





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

№ 5 МАЙ 2000

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., ЩЕРБАКОВ В.Г.,
КОВАЛЕВ Ф.И. (председатель совета),
ЮНЬКОВ М.Г., ПОДАРУЕВ А.И., ГЛО-
ВАЦКИЙ А.В.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор

КОЧЕТКОВ В.Д.

БЕЛКИН Г.С., ДАЦКОВСКИЙ Л.Х.,
ДОЛКАРТ В.М., КОПЫЛОВ И.П.,
ЛУРЬЕ А.И., МАВЛЯНБЕКОВ Ю.У.,
МОСКАЛЕНКО В.В., НИКУЛИН А.А.,
РОЗАНОВ Ю.К., СЛЕЖАНОВС-
КИЙ О.В. (зам. главного редактора),
ТРУБАЧЕВ С.Г., ТУБИС Я.Б.,
УСОВ Н.Н., ФИНКЕЛЬ Э.Э., ФЛОРЕН-
ЦЕВ С.Н.

Изатель: ЗАО "Знак"

103012, Москва, Б.Черкасский пер., 2/10

Адрес редакции:

123242, Москва,

Зоологическая ул., 11, комн. 213

Факс / телефон: 254-11-52

E-mail elektrotehnika@mtu-net.ru

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

© «Электротехника», 2000 г.

Вологодская областная универсальная научная библиотека

www.booksite.ru

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

- Болюх В.Ф.** Влияние индуктивно-связанного контура на характеристики линейного импульсно-индукционного криогенного двигателя 1

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

- Збровский И.А.** К расчету экономического эффекта в преобразовательной схеме “две обратные звезды” 7

ЭЛЕКТРОПРИВОД

- Акимов Л.В., Колотило В.И.** Синтез статической СПР скорости двухмассового неустойчивого, под влиянием отрицательного вязкого трения, объекта методом полиномиальных уравнений ... 11

- Бородин М.Ю., Сусенко О.С.** Разработка и исследование модели многосвязной системы электроприводов непрерывного трубного оправочного прокатного стана 17

- Белый П.Н.** Электропривод на основе торцевого электродвигателя с высококоэрцитивными постоянными магнитами 23

- Смирнов А.Ю.** Совершенствование исполнительных механизмов вертикального перемещения на базе индукторной машины... 26

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ

- Красиков Н.Н., Шуваева О.В., Кокунин А.В.** О некоторых процессах, происходящих в жидкостях при бесконтактном действии электрического поля 30

- Савицки А.** Выбор вторичных напряжения и тока первой ступени трансформатора дуговых сталеплавильных печей 32

- Аракелян В.Г.** Перспективы развития физико-химической диагностики маслонаполненного оборудования 35

- Малинин Л.И., Малинин В.И., Макельский В.Д., Тюков В.А.** Удельные энергетические характеристики медленно движущейся среды 43

- Лобунец О.Д.** Уравнения электротермофотодинамики и их исследование 46

- Минеев А.Р., Рубцов В.П.** Статистические показатели электропотребления и методы облегчения работы цехового электротехнического оборудования (на примере электропечей) 48

- Костюкова Т.П., Рогинская Л.Э.** К выбору расчетных соотношений параметров озоногенерирующих установок 54

ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ НЕФТЕДОБЫЧИ

- Месенжник Я.З., Прут Л.Я., Пироговский Р.А.** Восстановление электрцентробежных нефтеподъемников 57

ХРОНИКА

- В Академии** электротехнических наук Российской Федерации 61

55 лет Победы в Великой Отечественной войне

9 мая 2000 г. — это 55 годовщина Великой победы народов Советского Союза и всего прогрессивного человечества над фашистской Германией и её союзниками.

Народное хозяйство нашей страны подверглось жесточайшему разрушению. Советский народ потерял в войне 20 миллионов человек. В невиданно короткие сроки была перестроена экономика страны. Электротехнические заводы, перевезированные в глубинные районы страны, в кратчайшее время вступили в строй действующих, невзирая на то, что значительная часть сотрудников ушла на фронт. Многие из этих заводов освоили производство вооружения и боеприпасов.

Уже в 1948 г. восстановленная промышленность достигла довоенного уровня.

Большую роль в перестройке предприятий, освоении новых технологий и разработке перспективного оборудования сыграли ведущие специалисты — лидеры электротехники. Многие из них сотрудничали с нашим журналом, а академик А.Г.Иосифьян, Н.А.Оболенский в 60–70 годах были главными редакторами журнала.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Влияние индуктивно-связанного контура на характеристики линейного импульсно-индукционного криогенного двигателя

БОЛЮХ В.Ф., канд. техн. наук

Харьковский ГПУ

Исследовