккумулятора Δt в конце режима разряда (0,1С–3С) в зависимости от тока разряда и температуры аккумулятора:

1 – (-10 °С); 2 – +20 °С; 3 – +45 °С

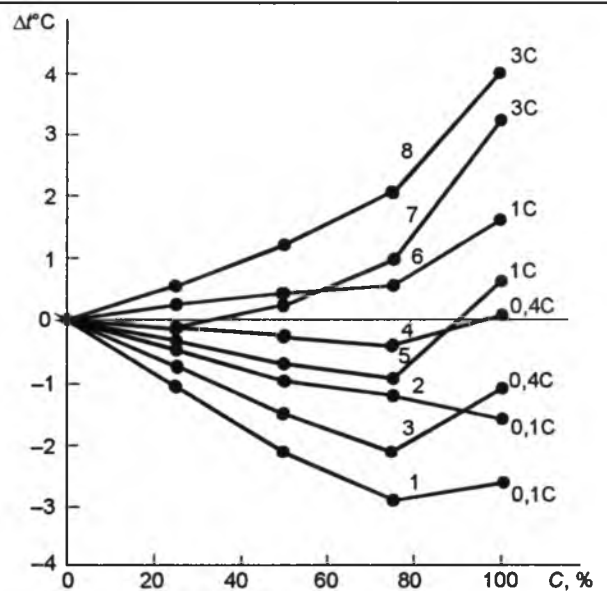


Рис.4. Изменение температуры аккумулятора Δt в зависимости от степени разряженности С режима разряда (1, 2 – 0,1С; 3, 4 – 0,4С; 5, 6 – 1С; 7, 8 – 3С) и температуры (1, 3, 5, 7 – 45 °С; 2, 4, 6, 8 – (-10 °С))

противления электролита и сопротивления поляризации.

С увеличением ёмкости в герметизированных свинцовых аккумуляторах тепловыделения будут возрастать более интенсивно по сравнению с ростом шумопоглощения. Поэтому влияние обратимой теплоты на снижение температуры аккумулятора будет меньше и охлаждение будет заметно лишь при более длительных режимах разряда. Это следует из имеющихся данных по определению тепловыделений в свинцовом аккумуляторе большой энергии, в котором охлаждение наблюдается только на 25- и 50-часовых режимах разряда.

Выводы.

1. Расчётным путём с использованием экспериментальных данных показано влияние тепловыделений, происходящих в герметизированном свинцовом аккумуляторе во время разрядов различными токами (0,1–3С) А в диапазоне температур от -10 до 45 °С, на изменение температуры аккумуляторов малой ёмкости.

2. Показано, что суммарные тепловыделения при разрядах токами менее 0,4С и температурах от -10 до 45 °С вызывают охлаждение аккумулятора, а при разрядах большими токами от 0,4С до 3С происходит нагрев аккумулятора.

Измерение параметров сходящихся пучков электронов устройством вращающегося цилиндра Фарадея

НАРХИНОВ В.П., ЦЫРЕНЖАПОВ Б.Б.

Разработаны методы измерения азимутального распределения тока и структурного анализа 28 электронных пучков ленточного типа, сходящихся под углом $12,8^\circ$ вдоль радиальных линий транспортировки около 77,5 мм в кольцевом плазменном эмиттере. Информация, полученная при помощи измерительных устройств, вращающегося цилиндра Фарадея в коаксиальной системе, приближает решение задачи определения токовых параметров на любом участке сходимости.

Конструктивное решение плазменного источника электронов с радиальным извлечением при выполнении условий формирования эмиссионной поверхности достаточно подробно описано в [1]. Наряду с экспериментальными исследованиями [2–4] встаёт вопрос о функциональной способности источника в условиях реальной электронно-лучевой технологии, в частности, термообработки наружной поверхности изделий цилиндрической формы.

Регулируемая эмиссионная щель в источнике позволяет получать сходящиеся электронные пучки с плотностями мощности $10\text{--}10^4$ Вт/см² на коллекторах различного диаметра. В источниках подобного типа возможно проводить термообработку изделий диаметром 140–150 мм короткофокусными пучками без ускоряющего электрода, поскольку в этом случае на изделие подается высоковольтный потенциал.

На рис.1 приведена зависимость тока электронного пучка от ускоряющего напряжения в промежутке извлечения 2 мм и автограф электронных пучков на Al-фольге, полученный без ускоряющего электрода в кольцевом зазоре извлечения 7,5 мм, при толщине сходящихся ленточных пучков около 1,0 мм.

Для оценки азимутального распределения тока сходящихся ленточных пучков электро-

Methods of measurement of azimuthal distribution of a current and the structural analysis 28 electronic bunches (beams) of tape type of $12,8$ degrees converging under a corner along radial lines of transportation $\sim 77,5$ mm in the ring plasma emitter are developed. The information received by means of measuring devices, rotating cylinder Faradeja in coaxial system, approaches the decision of a problem(task) of definition toковых parameters on any site of convergence.

нов вместо Al-фольги устанавливался перфорированный отверстиями стальной электрод, внутри которого вращался цилиндр Фа-

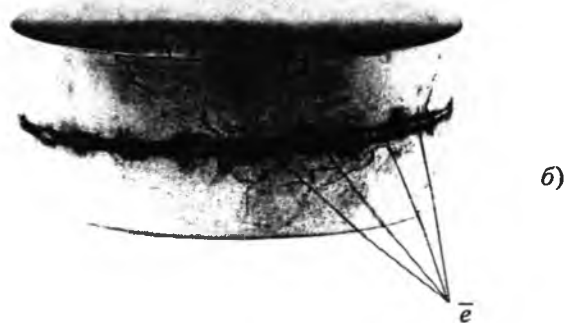
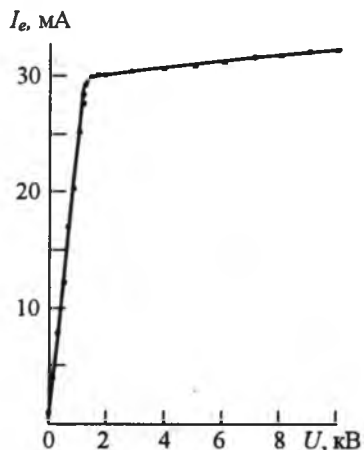


Рис.1. Зависимость тока электронного пучка от ускоряющего напряжения, извлечённого с помощью электрода специальной формы, (а) и автограф электронных пучков на коллекторе из Al- фольги (б)

радея, последовательно фиксируя рассеченные пучки при стабильном режиме работы источника. Эксперименты [3, 4] показали, что при разных сечениях пучка (15–40 мм²) они азимутально однородны ($\pm 0,05$). В [3, 4] даны рекомендации по дальнейшему совершенствованию метода вращающегося цилиндра Фарадея в коаксиальной системе источника.

Основные характеристики и параметры пучков определяют их целевую применимость. Экспериментальное исследование пучков в многоэмиттерных лучевых системах представляет определённую сложность, поскольку требует достоверную информацию о параметрах каждого потока в отдельности, чтобы характеризовать сходящийся пучок в целом.

Следует отметить, что как по условиям эксперимента, так и по степени проработки вопроса данная работа существенно отличается от общеизвестных методов анализа электронных пучков [5–8]. Поэтому используем основную часть апробированного устройства [3, 4] в настоящем эксперименте, целью которого является измерение щелевого тока в 28 азимутально-однородных потоках и построение экспериментальной зависимости $i(x)$ с дальнейшим расчётом плотности тока приближённым методом [5] и получения j -кривой.

Техника и методика измерений

Рис.2 иллюстрирует схему эксперимента, сущность которого в общих чертах, заключается в следующем.

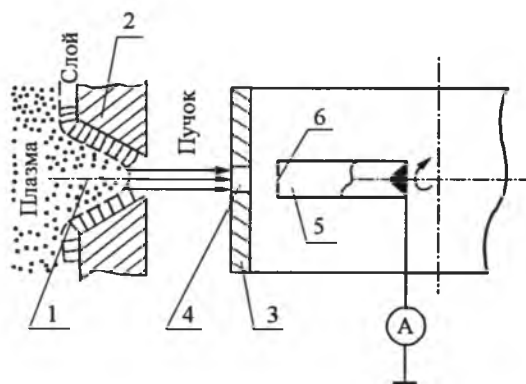


Рис.2. Схема эксперимента:

1 – эмиссионный канал; 2 – ферромагнитные анодные вставки; 3 – коллекторный электрод; 4 – отверстия; 5 – цилиндр Фарадея; 6 – входная щель

Вместо извлекающего электрода устанавливается кольцевой коллектор с отверстиями, т.е. на пути короткофокусных потоков электронов оказывается неподвижный коллектор, вырезающий из центральной части ленточных ускоренных потоков пучки с круговым поперечным сечением, которые в дальнейшем исследуются.

Эмитирующая плазма формируется в эмиссионном канале 1, образованном анодными ферромагнитными вставками 2. Геометрическая форма эмиссионного канала позволяет стабилизировать плазменную поверхность за счёт одновременного уменьшения толщины прианодного слоя пространственного заряда и сечения сужающего канала в плоскости расположения эмиссионной поверхности в случае изменения разрядного тока [9].

Коаксиально эмиттерному аноду установлен стальной коллекторный электрод 3 с 28 отверстиями 4 диаметром 4 мм. Внутри коллектора 3 монтируется устройство вращающегося цилиндра Фарадея 5 с входной щелью 6, длина которой равна диаметру цилиндра, т.е. 6 мм, а ширина 0,5 мм. Таким образом, подвижная щель 6 в молибденовой пластинке совмещается непосредственно с регистрирующим преобразователем прямого действия, а движение щели 6 поперёк исследуемых пучков осуществляется за счёт поворота цилиндра Фарадея 5 на валу микродвигателя с частотой вращения $n = 0,2$ об/мин. При малом радиусе кривизны перемещение цилиндра Фарадея по дуге практически не будет отличаться от прямолинейного. Соосность системы (внутренний диаметр источника электронов 155 мм, наружный диаметр коллекторного электрода 140 мм, длина цилиндра Фарадея 65 мм) соблюдалась выполнением проточек и отбортовок в элементах экспериментального устройства. По горизонтали эмиссионная щель с выходным окном 5 мм, отверстия в коллекторе диаметром 4 мм, цилиндр Фарадея диаметром 6 мм центровались.

Щелевой ток измерялся прибором В7-40/5 в цепи цилиндра Фарадея по диаметру пучка 4 мм током 0,2 мА при ускоряющем потенциале на коллекторе до 6 кВ. Статистическая обработка результатов измерений щелевого тока в пределах допускаемых значений

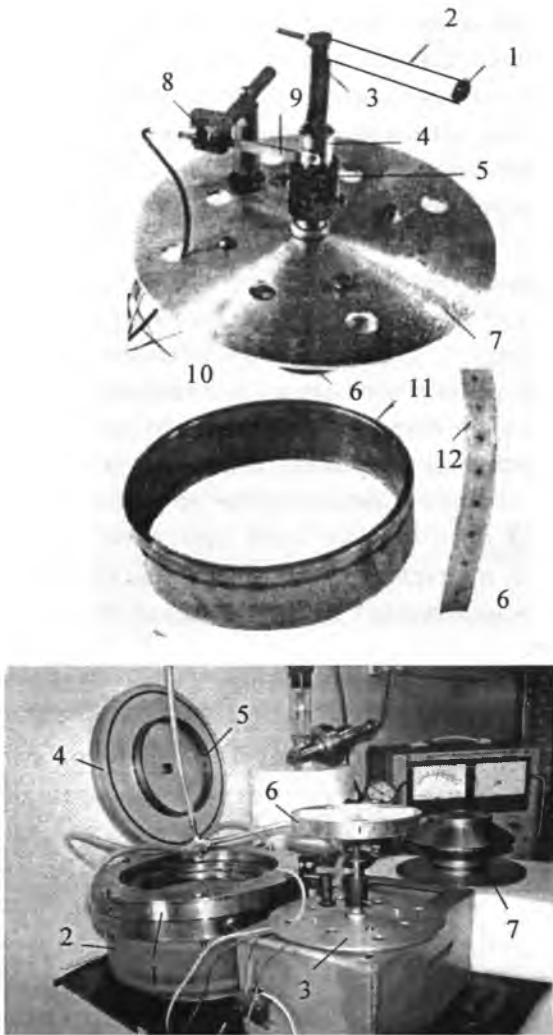


Рис.3. Общий вид установки:

a – основные элементы (1 – цилиндр Фарадея, 2 – изолирующий кожух, 3 – держатель диэлектрический, 4 – медная втулка, 5 – переходник диэлектрический, 6 – электродвигатель, 7 – монтажный столик, 8 – держатель прижимной клеммы, 9 – клемма скользящего контакта, 10 – провода, 11 – коллекторный электрод, 12 – автограф рассечённых пучков на защитном экране); *б* – конструктивные узлы эксперимента (1 – электронный источник, 2 – проходной опорный изолятор, 3 – устройство вращающегося цилиндра Фарадея, 4 – вакуумно-плотная технологическая крышка, 5 – коллекторный электрод, 6 – защитный экран, 7 – ускоряющий электрод с регулируемым входным окном)

основной погрешности показала относительную однородность в восьми симметричных щелевых зонах исследуемых 28 пучков не хуже $\pm 0,1$ за один цикл измерений каждого пучка в течении 10,7 с.

На рис.3 представлена фотография общего вида экспериментальной установки.

Электронный источник 1 через проходной опорный изолятор 2 соединялся с вакуумной камерой. Устройство вращающегося цилиндра Фарадея 3 устанавливалось в проточку опорного изолятора 2. В свою очередь, технологическая крышка 4 с укрепленным в ней коллекторным электродом 5 вакуумировала источник электронов 1 при откачке вакуумной системой. Электрическая связь цепей цилиндра Фарадея и питания микродвигателя осуществлялась через вакуумный разъем в камере. При вращении цилиндра Фарадея сначала исследовался один пучок, остальные отсекались защитным экраном 6.

Анализ полученных результатов

По данным измерения щелевого тока построена зависимость щелевого тока от положения щели $i(x)$ (рис.4), которая может наглядно иллюстрировать, что в реальном пучке распределение плотности тока неравномерное.

Для нахождения функции радиального распределения плотности тока в пучке электронов воспользуемся выражением [5]

$$j(r) = -\frac{1}{\pi r} \frac{d}{dr} \int_0^{r_0} \frac{i(x) x dx}{r(x^2 - r^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (1)$$

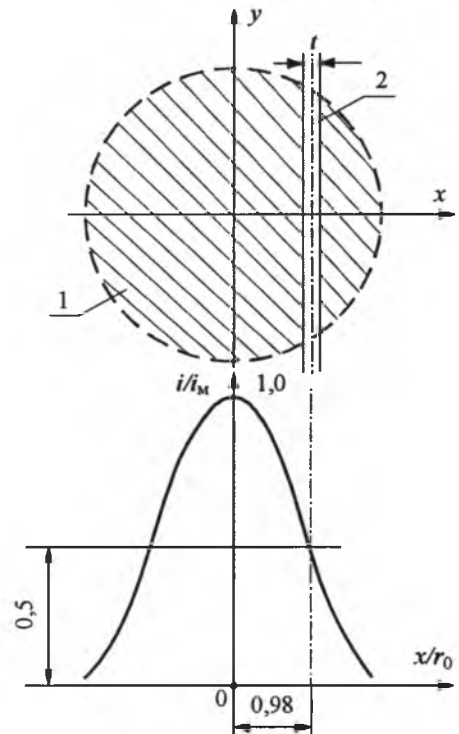


Рис.4. Зависимость щелевого тока от положения щели $i(x)$:

1 – сечение пучка; 2 – щель

Здесь $j(r)$ – плотность тока, как функция от некоторого текущего значения $r = \sqrt{x^2 + y^2}$; t – ширина подвижной щели; r_0 – радиус пучка; $i(x)$ – некоторая экспериментальная кривая, в нахождении которой и состоит основная задача.

Воспользуемся экспериментальными данными щелевых токов (мкА) в 8 кольцевых зонах по диаметру пучка 4 мм:

$i(1) \approx 0,25$; $i(2) \approx 0,38$; $i(3) \approx 0,39$; $i(4) \approx 0,5$;
 $i(5) \approx 0,5$; $i(6) \approx 0,39$; $i(7) \approx 0,38$; $i(8) \approx 0,25$.

Предположим, что общий вид кривой описывается уравнением:

$I(x) = g(-x^2 + b)$. Найдем коэффициенты g и b . Для этого составим систему уравнений:

$$0,5 = g(-0,25 + b); \quad 0,25 = g(-4 + b).$$

Решая систему уравнений, получаем: $g = 0,07$; $b = 7,75$. Значит $i(x) = 0,07(-x^2 + 7,75)$ для данного случая.

В итоге получается, что шесть точек из восьми хорошо ложатся на эту кривую. Фактический результат даёт возможность использовать полученную функцию для дальнейших расчётов.

Для начала подставим общий вид $I(x)$ в соотношение (1):

$$j(r) = -\frac{1}{\pi t r} \frac{d}{dr} \int_r^{r_0} \frac{g(-x^2 + b) x dx}{(x^2 - r^2)^{\frac{1}{2}}}.$$

После промежуточных вычислений, получаем:

$$j(r) = \frac{g}{\pi t} \left[\frac{r_0^2 - 2r^2 + b}{(r_0^2 - r^2)^{\frac{1}{2}}} \right]. \quad (2)$$

Соотношение для радиального распределения плотности тока получено, как уже говорилось выше, для многоэмиттерной системы. Подставляя в (2) соответствующие значения постоянных параметров, получим вид функции для данного частного случая такой системы.

Коэффициент g судя по всему имеет размерность плотности тока, т.е. $g = 0,07$ мкА/мм², а коэффициент b – размерность площади, $b = 7,75$ мм² при $r_0 = 2$ мм (радиус пучка), $t = 0,5$ мм (ширина щели).

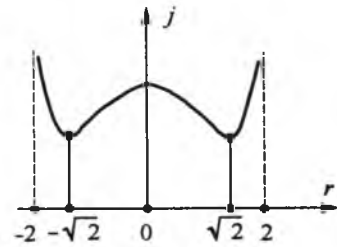


Рис.5. Расчётная j -кривая

В итоге после всех подстановок окончательное выражение для распределения плотности тока (мкА/мм²) имеет вид

$$j(r) = 0,1 \left[\frac{6 - r^2}{(4 - r^2)^{\frac{1}{2}}} \right].$$

Следует отметить, что расчёт выполнен приближённым методом, поскольку функция $i(x)$ – экспериментальная зависимость, построенная с ошибкой $\pm 0,1$ измеренных щелевых токов.

На рис.5 построена расчётная j -кривая. Видно, что функция симметрична относительно оси ординат и имеет бесконечный разрыв в точках -2 и 2 при точках минимума $\pm \sqrt{2}$. В центре пучков, т.е. на их оптической оси, центральный максимум плотности тока, далее плотность тока спадает, но с точек минимума она плавно начинает расти, при $r = 1,8$ мм она равна $0,317$ мкА/мм², что приблизительно равно её значению в центральном максимуме, в точке $r = 1,95$ мм $j = 0,5$ мкА/мм² и чем ближе она к краю пучка, тем круче она уходит вверх, асимптотически приближаясь к r_0 .

Выводы

1. Первые исследования многолучевой эмиттерной системы сходящихся неламинарных потоков электронов показали, что рост плотности тока на краях 28 радиально сходящихся пучков происходит за счёт кулоновского и магнитного взаимодействия пучков друг с другом. Это косвенно подтверждается зафиксированным экспериментально отпечатком на коллекторе и результатом приближённого расчета j -кривой. Разумеется, это не окончательный вывод, требуется более глубокое изучение сложных электронно-оптических явлений.

2. Для определения степени азимутальной и радиальной неоднородности по отработанной методике достаточно иметь набор коллекторных колец различного диаметра и цилиндр Фарадея с возможностью его горизонтального перемещения, например крепление на шпильке.

3. Совместное применение двух методов существенно расширяет возможности диагностики электронно-лучевых систем подобного типа.

Список литературы

1. Нархинов В.П., Семёнов А.П., Балханов В.К. Особенности формирования радиально сходящегося пучка электронов из плазмы отражательного разряда с полыми катодами и общим анодом в магнитном поле // *Электротехника*. 2003. № 10. С.55–59.

2. Семёнов А.П., Нархинов В.П. Плазменный источник электронов с радиально сходящимся пучком // *ПТЭ*. 1993. № 2. С. 131–136.

3. Нархинов В.П. Регистрация и измерение тока ленточных пучков электронов на фиксированном участке

сходящейся эмиттерной системы // *ЖТФ*. 2002. Т.72, вып.4. С.136–138.

4. Нархинов В.П. Метод вращающегося цилиндра Фарадея в диагностике радиально сходящихся пучков электронов // *ПТЭ*. 2002. № 5. С. 129–131.

5. Зинченко Н.С. Курс лекций по электронной оптике. Харьков: Изд-во Харьковского университета, 1961.

6. Алямовский И.В. Электронные пучки и электронные пушки. М.: Советское радио, 1966.

7. Москалёв В.А., Сергеев В.И., Шестаков В.Г. Измерение параметров пучков заряженных частиц. М.: Атомиздат, 1980.

8. Молоковский С.И., Сушков А.Д. Интенсивные электронные и ионные пучки. М.: Энергоатомиздат, 1991.

9. Завьялов М.А., Крейндель Ю.Е., Новиков А.А., Шантурин Л.П. Плазменные процессы в технологических электронных пушках. М.: Энергоатомиздат, 1989.

Нархинов Валерий Прокопьевич – старший научный сотрудник Отдела физических проблем при Бурятском научном центре СО РАН. Окончил электротехнический факультет Восточно-Сибирского технологического института в 1971 г. Кандидатскую диссертацию по теме “Генерирование радиально сходящегося пучка в источнике электронов на основе разряда с холодным катодом” защитил в Томском политехническом университете в 1993 г.

Секционирование сверхпроводящих токоограничивающих устройств

КОПЫЛОВ С.И.

Проанализировано влияние секционирования экранов, выполненных из сверхпроводящих колец, на регулирование магнитного потока устройств трансформаторного типа. Изложены основы теории сверхпроводящих переключателей магнитного потока и рассмотрены принципиальные схемы трансформаторного оборудования, в которых реализуется принцип коммутации магнитного потока.

Современные электроэнергетические системы характеризуются огромными масштабами, сложной структурой и динамическими явлениями. Для эффективного распределения электрической энергии, электроснабжения крупных нагрузочных узлов, обеспечения устойчивости, надёжности и живучести Единой энергетической системы необходимо, помимо создания сетей сверхвысокого напряжения, магистралей и вставок постоянного тока, создать коммутационное оборудование, обеспечивающее требуемое количество отключений токов КЗ и токов нагрузки. Ис-

There had been performed an analysis of the sectioning of electromagnetic screens built of superconducting rings on the magnetic flux regulation in the transformer type apparatus. Basic principles of the theory of superconducting magnetic flux switches are given and transformer circuits commuting the magnetic flux are considered. A circuit configuration of several superconducting rings is proposed what allows increasing the fault current ratio.

пользование нелинейных реакторов с экранами из низкотемпературных и высокотемпературных сверхпроводников позволяет повысить статическую и динамическую устойчивость, а также обеспечить управляемость работы генераторов и накопителей [1].

Основным недостатком сверхпроводящих статических индуктивных регулирующих устройств является высокая стоимость сверхпроводящих материалов. В связи с этим важное значение при разработке сверхпроводящих обмоток (часто называемых магнитными системами) приобретают вопросы выбо-

ра рациональной геометрии, обеспечивающей наименьший удельный расход сверхпроводника. Для достижения поставленной цели необходимо решить задачу увеличения кратности отключаемого тока за счёт снижения индуктивности рассеяния токоограничивающего устройства трансформаторного типа [2,3].

Известно, что полный магнитный поток, пронизывающий замкнутый безрезисторный контур, остаётся постоянным до тех пор, пока сопротивление контура равно нулю. При изменении существующего магнитного поля в таком контуре индуцируется ЭДС, создаётся ток и магнитный поток, в точности компенсирующий изменение магнитного потока исходного поля. Управление потокораспределением путём коммутации электромагнитных экранов может быть выполнено на основе замкнутых сверхпроводящих экранов, сопротивление которых меняется в результате разрушения сверхпроводимости.

Магнитная цепь на рис.1,а схематично представляет однофазный двухобмоточный трансформатор. Для магнитной системы по рис.1,а может быть предложена эквивалентная схема замещения магнитной цепи (рис.1,б) токов в первичной обмотке, питаемой от источника напряжения U_1 , создающего ток и магнитодвижущую силу (МДС) первичной обмотки F_1 .

Схема рис.1,б содержит три узла и три независимых контура, где магнитные сопротивления связаны с магнитными проводимостями: – рассеяния обеих обмоток Λ_{1S} и Λ_{2S} ; – участков магнитного сердечника Λ_1 , Λ_2 , Λ_{12} , Λ_8 и МДС обеих обмоток F_1 и F_2 .

МДС F_2 изменяется в зависимости от состояния сверхпроводящего кольца. Нормальным состоянием кольца принято считать, когда F_2 практически равна нулю, $r_k \rightarrow \infty$ (холостой ход), сверхпроводящим состоянием кольца – когда магнитный поток Φ практически равен нулю и потенциалы узлов (1) и (2) равны друг другу.

Магнитные потоки в схеме рис.1,б могут быть найдены методом контурных токов или узловых потенциалов. В последнем случае, если принять потенциал точки 3 за нуль, что всегда допустимо, достаточно решить только два уравнения для узлов (1) и (2).

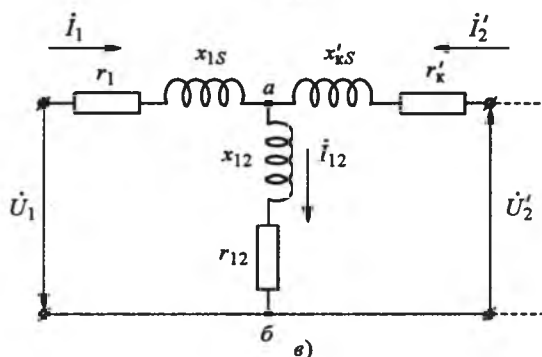
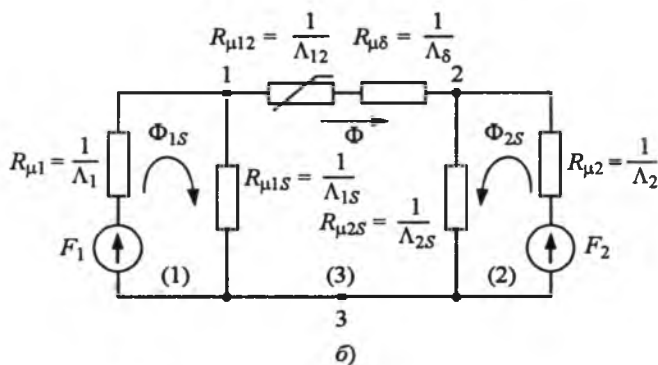
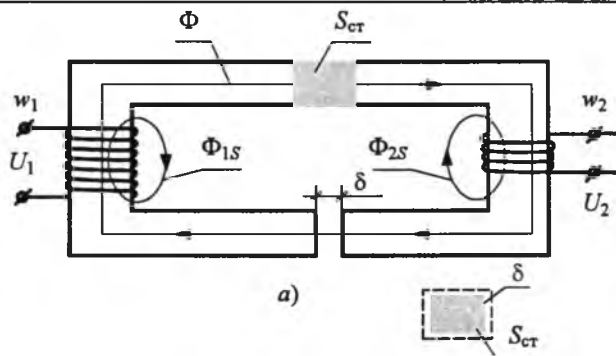


Рис.1. К расчёту магнитной цепи с воздушным зазором и электромагнитным (обмотка w_2) экраном: а – магнитная система; б – магнитная схема замещения; в – электрическая схема замещения

Анализ магнитных потоков по рис.1,б позволяет определить параметры рассеяния двух обмоток и взаимную индуктивность между ними с учётом насыщения. Все эти три индуктивных сопротивления будут рассчитаны с учётом зазора в сердечнике. По индуктивным сопротивлениям, вычисленным для мгновенных значений токов, можно составить электрическую схему замещения магнитной системы (рис.1,в) в случае питания первой обмотки током частоты сети f_1 . Воспользуемся приёмами, принятыми в теории трансформаторов, позволяющими воспроизвести магнитные потери в сердечнике

введением сопротивления r_{12} в намагничивающую ветвь ab (рис.1,в).

На рис.1,б,в представлены две схемы замещения, оперирующие с дискретными элементами сопротивлений. Первая (рис.1,б) позволяет рассчитать магнитные потоки ветвей схемы замещения, в том числе с учётом нелинейностей кривых намагничивания, а по ним – индуктивные сопротивления электрической схемы замещения (рис.1,в). Электрические величины по рис.1,в рассчитываются традиционным символическим методом для двух режимов. При нормальном состоянии кольца (материал кольца имеет близкое к бесконечности сопротивление, $\rho_k \rightarrow \infty$) приведённое напряжение U'_2 может быть принято равным ЭДС E'_2 . В режиме ХХ приведённые к первичной обмотке параметры кольца x'_{ks} и $r'_k \rightarrow \infty$ определяются при $w_k = 1$, т.е. число витков кольца принимается равным единице. При сверхпроводящем состоянии кольца магнитный поток взаимной индукции в контуре (3) (рис.1,б) практически исчезает и магнитная схема замещения по рис.1,б разделяется на два автономных контура (1) и (2).

В результате имеет место следующее соотношение для магнитных потоков:

$$\Phi_0 = \frac{x_{2s}}{r_k} \Phi_m, \quad (1)$$

где Φ_m – магнитный поток (кольцо в нормальном состоянии); Φ_0 – магнитный поток (кольцо в сверхпроводящем состоянии).

Следует отметить, что наличие зазора δ в сердечнике существенно уменьшает индуктивное сопротивление x_{12} (рис.1,в), которое приближённо рассчитывается по формуле

$$x_{12} = 2\pi f_1 w_1^2 \left(\frac{l_{ст}}{\mu_{ст} S_{ст}} + \frac{\delta}{\mu_0 [S_{ст} + (\Pi + 4\delta)\delta]} \right)^{-1} \quad (2)$$

В теории трансформаторов принято выделять вектор магнитного потока взаимной индукции, потоки же рассеяния воспроизводят через создаваемые ими ЭДС, так как эти потоки в значительной мере проходят по воздуху, имеющему весьма большое магнитное сопротивление. По этой причине индуктивные сопротивления рассеяния обеих обмоток, (т.е. намагничивающей первичной обмотки и вторичной обмотки (сверхпроводящего коль-

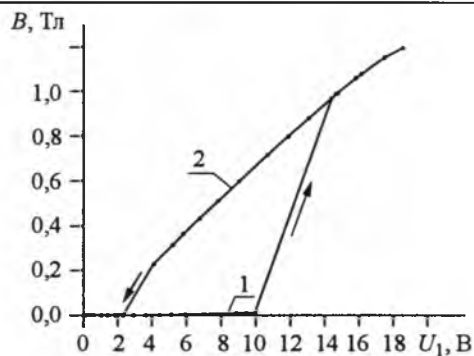


Рис.2. "Релейная" характеристика изменения индукции магнитного поля в магнитопроводе от питающего напряжения со сверхпроводящим экраном (кольцом)

ца)) считают постоянными, т.е. линейными в магнитном отношении.

На рис.2 показаны результаты измерения индукции магнитного поля в сердечнике для сверхпроводящего экрана, имеющего форму кольца. При нулевом сопротивлении экрана (экран находится в сверхпроводящем состоянии, кривая 1) поток намагничивающей катушки, проходящий через экран, полностью компенсируется потоком экрана. Если сверхпроводящий экран находится в нормальном состоянии (кривая 2), то магнитный поток от намагничивающей катушки полностью проходит через экран, что соответствует режиму ХХ.

Под секционированием сверхпроводящего экрана понимается разбиение его на несколько частей, связанных общим магнитным потоком. При этом количество используемого сверхпроводящего материала остаётся неизменным.

Для таких устройств наиболее удачной является конструкция трансформатора с симметрично чередующейся обмоткой. При этом индуктивность рассеяния слабо зависит от геометрических размеров колец и обмоток. Максимальное снижение индуктивности рассеяния достигается уже при числе групп, равным четырём.

На рис.3 показано снижение максимальной индукции магнитного поля сверхпроводящего экрана с увеличением количества экранов m для симметрично чередующейся обмотки. С увеличением количества сверхпроводящих экранов растёт их токнесущая способность, увеличивается глубина экраниро-

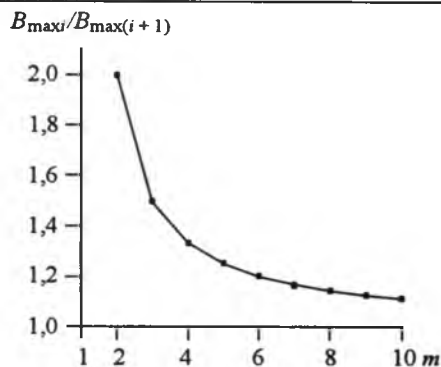


Рис.3. Максимальная индукция магнитного поля для симметрично чередующейся обмотки при различном числе экранов

вания, а также снижаются гистерезисные потери в сверхпроводящих экранах.

Рассмотрим экспериментальные данные, полученные в процессе изучения модели токоограничивающего устройства при различном числе сверхпроводящих колец.

Токоограничивающее устройство представляет собой трансформатор, через первичную рабочую обмотку которого протекает ограничиваемый ток, а вторичная обмотка замкнута накоротку и состоит из сверхпроводящих колец. В номинальном режиме работы импеданс токоограничивающего устройства является импедансом короткозамкнутого трансформатора и имеет низкое значение (линейный участок). При возникновении КЗ ток в первичной обмотке токоограничивающего устройства возрастает (рис.4), что

вызывает увеличение тока во вторичной обмотке, где происходит переход сверхпроводящих колец в нормальное состояние. При этом импеданс токоограничивающего устройства резко возрастает и принимает значение импеданса трансформатора в режиме ХХ (нижние кривые), за счёт чего и происходит ограничение тока КЗ в защищаемой цепи.

На рис.4 показано влияние количества сверхпроводящих колец на вольт-амперную характеристику токоограничивающего устройства. Здесь сравниваются два токоограничивающих устройства с симметричными чередующимися обмотками. На вставке рис.4 рассмотрены два случая:

а) обмотка – кольцо – обмотка (одна группа);

б) обмотка – кольцо – обмотка, обмотка – кольцо – обмотка (всего две группы).

Необходимо отметить, что размеры сверхпроводящих колец подобраны так, что количество сверхпроводящего материала в обоих случаях примерно одинаковое.

Из рис.4 видно, что изменение импеданса токоограничивающего устройства, имеющего обмотку, состоящую из одной группы, меньше (приблизительно в три раза), чем изменение импеданса устройства, имеющего обмотку, состоящую из двух групп чередующихся обмоток. Это является экспериментальным подтверждением увеличения кратности тока за счёт секционирования экрана [4].

Выводы

Исследовано влияние секционирования сверхпроводящих экранов на работу регулирующих устройств трансформаторного типа. Секционирование сверхпроводящего экрана приводит к снижению максимальной индукции магнитного поля. Это, в свою очередь, приводит к увеличению токонесущей способности и глубины экранирования, а также к снижению гистерезисных потерь в экране. Наиболее удачной является конструкция трансформатора с симметрично чередующимися обмотками. При этом максимальное снижение индуктивности рассеяния достигается уже при числе групп, равном четырём. Получено экспериментальное подтверждение увеличения кратности тока для сверхпрово-

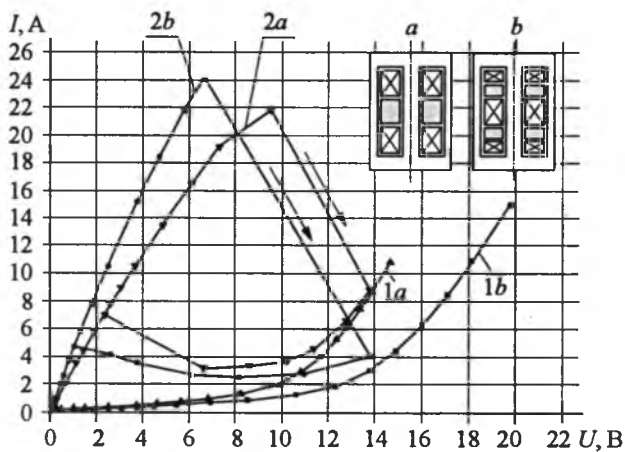


Рис.4. Вольт-амперная характеристика токоограничивающего устройства при различном числе сверхпроводящих экранов (колец)

дящего ограничителя тока трансформаторного типа с секционированным экраном.

Список литературы

1. Бушуев В.В., Лизалек Н.Н., Новиков Н.Л. Динамические свойства энергообъединений. М.: Энергоатомиздат, 1995.

2. Иванов С.С., Жемерикин В.Д., Копылов С.И. Однофазный сверхпроводящий управляемый реактор. Препринт ОИВТ РАН № 4-475. М., 2004.

3. Иванов С.С., Жемерикин В.Д., Копылов С.И. Исследование магнитной цепи токоограничивающего индуктивного сопротивления. Препринт ОИВТ РАН № 477. М., 2004.

4. Пат. 39002 РФ. Однофазный сверхпроводящий токоограничивающий реактор / Веселовский А.С., Иванов С.С., Жемерикин В.Д. и др. 10.07.04.

КОПЫЛОВ Сергей Игоревич – ведущий научный сотрудник ИВТ РАН. Окончил МЭИ в 1979 г. В 1984 г. защитил кандидатскую диссертацию.

О предельной глубине обнаружения локальных ферромагнитных объектов в толще полупроводящей среды

ЩЕРБАКОВ Г.Н., АНЦЕЛЕВИЧ М.А., УДИНЦЕВ Д.Н.

В различных областях деятельности человека возникает необходимость обнаружения ферромагнитных объектов в немагнитных укрывающих средах (земле, воде, снеге и т.д.). Подобная задача возникает при поиске стальных нефте- и газопроводов, затонувшей техники, стрелкового, огнестрельного и холодного оружия, невзорвавшихся авиабомб и артиллерийских снарядов, большинства инженерных противотанковых, противодесантных и противопехотных мин. В настоящее время в условиях строительства объектов различного назначения, оживления промышленного производства в стране, а также действий криминальных и радикальных группировок актуальность поиска объектов в укрывающих средах определяется необходимостью решения задачи обеспечения безопасности населения, организаций и предприятий.

Для обнаружения локальных неоднородностей поля в немагнитных укрывающих средах, вызываемых ферромагнитными объектами искусственного происхождения, наибольшее применение нашли такие магниточувствительные приборы, как феррозондовые градиентометры или дифференциальные магнитометры [1–4]. Ферромагнитные объекты обладают либо собственным магнитным по-

лем, либо искажают однородное поле Земли. И в том, и в другом случае магнитное поле в зоне чувствительного элемента–феррозонда изменяет свои значение и направление. Это и является признаком наличия ферромагнитного объекта. По отношению к искомому объекту приборы являются пассивными, т.е. не оказывают на него никакого воздействия.

ЭДС на выходе чувствительной системы градиентометра пропорциональна разности значений напряжённости магнитного поля в двух точках пространства (рис.1), находящихся на расстоянии l друг от друга (база градиентометра).

Основным параметром магнитометра является его чувствительность. Чувствительность измеряется значением магнитной индукции или напряжённости магнитного поля, которую способен зарегистрировать прибор. Другой, не менее важной, характеристикой является разрешающая способность, определяющая ту минимальную разницу параметров магнитного поля в пространстве, которую возможно зарегистрировать прибором. Современные магнитометры обладают разрешающей способностью от 0,01 до 1 нТл, в зависимости от принципа действия и класса решаемых задач [1,5].

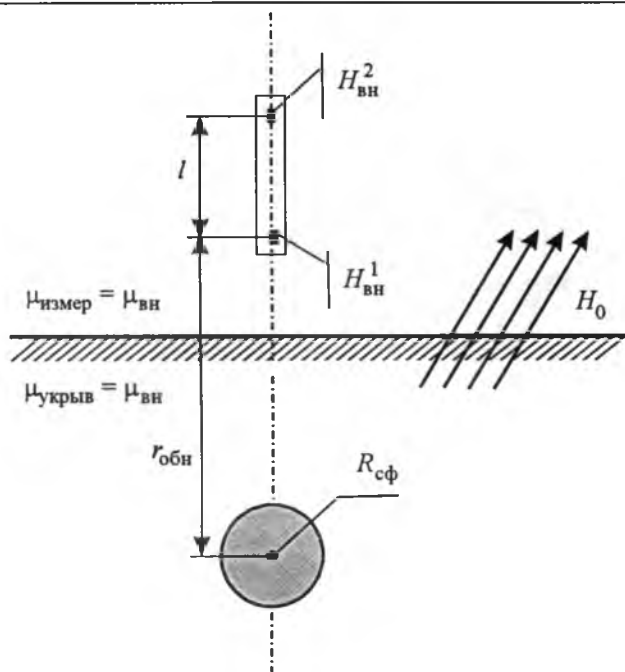


Рис.1. Обнаружение малоразмерных ферромагнитных объектов в немагнитных укрывающих средах феррозондовыми градиентометрами

При поиске и разработке средств поиска объектов возникает необходимость решения следующих частных задач:

1. Оценка предельной глубины обнаружения существующими магнитометрами объектов поиска с заданными геометрическими размерами.
2. Определение магнитной проницаемости объектов с известными геометрическими размерами и расстоянием до объекта.
3. Обоснование характеристик разрабатываемых магнитометров в зависимости от требуемой (заданной) глубины залегания (поиска) и геометрических размеров объектов.

Актуальность *первой* задачи определяется необходимостью чёткого знания глубины, до которой проведено обследование местности. Зачастую, например, при поиске инженерных боеприпасов, от этого зависит жизнь людей.

В [2] приведена зависимость, позволяющая приближённо определять дальность обнаружения феррозондовым градиентометром объекта поиска, аппроксимированного ферромагнитным шаром:

$$r_{обн} = \sqrt[4]{6R_{сф}^3 \mu_0 H_0 / |\partial B / \partial r|_{min}}, \quad (1)$$

где $R_{сф}$ – радиус ферромагнитного объекта поиска сферической формы (шара), м; $\mu_0 =$

$= 1,257 \cdot 10^{-6}$ Гн/м – магнитная постоянная; H_0 – напряжённость постоянного магнитного поля Земли, А/м; $|\partial B / \partial r|_{min}$ – чувствительность градиентометра по полю, Тл/м.

Формула (1) имеет удовлетворительную для практики точность, несмотря на ряд принятых допущений и ограничений:

- не учитывается значение магнитной проницаемости объекта поиска $\mu_{сф}$ как значительно превосходящее магнитную проницаемость внешней укрывающей среды $\mu_{вн}$;
- относительная магнитная проницаемость внешней укрывающей среды $\mu_{вн}$ принята равной 1;
- не учитывается расстояние между феррозондами (длина базы) l .

Но формула (1) неприменима для комплексной оценки влияния на предельную дальность обнаружения магнитных свойств объекта поиска и укрывающей среды, длины базы магнитометра.

Отметим, что большинство объектов имеет сложную геометрическую форму. Их поверхность может аналитически задаваться системой уравнений, каждое из которых описывает какой-либо участок поверхности, что приводит к необходимости решения сложной системы уравнений, описывающих искажение внешнего квазиоднородного магнитного поля Земли. Однако на современном уровне развития средств обработки информации это не представляет большой трудности. Рассмотрим решение данной задачи аналогично зависимости (1) на примере объекта в виде однородного шара.

Зависимость, учитывающая кроме факторов, учтённых в (1), магнитные свойства объекта поиска, укрывающей среды и длину базы магнитометра приводится ниже.

Напряжённость внешнего возмущённого магнитного поля [6]

$$H_{вн}^{возм} = H_{вн}^{невозм} \left(1 + 2 \frac{R_{сф}^3 \mu_{сф} - \mu_{вн}}{r^3 \mu_{сф} + 2\mu_{вн}} \right), \quad (2)$$

где $H_{вн}^{невозм}$ – напряжённость внешнего невозмущённого магнитного поля, в нашем случае равная напряжённости постоянного магнитного поля Земли H_0 , А/м; r – расстояние от центра ферромагнитного шара до точки наблюдения.

Учитывая равенство, в подавляющем большинстве случаев, магнитных проницаемостей среды, в которой находится средство измерения (воздуха, воды), и укрывающей среды (грунта, воды, снега и т.д.):

$$\mu_{измер} = \mu_{укрыв} = \mu_{вн}, \quad (3)$$

условия на границе раздела сред:

$$H_{1\tau} = H_{2\tau}; \quad \mu_1 H_{1n} = \mu_2 H_{2n} \quad (4)$$

можно представить в виде:

$$H_{1\tau} = H_{2\tau}; \quad H_{1n} = H_{2n}. \quad (5)$$

Напряжённость внешнего возмущённого магнитного поля в центре нижнего феррозонда

$$H_{вн}^1 = H_0 \left(1 + 2 \frac{R_{сф}^3}{r_{обн}^3} \frac{\mu_{сф} - \mu_{вн}}{\mu_{сф} + 2\mu_{вн}} \right), \quad (6)$$

где $r_{обн}$ – максимальная глубина обнаружения феррозондовым градиентометром объекта поиска, аппроксимированного ферромагнитной сферой.

Напряжённость внешнего возмущенного магнитного поля в центре верхнего феррозонда

$$H_{вн}^2 = H_0 \left(1 + 2 \frac{R_{сф}^3}{(r_{обн} + l)^3} \frac{\mu_{сф} - \mu_{вн}}{\mu_{сф} + 2\mu_{вн}} \right). \quad (7)$$

Разница между напряжённостями внешне возмущенного магнитного поля в центрах феррозондов магнитометра

$$\Delta H_{вн}^{1-2} = 2H_0 R_{сф}^3 \frac{\mu_{сф} - \mu_{вн}}{\mu_{сф} + 2\mu_{вн}} \left(\frac{1}{r_{обн}^3} - \frac{1}{(r_{обн} + l)^3} \right). \quad (8)$$

Анализ показал удовлетворительную сходимость результатов теоретических расчётов по формуле (8) и натурных экспериментальных исследований по оценке предельной глубины обнаружения ферромагнитных шаров различных радиусов (рис.2) прибором для определения местонахождения ферромагнетиков OGF-L (рис.3).

Зависимость (8) может также применяться при приближённых расчётах для локальных объектов, имеющих не строго сферическую форму. В этом случае радиус ферромагнитной сферы $R_{сф}$ заменяется приведенным радиусом

$$R_{привед} \approx \sqrt[3]{3V_{об}/4\pi} \quad (9)$$

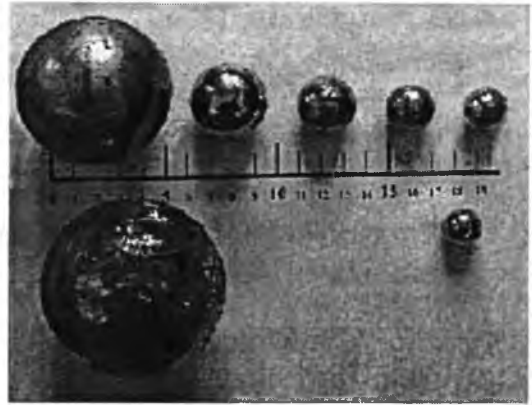


Рис.2. Ферромагнитные шары, используемые при проведении экспериментальных исследований

при условии $R_{привед} < 10r_{обн}$, где $V_{об}$ – объём объекта поиска.

Расчёт в этом случае приобретает приближённый характер.

Учитывая громоздкость формулы (8), для практики наиболее удобно использовать зависимости $r_{обн} = f(l)$, $r_{обн} = f(R_{сф})$ и другие в графическом виде, имея их в инструкции к поисковому прибору в виде приложения. В качестве примера представлены некоторые зависимости (рис.4,5).

Из зависимостей рис.4,5 видно, что при относительной магнитной проницаемости объекта поиска, более чем на порядок превышающей относительную магнитную проницаемость среды, последней можно пренебречь. Погрешность определения предельной глубины залегания объекта поиска при этом составляет не более 8%. Наиболее значительное влияние на глубину поиска оказывает длина базы магнитометра, так как увеличе-

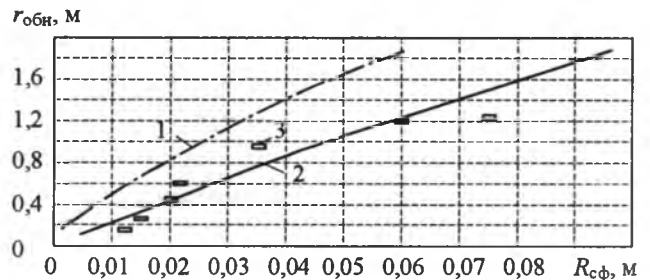


Рис.3. Результаты теоретических расчётов по формулам (1) (кривая 1) и (8) (кривая 2) и натурных экспериментальных исследований с использованием OGF-L типа 83015 (3)

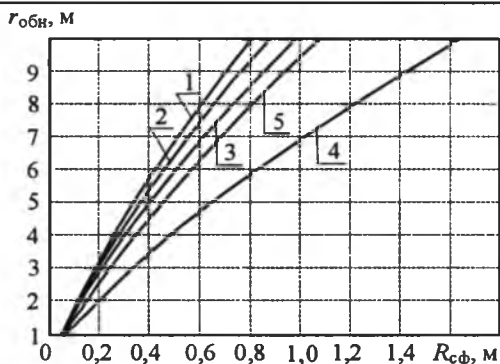


Рис.4. Зависимости предельной глубины обнаружения ферромагнитной сферы ($\mu_{сф} = 100$) дифференциальным магнитометром с разрешающей способностью по напряжённости магнитного поля 0,01 А/м от её радиуса:

1 - $l = 1$ м, $\mu_{сф} = 100$; 2 - $l = 1$ м, $\mu_{сф} = 10$; 3 - $l = 0,5$ м, $\mu_{сф} = 100$; 4 - $l = 0,1$ м, $\mu_{сф} = 100$; 5 - $l = 1$ м, $\mu_{сф} = 3$

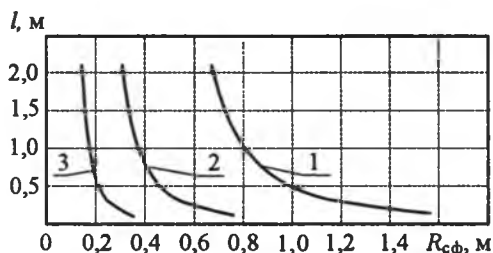


Рис.5. Зависимость требуемой длины базы l дифференциального магнитометра для обнаружения ферромагнитной сферы радиуса $R_{сф}$ на глубине 10 м при разрешающей способности прибора по напряжённости магнитного поля:

1 - 0,01 А/м; 2 - 0,001А/м; 3 - 0,0001 А/м

ние её позволяет удалить один из чувствительных элементов от объекта поиска в зону наименьшего возмущения. Однако, как показала практика, увеличение длины приводит к снижению механической жёсткости базы, что в свою очередь уменьшает предельную глубину обнаружения. Реально для конкретной базы существует оптимальная длина, определяемая, с одной стороны, разрешающей способностью прибора, с другой, её механической жёсткостью.

Вторую задачу реализует и позволяет получить приблизительное значение магнитную проницаемость объекта косвенно. Измеряя разницу между напряжённостями внешнего

магнитного поля в центрах феррозондов магнитометра, обусловленную возмущением, вносимым объектом с известными геометрическими размерами, при известном расстоянии между измерительным прибором и объектом, получаем зависимость, которая реализует вторую задачу:

$$\mu_{сф} = \mu_{вн} \frac{\Delta H_{вн}^{1-2} + H_0 R_{сф}^3 (r_{обн}^{-3} - (r_{обн} + l)^{-3})}{H_0 R_{сф}^3 (r_{обн}^{-3} - (r_{обн} + l)^{-3}) - \Delta H_{вн}^{1-2}} \quad (10)$$

Такая задача может возникнуть, например, при распознавании внутреннего содержания неизвестного объекта поиска, находящегося на известном расстоянии и имеющего известные размеры.

Третья задача необходима например, при обосновании требуемых характеристик поисковых приборов по общепринятому критерию цена-качество.

На рис.6 представлена зависимость предельной глубины обнаружения $r_{обн}$ ферромагнитной сферы различного радиуса $R_{сф}$ дифференциальным магнитометром с разрешающей способностью по напряжённости магнитного поля 0,01 А/м от расстояния между феррозондами l , откуда видно, что целесообразная предельная длина базы магнитометра при заданной разрешающей способности зависит от размеров объекта поиска.

Зависимость предельной глубины обнаружения $r_{обн}$ ферромагнитной сферы ($\mu_{сф} = 100$) от длины базы l и разрешающей способности дифференциального магнитометра по напряжённости магнитного поля, представленная на рис.7, показывает, что значительное увеличение глубины поиска возможно при увеличении разрешающей способности прибора.

Таким образом, зависимости (8), (10) позволяют:

1. Оценивать предельную глубину обнаружения существующими магнитометрами ферромагнитных объектов поиска с заданными геометрическими размерами.
2. Обосновывать характеристики и, прежде всего, длину базы разрабатываемых магнитометров в зависимости от требуемой (заданной) глубины залегания (поиска) и геометрических размеров объектов.
3. Оценивать магнитную проницаемость объектов с известными геометрическими размерами и расстоянием до объекта.

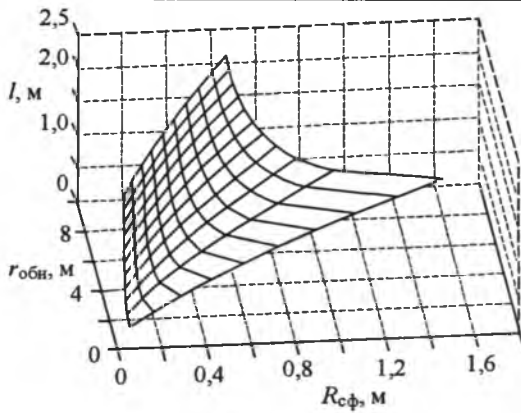


Рис.6. Предельная $r_{обн}$ ферромагнитной сферы ($\mu_{сф} = 100$) в зависимости от её радиуса $R_{сф}$ и расстояния между феррозондами l дифференциального магнитометра с разрешающей способностью по напряженности магнитного поля $0,01$ А/м

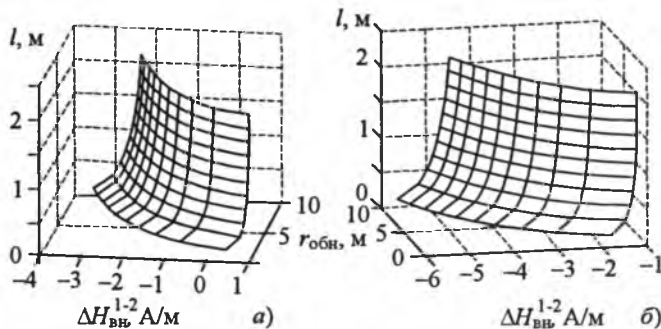


Рис.7. Зависимость $r_{обн}$ ферромагнитной сферы ($\mu_{сф} = 100$) от длины базы l и разрешающей способности дифференциального магнитометра по напряженности магнитного поля при радиусе сферы:
 а – $R_{сф} = 0,5$ м; б – $R_{сф} = 0,1$ м

Анализ зависимостей (8), (10) и графиков (рис.4–7) позволяет сделать следующие выводы:

1. Влияние относительной магнитной проницаемости объектов поиска более 10 на глубину обнаружения незначительно.

2. Целесообразная длина базы зависит от ожидаемых размеров объекта поиска и дол-

жна быть согласована с ними. Целесообразной является длина базы, превышающая в 1,5–2 раза геометрические размеры объекта поиска. Уменьшение длины приводит к значительному снижению глубины поиска, увеличение – к незначительному её росту.

3. Предельная глубина обнаружения в грунте и воде современными магнитометрами характерных малоразмерных объектов поиска (стрелкового и холодного оружия, большинства инженерных противотанковых, противодесантных и противопехотных мин, взорвавшихся авиабомб) не превышает 3–7 м.

Список литературы

1. Арбузов С.О. Магниточувствительные поисковые приборы // Специальная техника. 2000. № 6.
2. Щербаков Г.Н. Обнаружение объектов в укрывающих средах. Для криминалистики, археологии, строительства и борьбы с терроризмом. М.: Арбат-Информ, 1998.
3. Магниторазведка. Справочник геофизика / Под ред. В.Е.Никитского, Ю.С.Глабовского. М.: Недра, 1980.
4. Афанасьев Ю.В. Феррозонды, Л.: Энергия, 1969.
5. Бараночников М.Л. Микромагнитоэлектроника. Т.1. М.: ДМК Пресс, 2001.
6. Никольский В.В. Теория электромагнитного поля. М.: Высшая школа, 1961.

Щербаков Григорий Николаевич – старший научный сотрудник Военно-инженерной академии, доктор техн. наук, проф. Окончил Военно-инженерную академию в 1970 г. Защитил докторскую диссертацию по вопросам локации полупроводниковых сред с использованием различных физических полей в 1992 г. в Военно-инженерной академии.

Анцелевич Михаил Александрович – начальник научно-исследовательской группы Военно-инженерной академии, доктор техн. наук. Окончил факультет автоматики и вычислительной техники Новосибирского электротехнического института в 1982 г. Защитил докторскую диссертацию по вопросам дистанционного распознавания малоразмерных объектов в 2000 г. в Военно-инженерной академии.

Удинцев Дмитрий Николаевич – докторант Военно-инженерной академии, канд. техн. наук. Окончил Калининградское высшее инженерное училище инженерных войск в 1991 г. Защитил диссертацию в области исследования электромагнитных процессов в полупроводящих средах в 1997 г. в Военно-инженерной академии.

Распределённая электромагнитная модель электрона и устойчивость его дискретных состояний, как следствие волнового описания классической физики¹

ЮРКЕВИЧ В.М.

Все электрические явления связаны с понятием заряда (обычно электрона). Однако в электротехнике (физике) до сих пор не предложено удовлетворительной модели этой частицы. Обычно пользуются квантовым описанием с рассмотрением волны, задающей вероятность нахождения электрона в пространстве. Здесь предлагается новая модель электрона, представленная свёрнутой в замкнутую траекторию электромагнитной волной, в которой существование дискретных состояний, описанных в квантовой физике, обязано нелинейной зависимости массы от радиуса.

Понятие заряда в электротехнике является фундаментальным. Элементарным носителем его обычно считается электрон. Однако до сих пор нет его модели, удовлетворительно описывающей свойства этой частицы, давно известные по результатам многочисленных экспериментов. В статье представлены некоторые результаты, описывающие модель, соответствующую известным свойствам, и полученную с помощью уравнений классической ("неквантовой") физики.

1. При выводе уравнения движения в неинерциальной системе отсчёта [1] получается ряд слагаемых, выражающих силы, действующие на частицу с массой m , движущуюся во вращающейся системе отсчёта со скоростью \vec{v} . Обратимся только к двум из этих слагаемых, обязанным своим появлением вращению системы отсчёта с угловой скоростью $\vec{\Omega}$ (далее будем считать, что вращение – равномерное):

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = 2m[\vec{v}\vec{\Omega}] + m[\vec{\Omega}[\vec{r}\vec{\Omega}]]. \quad (1)$$

Как известно, сила $m[\vec{\Omega}[\vec{r}\vec{\Omega}]]$ называется центробежной. Она направлена в плоскости, проходящей через \vec{r} и $\vec{\Omega}$, перпендикулярно

All electrical appearances are bound to concept of a charge (normally of electron). However in an electrical technology till now it is not offered of satisfactory model of this particle. Normally use quantum exposition with viewing of a wave specifying probability of a finding of an electron in space. Here gives exposition of new model of an electron, introduced electromagnetic wave, minimized in a closed path, in which the existence of discrete states circumscribed in a quantum physics, is obliged to a nonlinear dependence of mass from radius.

оси вращения в сторону от оси. Эта сила равна $m\rho\Omega^2$, где ρ – расстояние от оси вращения. Другое слагаемое $2m[\vec{v}\vec{\Omega}]$, называемое силой Кориолиса, характерно присутствием скорости \vec{v} , с которой частица движется в системе отсчёта.

Для удобства интерпретации введём индексы: "н" (точка наблюдения) – относится к наблюдаемому объекту (здесь это частица); "и" (исток) – к объекту, который оказывает влияние (здесь это поле вектора $\vec{\Omega}$). Учтём, что угловая скорость связана с линейной соотношением $2\vec{\Omega} = \text{rot } \vec{v}_н$. Тогда силы Кориолиса и центробежная записываются в форме

$$\vec{f}_к = m[v_н \text{rot } v_н]; \quad (2)$$

$$\vec{f}_{цб} = \frac{1}{2} m[v_н \text{rot } \vec{v}_н]. \quad (3)$$

Отметим, что (2) и (3) отличаются в 2 раза. Таким образом, при равенстве скоростей $\vec{v}_н$ и $\vec{v}_и$ и прочих условий сила $\vec{f}_к$ в два раза больше центробежной. Кроме того, эти силы могут быть направлены в противоположные стороны, если $\vec{v}_н$ и $\vec{v}_и$ также противоположно направлены (т.е. $f_к$ может быть направлена к центру вращения).

Вывод этих соотношений в [1] сделан в общей форме, поэтому от объекта – частицы

¹ Печатается в порядке обсуждения.

с массой m – возможно перейти к другим. В качестве объекта возьмём векторное поле \vec{E} (напряжённость электрического поля). При этом выражения по типу (2), (3) будут записываться для объёмной плотности силы \vec{f}_0 :

$$\vec{f}_{0к} = \mu_0 [\vec{E}_н \text{rot } \vec{E}_н]; \quad (4)$$

$$\vec{f}_{0цб} = \frac{1}{2} \mu_0 [\vec{E}_н \text{rot } \vec{E}_н]. \quad (5)$$

В этих соотношениях роль массы выполняет диэлектрическая константа ϵ_0 . Аналогично можно записать подобные выражения для магнитного поля. В качестве магнитного аналога вектору \vec{E} берём вектор напряжённости магнитного поля \vec{H} ($\mu_0 \vec{H} = \vec{B}$, \vec{B} – магнитная индукция):

$$\vec{f}_{0к} = \mu_0 [\vec{H}_н \text{rot } \vec{H}_н]; \quad (6)$$

$$\vec{f}_{0цб} = \frac{1}{2} \mu_0 [\vec{H}_н \text{rot } \vec{H}_н]. \quad (7)$$

Проиллюстрируем (6) сравнением с хорошо известным выражением $d\vec{f} = [\vec{J} \vec{B}]dV$, определяющим силу, которую испытывает объём dV с плотностью тока \vec{J} со стороны магнитного поля с индукцией \vec{B} . Плотность

силы $\vec{f}_{0j} = \frac{d\vec{f}}{dV} = [\vec{J} \vec{B}]$. Здесь плотность тока

\vec{J} и индукция \vec{B} независимы, а наблюдаемая сила относится к элементу тока $\vec{J}dV$. Это отметим расстановкой индексов

$$\vec{f}_{0j} = [\vec{J}_н \vec{B}_н]. \quad (6a)$$

Поскольку $\vec{J}_н = \text{rot } \vec{H}_н$, то

$$\vec{f}_{0j} = -\mu_0 [\vec{H}_н \text{rot } \vec{H}_н]. \quad (6б)$$

Естественно полагать, что если на распределённый ток действует сила с плотностью \vec{f}_{0j} , то и в поле \vec{B} можно ожидать распределения плотности силы, но с противоположным знаком. Поменяем местами индексы наблюдения и истока в (6б), что вызовет изменение знака силы на противоположный; при этом получим выражение для плотности силы $\vec{f}_0 = \mu_0 [\vec{H}_н \text{rot } \vec{H}_н]$, которое полностью совпадает с (6).

2. Чтобы использовать (4) и (5), надо иметь выражение для ротора поля, в качестве которого берём напряжённость электрического поля \vec{E} . Для вращающегося электрического поля с помощью $R_{ik} = \frac{\partial E_k}{\partial x^i} - \frac{\partial E_i}{\partial x^k}$ полу-

чим $\text{rot } \vec{E} = \frac{\vec{\omega}}{c} E$. Здесь $\vec{\omega}$ – угловая скорость

равномерного вращения поля. Если вращение неполное, т.е. вектор совершает колебательные движения типа маятника, то угловая скорость $\vec{\omega}(t)$ описывается гармонической функцией, что находится в соответствии с урав-

нением $\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$, так как угол отклонения

маятника меняется по гармоническому закону $\theta(t) = \Theta_m \sin \omega t$. При этом поперечная составляющая напряжённости $E_{\perp} = E_m \sin \theta(t)$, а продольная $E_{\parallel} = E_m \cos \theta(t)$.

На рис.1,а изображена плоская электромагнитная волна. Кроме напряжённости $\vec{E}(z,t)$ и индукции $\vec{B}(z,t)$ показано также распределение $\vec{R}(z,t) = \text{rot } \vec{E}(z,t)$. При построении кривой ротора учтено, что $\vec{E}(z,t)$ и

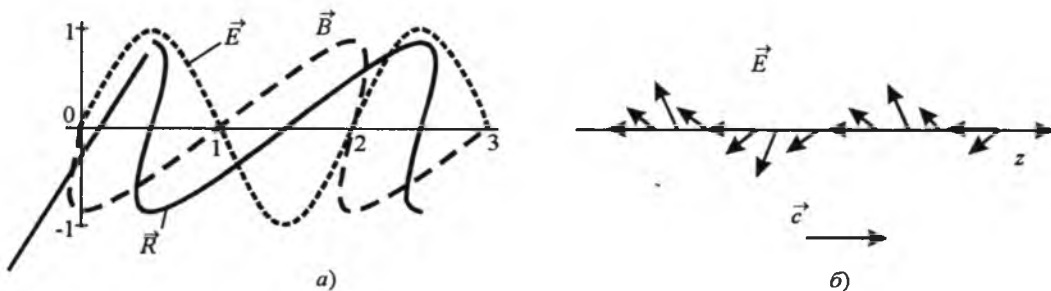


Рис.1

$\vec{B}(z,t)$ имеют одинаковые фазы, а $\vec{R}(z,t) = \text{rot } \vec{E}(z,t)$ отстаёт на четверть периода (так как $\text{rot } \vec{E} = -\partial \vec{B} / \partial t$), оставаясь в плоскости (y,z) , как и $\vec{B}(z,t)$.

Подобные распределения $\vec{E}(z,t)$ и $\vec{R}(z,t)$ могут быть описаны моделью, где вектор \vec{E} при перемещении вдоль оси z совершает одновременно маятниковые колебания. На рис.1,б это показано последовательностью положений вектора \vec{E} при перемещении вдоль оси z со скоростью \vec{c} . Отметим, что продольная ориентация вектора \vec{E} противоположна направлению движения. Принятая модель позволяет пользоваться парой векторов $\vec{E}(z,t)$ и $\vec{R}(z,t)$; вектор $\vec{B}(z,t)$ из рассмотрения исключается. Это даёт возможность применять только выражения (4) и (5), не прибегая к (6) и (7).

Рассмотрим теперь плоскую электромагнитную волну, вращающуюся относительно оси z (ось направления движения) с угловой скоростью $\vec{\Omega} = \Omega \vec{e}_z$. Примем $\Omega > 0$. Вектор напряжённости электрического поля \vec{E} находится в плоскости (x,y) , так что $\vec{E} = E_x \vec{e}_x + E_y \vec{e}_y$, причём $\vec{E} = E(t) = E_m \sin \omega t$. Проекция \vec{E} на ось z с учётом вращения имеют вид: $E_x = E(t) \cos \Omega t$ и $E_y = E(t) \sin \Omega t$. Будем рассматривать один частный случай $\Omega = \omega$ (скорости вращения и колебаний одинаковы), что для проекций даёт

$$\left. \begin{aligned} E_x(t) &= \frac{1}{2} E_m \sin 2\omega t; \\ E_y(t) &= \frac{1}{2} E_m (1 - \cos 2\omega t). \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Средние значения проекций за период

$$E_{x\text{ср}} = 0; \quad E_{y\text{ср}} = \frac{1}{2} E_m. \quad (9)$$

Таким образом, вращение плоской волны со скоростью $\Omega = \omega$ приводит к появлению постоянной составляющей напряжённости

$$E_{\text{ср}} = E_{y\text{ср}} = \frac{1}{2} E_m. \quad \text{Поскольку волна — бегу-$$

щая, добавим в (8) зависимость от z , что даст окончательные выражения для проекций:

$$\left. \begin{aligned} E_x(z,t) &= \frac{1}{2} E_m \sin 2(\omega t - kz); \\ E_y(z,t) &= \frac{1}{2} E_m [1 - \cos 2(\omega t - kz)]. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Заметим, что проекции описываются гармоническими функциями с удвоенным аргументом. Появление среднего значения

$$E_{y\text{ср}} = \frac{1}{2} E_m \quad \text{определено вращением вектора}$$

\vec{E} в поперечной плоскости. При изменении направления вращения ($\Omega < 0$) знак среднего значения также изменяется на противоположный:

$$E_{y\text{ср}} = -\frac{1}{2} E_m < 0.$$

3. Плотность распределения энергии в

$$\text{волне } w = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 + \frac{1}{2} \mu_0 H^2. \quad \text{С учётом } E = cB$$

плотность энергии выражается только через напряжённость электрического поля: $w = \epsilon_0 E^2$.

Далее в качестве волны будем иметь в виду фотон. Свяжем его энергию, описываемую известным соотношением $mc^2 = h\nu$, с опре-

делением её через напряжённость \vec{E} . Для этого будем полагать, что плотность массы $m = d_m$. Это позволяет записать плотность энергии $d_m c^2$. Поскольку $w = \epsilon_0 E^2$, то для

$$\text{плотности массы получаем } d_m = \frac{\epsilon_0}{c^2} E^2.$$

Для принятой модели электромагнитной волны (фотона) будем применять соотношения (4) и (5). Положим, что на движущийся

фотон действует роторное поле вектора \vec{E} , что приводит к появлению боковой силы, в результате чего траектория становится криволинейной; при однородном воздействии траектория может стать круговой. Понятно, что фотон может быть свёрнут не в один виток, число витков зависит от интенсивности роторного поля. На рис.2 эта система изображена в компактной форме. Здесь же пока-

заны векторы \vec{E} , \vec{R} , $\vec{f}_{0к}$. Подчеркнём, что роторное поле \vec{R} в многовитковой системе получается как суперпозиция полей от каждо-

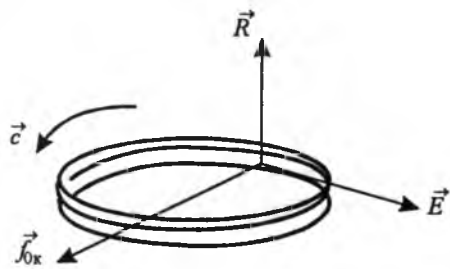


Рис.2

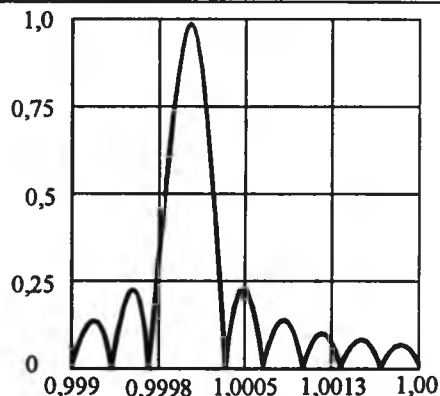


Рис.3

го витка в отдельности. Точка на витке с наблюдаемой напряжённостью \vec{E}_n оказывается в роторном поле других витков (такой анализ аналогичен рассмотрению векторов в катушке индуктивности с электрическим током, сопровождаемым магнитным полем).

Сила \vec{f}_{0k} , возникающая за счёт взаимодействия напряжённости и роторного поля в соответствии с (4), направлена к центру окружности. Это означает, что у фотона, свёрнутого в многовитковую систему, имеется распределённая центростремительная сила, способствующая сворачиванию. Надо отметить, что, во-первых, напряжённость \vec{E} на рис.2 направлена противоположно вектору \vec{c} ; во-вторых, направление роторного поля \vec{R} определено вращением (при движении по траектории) вектора напряжённости и не зависит от взаимной ориентации \vec{E} и \vec{c} . Поэтому направление силы \vec{f}_{0k} к центру кривизны траектории целиком определено ориентацией вектора \vec{E} , противоположной вектору скорости \vec{c} (см. рис.1,б).

Такой свёрнутый фотон может считаться частицей. Среднее значение напряжённости

$E_{cp} = E_{ycp} = -\frac{1}{2} E_m$ при этом сохраняется. По-

ток вектора напряжённости $\oint \vec{E} d\vec{s} = \frac{1}{\epsilon_0} q$ в

этом случае определяет заряд $q < 0$, который несёт свёрнутый фотон (частица).

Будем считать, что этот свёрнутый фотон размещён рядом с протоном. Отрицательный заряд $q < 0$ позволит удержаться ему вблизи

протона, причём при наличии симметрии расположения областей, определяющих заряд, по условию устойчивости протон окажется в центре симметрии, т.е. в центре окружности. Если полагать, что фотон имеет массу m_e и заряд $e < 0$, соответствующие электрону, то полученная система окажется атомом водорода. В такой модели атома электрон имеет распределённую структуру, представленную многовитковой свёрткой фотона (орбитой), – в отличие от традиционного представления в виде сосредоточенной частицы, вращающейся по орбите вокруг протона.

Рассмотрим подробнее распределённую структуру электрона для разных орбит в атоме. В общем случае на орбите может размещаться несколько длин волн. С номером орбиты n будем связывать не только значение момента импульса $n\hbar$, но и число длин волн λ в одном витке орбиты. Таким образом, переход электрона, к примеру, с первой орбиты на третью означает увеличение радиуса окружности, на которой число длин волн изменилось с одной до трёх; при этом соответственно уменьшается число витков электрон-орбиты.

Рассмотрим сначала особенности распределения на первой орбите ($n = 1, r_1$).

При точном равенстве $2\pi r_1 = \lambda$ результирующие проекции E_x, E_y, E_z напряжённости \vec{E} получаются просто умножением на число витков, равное числу длин волн N . Если радиус окружности немного изменится: $r = r_1 + \Delta r$, то постоянные составляющие проекций напряжённости, как и прежде, складываются, а переменные надо вычислять с учётом от-

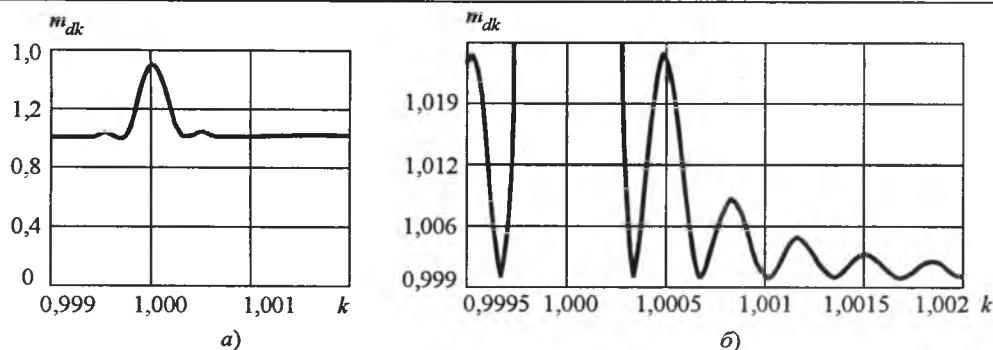


Рис.4

личия фазы в каждом витке от предыдущих. Волновое число $k = 2\pi/\lambda$, так что фазовое

отличие двух соседних витков $\alpha = 4\pi \frac{\Delta r}{r_1}$. В

комплексной форме напряжённость этого витка получается из предыдущего умножением на $b = e^{j\alpha}$ ($j = \sqrt{-1}$). Напряжённость от наложения всех витков определится суммой

$$\dot{S} = \dot{E}(1 + b + b^2 + \dots + b^{N-1}) = \dot{E} \frac{1 - e^{j\alpha N}}{1 - e^{j\alpha}} \quad (11)$$

На рис.3 показано распределение результирующей нормированной переменной со-

ставляющей напряжённости $E_{\Sigma m} = s = \frac{|\dot{S}|}{N}$ в

функции относительного радиуса $r_r = \frac{r}{r_1}$. Как

и следовало ожидать, получена характерная для интерференции кривая. Если воспользоваться геометрическим изображением суммы (11) на комплексной плоскости, то несложно получить некоторые свойства этой кривой. Наибольшему максимуму соответствует $r_r = 1$; здесь число витков электрон-орбиты равно числу длин волн. При увеличении радиуса число витков уменьшается; при радиусе, соответствующем первому нулю функции, на окружности укладывается на один виток меньше. Достижение каждого последующего нуля соответствует уменьшению числа витков на единицу. Связь числа витков орбиты с радиусом определяется уравнением

$$\frac{dr_r}{dn_b} = -\frac{1}{N} r_r^2, \quad (12)$$

где n_b – число витков.

Отсюда следует, что ширина Δr_r каждого бугра (всплеска) на рис.3 равна (для $\Delta n_b = 1$)

$$\Delta r_r = \frac{1}{N} r_r^2.$$

При увеличении радиуса, к примеру вдвое, эта ширина увеличится в четыре раза. Высота H этого всплеска в середине интервала зависит от его номера k_1 :

$$H = \frac{2}{\pi} \frac{1}{2k_1 - 1}.$$

Таким образом, огибающая по максимумам на рис.3 соответствует ряду, составленному из чисел, обратных нечётным.

Поскольку распределение напряжённости зависит от радиуса, аналогично будет зависеть от радиуса и масса, так как её плотность

$$d_m = \frac{\epsilon_0}{c^2} E^2.$$

Возьмём, к примеру, напряжённость по одной координате $E_y(z, t) = 1/2 E_m [1 - \cos 2(\omega t - kz)]$, возведем её в квадрат и усредним по времени за период (здесь координата направлена вдоль окружности орбиты). Результат в нормированном виде показан на графиках рис.4. Рис.4,б отличается от рис.4,а лишь масштабом по вертикали и иллюстрирует колебательный характер функции плотности массы, незаметный на первом графике при $r_r = 1$.

Подобные действия можем провести со всеми составляющими напряжённости \vec{E} .

Так как $E^2 = E_x^2 + E_y^2 + E_z^2$, то плотность массы получим суммированием функций вида рис.4 для каждой из координат.

Постоянная часть есть у E_y и E_z , причём у E_z она зависит от угла Θ_m . График плотности массы для составляющей E_z на рис.4, где отношение максимума переменной части к

постоянной равно 0,5, соответствует углу $\Theta_m = 1$. Далее для иллюстраций будем брать функцию результирующей плотности массы именно с этими соотношениями для переменной и постоянной частей.

Для выбранной модели электрона, представленного здесь распределённой структурой электрон-орбиты, получили, что плотность такой структуры зависит от размера (радиуса) этой орбиты (рис.4). Далее в расчётах нормированную плотность массы по рис.4 будем учитывать функцией $m_d(r_r) = 1 + f_m(r_r)$, где $f_m(r_r)$ – переменная часть плотности, имеющая колебательный характер.

4. Изменение радиуса орбиты связано с квантами излучения, частота которых определяется [2] известным соотношением

$$v = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right), \quad (13)$$

где R – постоянная Ридберга; n, k – номера орбит.

Так как $r_n = r_1 n^2$ и $r_{r,n} = \frac{r_n}{r_1} = n^2$, то частота

та $v = R \left(\frac{1}{r_{rn}} - \frac{1}{r_{rk}} \right)$. Для принятой здесь модели

электрон-орбиты удержание "чужого" фотона определяется выражением (2). При этом часть потока ротора расходуется на "чужой" фотон, оставшаяся часть – на удержание собственно электрон-орбиты (т.е. первичного или родительского фотона). Естественно, что сила \vec{f}_k при этом уменьшается, а радиус должен увеличиваться, изменяются также момент импульса и масса.

Для неинерциальной системы в нашем случае закон сохранения энергии не выполняется. При расчёте естественно пользоваться законом сохранения момента импульса $m_n(r)r_n c = n\hbar$ (здесь учтено, что масса зависит от радиуса). Для первой орбиты $r_1 \cong \cong 5,292 \cdot 10^{-11}$ м [2], что позволяет вычислить m_1 . Для расчёта новой орбиты после захвата "чужого" фотона сравним моменты импульсов исходного и конечного состояний $m_1 r_1 c = \hbar$, $m_n r_n c = n\hbar$ и учтём соотношения для масс и

радиусов $m(r_{r,n}) = m_1 \frac{1}{n^2}$, $m_n = m_1 \frac{1}{n^2} + m_f$, где

m_f – масса фотона на орбите, вызвавшего её переход на новый радиус. Из этих соотношений следует

$$m_n = \frac{m_1}{n}; \quad (14)$$

$$m_f = m_1 \frac{n-1}{n^2}. \quad (15)$$

Здесь масса m_f указана для переходов между первой орбитой и любой другой. Суммарная масса орбиты m_n уменьшается с увеличением радиуса, несмотря на появление m_f из-за уменьшения напряжённости E , которой определяется плотность массы.

В связи с тем, что удерживающая сила \vec{f}_k определяется ротором напряжённости \vec{E} , удобно воспользоваться интегральными соотношениями для вектора и его ротора. Циркуляция вектора \vec{E} по контуру (окружности орбиты) $C = \oint_{2\pi r} \vec{E} d\vec{l}$ связана с потоком $\text{rot } \vec{E}$ через площадь, ограниченную этим контуром, $\oint \vec{E} d\vec{l} = \int \text{rot } \vec{E} d\vec{s}$ (формула Стокса). В этих терминах механизм удержания захваченного орбитой фотона описывается перераспределением полного потока ротора \vec{E} (или циркуляции) между "чужим" (захваченным) фотоном и собственным (первичным или "родительским"): $C_r = C_e - C_f$ (здесь C_e – исходная циркуляция родительского фотона; C_f – циркуляция захваченного фотона; C_r – остаток циркуляции (поток ротора), приходящийся на удержание родительского фотона на орбите с радиусом r). Итак, захват фотона означает расходование потока ротора \vec{E} , уменьшение удерживающей силы \vec{f}_k и, как следствие, увеличение радиуса орбиты.

Захваченный фотон располагается на орбите многовитковым дополнением. Его напряжённость \vec{E} при этом описывается функцией, алогичной показанной на рис.3; плотность (а значит, и масса) соответствует кривым рис.4. Соотношение между длиной окружности (орбиты) и длиной волны определяется, как и для первичного фотона, значением n . Очевидно, что эта длина вол-

ны не совпадает с тем, что получается из (13). Длина волны на орбите меньше длины волны в свободном состоянии фотона. Объясняется это действием на фотон силы \vec{f}_k , вызывающей сжатие его и уменьшение длины волны. Чем меньше радиус орбиты (т.е. чем больше \vec{f}_k), тем выше степень сжатия. Это легко прослеживается при сравнении частоты фотона, пересчитанного из радиуса орбиты, с частотами спектра атома водорода. Отметим, что сжатию подвержен не только захваченный фотон, но и первичный; изменению степени сжатия соответствует изменение радиуса орбиты. Этим объясняется тот факт, что при расширении орбиты, к примеру до $n = 2$ (на орбите укладываются две длины волны), радиус увеличивается не в два раза, а больше (два раза по два).

Сжатый фотон имеет массу больше, чем в свободном состоянии. Кратность увеличения массы не может быть равной кратности уменьшения длины волны, что естественно,

так как плотность (массы) $d_m = \frac{\epsilon_0}{c^2} E^2$ определяется нелинейным соотношением относительно напряжённости E .

5. Рассмотрим баланс сил и устойчивость орбиты (распределённого электрона). Как сказано выше, орбита представляется двумя частями: первичный (родительский) фотон и захваченные ("чужие") фотоны. Сжимающая сила (Кориолиса) задаётся ротором $\text{rot } \vec{E}$, определяемым первичным фотоном. На захват и удержание "чужих" фотонов расходуется часть потока $\text{rot } \vec{E}$. Таким образом, для анализа устойчивости можно ограничиваться рассмотрением баланса сил, действующих на элемент первичного фотона. Здесь, как всюду, анализ проводим в первом приближении, опуская величины следующего порядка малости.

В уравнении равновесия учитываем силы центостремительную и центробежную. К первой отнесём сжимающие силы Кориолиса f_k и кулоновскую (действие положительного заряда протона). Выпишем все составляющие по отдельности.

Плотность силы Кориолиса (4) определена напряжённостью E первичного фотона

и ротором результирующего поля $\text{rot } \vec{E}$, который зависит от разности циркуляции $C_r = C_e - C_f$, т.е. $|\text{rot } \vec{E}| = \frac{C_e - C_f}{2\pi r \Delta r}$, так что в ко-

нечном итоге получаем: $f_{0k} = \epsilon_0 \frac{C_e(C_e - C_f)}{(2\pi r)^2 \Delta r}$.

Здесь $2\pi r \Delta r = S_r$ – среднее значение площади, через которую рассматривается поток ротора напряжённости. Ширину площади Δr приближённо определим средним поперечным размером волны $\Delta r = r_n/2n$.

Кулоновская составляющая плотности силы определяется поперечной составляющей напряжённости \vec{E} ($E_{\perp} = E_m \sin \theta(t)$ – см. выше), что даёт $f_{0e} = \epsilon_0 \frac{C_e^2}{(2\pi r)^2 r} (\sin \theta_m)^2$.

Плотность центробежной силы определим из $f_{0цб} = \frac{d_m c^2}{r}$ с учётом $d_m = \frac{\epsilon_0}{c^2} E^2$, что

даст окончательно $f_{0цб} = \epsilon_0 \frac{C_e^2 m_d(r_r)}{(2\pi r)^2 r}$. Здесь

$m_d(r_r) = 1 + f_m(r_r)$ – учитывает колебательный характер изменения плотности массы в функции радиуса.

Баланс сил $f_{0k} + f_{0e} = f_{0цб}$. В этом соотношении второе слагаемое поддаётся оценке. Оказывается, что $\sin^2 \theta_m$ не превосходит 0,07, что позволяет в балансе сил пренебречь в первом приближении кулоновской составляющей f_{0e} . В результате после сокращений получим окончательно

$$2 \left(1 - \frac{C_f}{C_e} \right) = \frac{1}{n} m_d(r_r). \quad (16)$$

Уравнение (16) принадлежит к существенно нелинейным. Решать его удобно графическим методом, как это показано на рис.5,а. Правая часть уравнения (16) с учётом того, что $r_r = n^2$, представлена кривой с рядом пиков, изображающих максимумы m_d при целочисленных значениях аргумента (для ряда значений $n = 1, 2, \dots$). Между ними имеются мелкие всплески, которые в масштабе рис.5,а не видны (тонкая структура). Левая часть уравнения представляет собой безразмерную

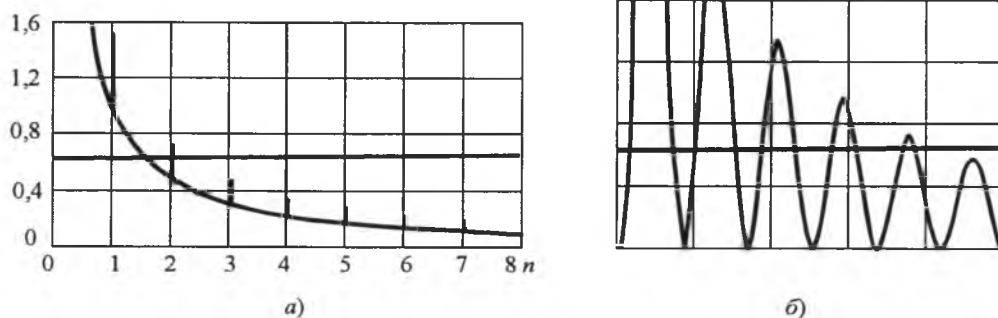


Рис.5

форму удвоенной результирующей (остаточной) циркуляции C_r , на графике она изображена горизонтальной прямой (уровень циркуляции). Их пересечения и дают решения уравнения (16). Поскольку точек пересечения может быть больше одной, необходимо решать вопрос устойчивости решения. На рис.5,б показан фрагмент пересечений в более подробном масштабе (фрагмент тонкой структуры); для этого функция m_d представлена кривой с рис.4,б. Видно, что горизонтальная прямая циркуляции пересекает колебательную характеристику во многих точках, причём каждый всплеск имеет два пересечения. Устойчивому состоянию соответствует правая точка из такой пары (центробежная сила должна уменьшаться правее точки пересечения), тогда как левая оказывается неустойчивой. Более подробно анализ устойчивости можно делать с рассмотрением фазового пространства (фазовой плоскости), где наглядно проявляется, что конечное устойчивое состояние определяется предшествующим положением системы (начальными условиями).

Рис.5,а показывает, в частности, что из состояний с большими значениями радиуса переход на меньший радиус требует меньших перепадов циркуляции. В конечном итоге состояние $n = 1$ оказывается наиболее устойчивым.

На рис.5,а всплеск при $n = 1$ ограничен размерами от 1 до 1,5. С другой стороны, согласно уравнениям (2) и (3) при прочих равных условиях сила Кориолиса в два раза превосходит центробежную. На рис.5,а тогда горизонтальную прямую следовало бы провести на уровне 2, на 0,5 выше всплеска центробежной силы. Это означает, что в ос-

новном состоянии ($n = 1$) электрон не может существовать без дополнительного ("чужого") фотона. При этом результирующая циркуляция $C_r = 1 - \frac{C_f}{C_e}$ должна быть примерно

равной 0,5 или немного больше (см. рис.5,а). Таким образом, в состоянии $n = 1$, как и любом другом, обязательно должен присутствовать "чужой" фотон, снижающий суммарную циркуляцию.

6. Возникает вопрос, в каком состоянии орбиты (распределённого электрона) удвоенная результирующая циркуляция будет больше 1,5 и в пределе может стремиться к 2? Для его решения добавляем в приведенное рассмотрение состояние с $n = 0,5$. В этом случае весь анализ остаётся в силе (прежде всего – колебательный характер зависимости плотности массы от радиуса окружности, симметричность её распределения вдоль окружности), кроме заключения о симметричности распределения заряда вдоль окружности. Теперь длина окружности равна длине полуволны, а значит, распределение кулоновской силы притяжения к протону вдоль окружности оказывается несимметричным, система с $n = 0,5$ неустойчива. Поэтому дальнейшее рассуждение относится не к "орбите", а к распределённому электрону, находящемуся вне атома.

Итак, радиус окружности (или радиус электрона r_e) при $n = 0,5$ в отсутствие вторичного фотона определим из $m_e c r_e = \frac{1}{2} \hbar$,

что даёт $r_{er} = \frac{r_e}{r_1} = \frac{1}{273,6} \cong \frac{1}{274}$. Зависимость

плотности массы от радиуса и здесь соответ-

стует рис.4. Как и для $n = 1$, можно сделать вывод о том, что устойчивого состояния при точном значении радиуса r_e не может быть, так как сила Кориолиса больше центробежной. Значит, в свободном состоянии электрон может находиться только, если часть циркуляции будет израсходована на "чужой" фотон; устойчивое состояние и результирующая плотность массы будут определены так, как показано на рис.5,б. Итак, состояние покоя принципиально невозможно. Подчеркнём еще раз, что суммирование (арифметическое) масс здесь непригодно; результирующая масса получается из закона сохранения момента импульса (и сохранения импульса) так, как это уже делалось выше для орбитального положения электрона.

7. Для распределённой модели электрона напряжённость E выступает аналогом амплитуды вероятности Ψ , а E^2 – аналогом вероятности Ψ^2 . С учётом выражения для плотности

ти $d_m = \frac{\epsilon_0}{c^2} E^2$ при интегрировании по объёму, занимаемому электрон-орбитой с массой m , получим естественное выражение

$\frac{1}{m} \int \frac{\epsilon_0}{c^2} E^2 dv = 1$. При этом вероятность нахождения электрона в некотором объёме приобретает смысл доли массы этого объёма от общей массы.

Для составляющей напряжённости, относительно которой записывается циркуляция, получается выражение, повторяющее уравнение Шредингера для Ψ . Двукратный ротор от результирующей напряжённости $\text{rot rot } \vec{E}$ с точностью до константы равен этой же напряжённости. С учётом $\text{div } \vec{E} = 0$ имеем

$\text{rot rot } \vec{E} = -\nabla^2 \vec{E}$, где ∇^2 – оператор двукратного дифференцирования (лапласиан). Циркуляция вектора должна быть равна разности циркуляций первичного и вторичного фотонов, так что окончательно получаем:

$$\nabla^2 E = \frac{K}{r} (C_e - C_f) = 0, \quad (17)$$

где K – результирующая константа.

В этом уравнении разность циркуляций аналогична разности энергий в уравнении Шредингера для стационарного состояния.

Напомним, что циркуляция отличается от энергии постоянным множителем. Комбинация разности циркуляции с радиусом даёт результирующую напряжённость.

Для поперечной составляющей напряжённости E_{\perp} справедливо $\nabla^2 E_{\perp} = 0$ (уравнение Лапласа).

Выводы

1. Предложена модель, в которой вместо сосредоточенного электрона-частицы имеет место распределённая электромагнитная модель электрон-орбиты.

2. Напряжённость E выступает аналогом амплитуды вероятности Ψ , а E^2 – вероятности Ψ^2 . Распределение напряжённости E в стационарном состоянии для этой модели описывается уравнением, повторяющим уравнение Шредингера для Ψ . При этом разность энергий заменяется разностью циркуляций, которые отличаются от энергий на константу.

3. Для принятой модели характерна зависимость массы от радиуса. Эта зависимость в первую очередь определена интенсивностью роторного поля напряжённости E , которое может изменяться с помощью внешних воздействий.

4. Внешние фотоны после захвата электрон-орбитой составляют единое целое – дополнение орбиты. Излучение фотона сопровождается уменьшением единого дополнения орбиты на значение, определяемое конечным значением циркуляции.

5. Зависимость массы электрон-орбиты от радиуса имеет колебательный характер. Это вызывает многоустойчивость системы. Конечное устойчивое состояние определяется результирующей циркуляцией \vec{E} и начальными условиями.

Список литературы

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т.1. Механика. М., 1965.
2. Кухлинг Х. Справочник по физике. М.: Мир, 1982.

Юркевич Владимир Михайлович – профессор МЭИ, доктор техн. наук. Окончил факультет автоматизации промышленности и транспорта МЭИ в 1960 г. Докторскую диссертацию защитил в 1989 г. по теме "Теоретические основы и техника измерения вектора напряжённости и потенциала электрического поля электротехнического оборудования".

АНДРОНИК ГЕВОНДОВИЧ ИОСИФЬЯН

21 июля 2005 г. исполняется 100 лет со дня рождения выдающегося учёного и крупнейшего инженера в области электротехники и электромеханики, одного из организаторов электротехнической науки и промышленности Советского Союза, представителя славной плеяды основателей отечественного ракетостроения и космонавтики, основателя и первого руководителя ВНИИЭлектромеханики академика АН Армении и Академии космонавтики им. Циолковского, Героя Социалистического Труда, лауреата Ленинской и Государственных премий, заслуженного деятеля науки и техники России и Армении, доктора технических наук, профессора Андроника Гевондовича Иосифьяна.



Андроник Гевондович родился в небольшом армянском селении Цмакагог Нагорного Карабаха в семье учителя.

После окончания электромеханического факультета Бакинского политехнического института А.Г. Иосифьяна пригласили на работу в ВЭИ, где он проработал в отделе академика К.И. Шенфера до 1941 г. Здесь в полной мере проявился его талант учёного и изобретателя. Им разработана теория и созданы образцы линейных двигателей переменного тока, один из которых демонстрировался в 1939 г. на Всемирной выставке "Мир будущего" в Нью-Йорке. Он первым в мире нашел способ обходиться без контактов в электрической машине. Найти подобное решение можно было, только смело выйдя за рамки известных принципов. Идея была реализована в изобретении бесконтактного сельсина (авторское свидетельство на имя Иосифьяна и Свечарника, патенты в Англии, Германии, США, Франции, Италии, 1936 г.).

В 1940 г. А.Г. Иосифьян защитил докторскую диссертацию по теме "Теория и практика бесконтактных сельсинов".

В сентябре 1941 г. А.Г. Иосифьян был назначен директором Государственного союзного завода № 627 Наркомата электротехнической промышленности. Завод был создан для разработки и выпуска новых образцов

военной электротехники для обороны Москвы, средств связи, источников электропитания и вооружения для Красной Армии и партизан. А.Г. Иосифьян сыграл решающую роль в превращении завода № 627 во Всесоюзный научно-исследовательский институт электромеханики, который он возглавлял более 30 лет. Институт стал крупным научным центром электротехнической науки в СССР. Достаточно упомянуть образованные благодаря усилиям А.Г. Иосифьяна и ставшие впоследствии самостоятельными научными организациями филиалы ВНИИЭМ в

Томске, Ленинграде, Ереване, Фрунзе, Электроуглях, Истре, Харькове.

Под руководством А.Г. Иосифьяна коллектив ВНИИЭМ достиг значительных успехов в создании новых электрических машин, аппаратов и их серий для спецтехники и народного хозяйства, разработках вычислительной техники и управляющих ЭВМ, передвижной энергетики, комплексных электроэнергетических систем для электродвижения атомных кораблей, систем управления и защиты ядерных реакторов и информационных систем для атомной энергетики, электрооборудования для ракетной и космической техники, создании космических аппаратов для метеорологии и исследования природных ресурсов Земли, разработках электрических машин с использованием явления сверхпроводимости.

Среди примеров деятельности ВНИИЭМ в кооперации с громадным числом предприятий можно остановиться на разработке серии асинхронных двигателей 4А. Впервые в практике электротехнической промышленности под научным руководством А.Г. Иосифьяна была организована комплексная разработка конструкции и технологии производства двигателей с участием основных сил на отраслевом, межотраслевом и международном уровне в рамках СЭВ.

Несколько десятков организаций различных отраслей народного хозяйства эффективно взаимодействовали при создании во

ВНИИЭМ комплексного электроэнергетического оборудования для электродвижения атомных кораблей и подводных лодок. Создавалось принципиально новое морское оборудование, принимались во многом революционные решения, что полностью отвечало принципам научной и инженерной деятельности А.Г. Иосифьяна, осуществлявшего научное руководство.

С началом работ по ракетной технике в СССР ВНИИЭМ становится головным институтом по разработке бортового электротехнического оборудования ракет и космических аппаратов, а А.Г. Иосифьян – его Главным конструктором.

Успехи в разработке отдельных электро-механических изделий и устройств для ракетной техники привели ВНИИЭМ к созданию собственных спутников. Впервые в мировой практике искусственным спутником Земли стала космическая электротехническая лаборатория КЭЛ "Омега". Два спутника "Омега", стартовавшие в 1963 г., были среди первых спутников серии "Космос" (Космос-14 и 23). Результаты их испытаний позволили приступить во ВНИИЭМ к созданию метеорологического космического аппарата с трёхосной пространственной ориентацией на Землю и автономной ориентацией солнечных батарей на Солнце.

В 1966 г. Гидрометцентр начал получать информацию с первого экспериментального ИСЗ "Метеор". В 1967 г. три таких спутника образовали экспериментальную метеорологическую систему, которая в 1969 г. была принята в постоянную эксплуатацию как государственная метеорологическая космическая система "Метеор". Основные новаторские решения, использованные в КА "Метеор", вскоре нашли широкое применение в других космических аппаратах, в том числе и в пилотируемых космических кораблях. В дальнейшем А.Г. Иосифьян руководил во ВНИИЭМ созданием метеорологических спутников второго поколения – "Метеор-2", спутника для дистанционного зондирования Земли – "Метеор-Природа", спутников для комплексного изучения ионосферы и магнитосферы – "Интеркосмос-Волгария-1300".

Среди широкого спектра направлений деятельности А.Г. Иосифьяна заметное место занимала его деятельность как журналиста, публициста, редактора сборников, главного редактора журнала "Электротехника" (1955-1965 гг.). Он активно реагировал на назре-

вавшие проблемы в обществе, государстве, народном хозяйстве, публикуя свои статьи, доклады, выступления на научно-технические темы общественного характера. Это были проблемы научно-технического прогресса, электрификации народного хозяйства, организации и управления в науке и промышленности, всегда связанные с его практической деятельностью.

Многочисленные публицистические статьи А.Г. Иосифьяна в журналах и газетах сыграли большую роль в распространении передовых идей в области электротехнической науки, новых технологий и производств, проблем управления. С 1959 г. А.Г. Иосифьян организовал и постоянно направлял выпуск научных трудов ВНИИЭМ с обобщением результатов теоретических и практических работ института и филиалов, руководил работой аспирантуры, воспитывал научные кадры.

Опубликованные научные труды А.Г. Иосифьяна охватывают области автоматики, телемеханики, автоматического управления, следящего привода, вопросов теории электрических машин, теоретической электромеханики и электродинамики, космической техники. Многие из них широко известны и вошли в учебники.

А.Г. Иосифьян отличался широтой научных интересов и независимым, нестандартным мышлением. В нем удивительно сочетались глубина мышления теоретика и яркая интуиция экспериментатора, широкие знания специалиста и активность выдающегося организатора. Он всегда был полон творческих идей, многие из которых до сих пор ещё не исчерпали себя. По своей натуре Андроник Гевондович был добрым и демократичным человеком, всегда доступным и доброжелательным, щедрым на идеи и предложения. Общение с ним всегда дарило радость. Особо следует подчеркнуть, что именно благодаря методологии руководства работой крупного коллектива, созданной А.Г. Иосифьяном, творчеству, бережному отношению к людям, многопрофильности и новаторству, ВНИИЭМ и в настоящие трудные времена продолжает успешно работать.

С 1996 г. ВНИИЭМ носит имя А.Г. Иосифьяна, что является не только признанием заслуг Андроника Гевондовича, но и символом плодотворной работы коллектива на благо России.

Вниманию предприятий, организаций, НИИ, вузов стран СНГ и зарубежных фирм!

Журнал "Электротехника" предоставляет свои страницы для:

- **РЕКЛАМЫ ИЗДЕЛИЙ** отечественных предприятий и зарубежных фирм в области энергетики, электротехники, электроники, автоматики
- **ПУБЛИКАЦИИ ОБЪЯВЛЕНИЙ** о научных симпозиумах, конференциях, совещаниях, семинарах

ДРУГОЙ ИНФОРМАЦИИ, соответствующей тематике журнала

Сообщаем, что журнал поступает к зарубежным подписчикам во многих странах мира на русском и английских языках. Реклама в чёрно-белом или цветном изображении может быть помещена на страницах журнала или на его обложке. Напоминаем наш адрес: 111250, Москва, Красноказарменная ул, 12.

Телефон для справок: 361-95-96



Оглавления журнала можно получить через службу Инфомаг.
Адрес сайта: <http://www.infomag.ru>.



Журнал "Электротехника" переводится на английский язык и выходит в США в издательстве "ALLERTON PRESS, INC" в полном объеме. Российское авторское общество (РАО) выплачивает гонорар авторам статей, опубликованных в журнале с 2000 г.

Справки по тел.: **203-33-35**.



Вниманию руководителей предприятий, объединений, НИИ и КБ, вузов

Редакция журнала "Электротехника" предлагает услуги по подготовке и выпуску на договорных условиях специальных (тематических) номеров журнала "Электротехника" по тематике и материалам (в том числе и рекламным) заказчика.

Справки по телефону: (095) **361-95-96**

Правила оформления статей, направляемых в журнал "Электротехника"

1. Объем статьи не должен превышать **12 страниц** текста, отпечатанного на машинке или набранного на компьютере **через 2 интервала** с полями 2–3 см, и иметь **не более 5 рисунков**.

2. В статье должны быть: введение, сформулирована постановка задачи, изложено содержание работы, показана достоверность результатов, приведены выводы, рекомендации и эффективность.

К статье должна быть приложена аннотация (2–3 предложения) на русском и английском языках. Название статьи также следует дать на русском и английском языках.

3. Статья должна сопровождаться письмом автора или организации (если она упоминается) и сведениями об авторах. Необходимо привести фамилии, имена и отчества всех авторов полностью, домашние адреса с почтовыми индексами, номера домашнего и служебного телефонов, место работы, ученое звание и степень, какой факультет, какого вуза и когда закончен, тему диссертации и год ее защиты. Можно приложить фотографии авторов.

Желательно, чтобы число авторов **не превышало пяти**. Фамилии лиц, принимавших участие в работе, можно дать в сноске.

4. Формулы должны быть четко вписаны от руки или набраны на компьютере (крупно) в отдельные строчки (а не в текст). Прописные (заглавные) буквы подчеркиваются карандашом двумя черточками снизу, а строчные (малые) - двумя черточками сверху. 0 (ноль) и цифра 3 (три) поясняются на полях простым карандашом. Индексы показываются простым карандашом.

5. Таблицы не должны быть громоздкими, все наименования необходимо писать без сокращения слов, за исключением единиц измерения. Численные значения величин в таблице, на рисунках и в тексте статьи должны быть в единицах измерения СИ.

6. Чертежи, графики, диаграммы и т.д. должны быть выполнены четко. Возможно изготовление рисунков с помощью компьютера. Условные обозначения на самом рисунке должны быть предельно краткими и общеупотребительными. Расшифровка условных обозначений и подписи к рисункам (не громоздкие) даются на отдельном листе.

Фотографии к статье (в двух экземплярах) должны быть отпечатаны на белой матовой бумаге (размером не менее 9×12 см), изображение должно быть контрастным, с хорошо проработанными деталями. **Если фотографии присылаются на дискетах, то разрешение должно быть не менее 300 пикселей на дюйм и размеры фотографии не очень велики.** Все обозначения ставятся на отдельном экземпляре.

7. Список литературы приводится в конце статьи, в порядке последовательности ссылки в тексте. Ссылки на литературу заключаются в квадратные скобки.

Для книг должны быть указаны: фамилия и инициалы всех авторов, название книг, город, издательство, год выпуска. Для журнальной статьи: фамилия и инициалы всех авторов, название статьи, журнала, год издания, номер журнала (том), страницы. Для сборников и продолжающихся изданий: фамилия и инициалы всех авторов конкретной статьи, её название, название сборника или издания, город, издательство, год, выпуск, страницы.

В список литературы не должны включаться неопубликованные материалы, материалы для служебного пользования, а также малораспространенные издания и материалы, отпечатанные литографическим способом, и т.д.

8. Статью в двух экземплярах следует высылать в редакцию простой или заказной бандеролью.

9. К статье желательно приложить дискету с набранным текстом в одной из предлагаемых программ: LEXICON, WORD 2.01–7.0, Office 95–97, PAGE MAKER 5.0–7.0.

Ежемесячный научно-технический журнал.

Издаётся с января 1930 г.

Научно-технический журнал "Электротехника" более 70 лет активно способствует развитию электротехнической промышленности.

Публикуя теоретические статьи, освещающие существующие проблемы, и статьи по результатам исследований новых типов электротехнического оборудования журнал даёт возможность специалистам, занятым созданием и применением низковольтной аппаратуры, силовых полупроводниковых приборов, преобразовательных устройств, трансформаторов, высоковольтной техники, электрических машин, электроприводов и систем управления использовать новейшие достижения в своих разработках.

Публикуемая на страницах журнала реклама продукции, выпуск специальных номеров журнала по тематике и материалам (в том числе рекламным) заказчика, помогут Вам найти надёжных партнёров как у нас в стране, так и за рубежом.

Журнал является коллективным членом Академии электротехнических наук РФ. Журнал "Электротехника" входит в "Перечень периодических научных и научно-технических изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых рекомендуется публикация основных результатов диссертационных исследований на соискание учёной степени доктора наук".

Журнал "Электротехника" распространяется по подписке в странах СНГ, ближнем и дальнем зарубежье – через АРЗИ (г. Москва) по объединённому каталогу Департамента почтовой связи Министерства связи Российской Федерации (подписной индекс — 71111) и через Роспечать (подписной индекс – 82434).

"Электротехника" переводится на английский язык и выходит в США в издательстве "ALLERTON PRESS, INC" в полном объёме.

Приглашаем Вас к активному сотрудничеству.

Будем рады видеть Вас среди авторов, подписчиков и рекламодателей нашего журнала.

**Редакция журнала "Электротехника":
111250, Москва, Красноказарменная, 12.**

Факс/телефон: 361-95-96, E-mail elektrotechnika@mtu-net.ru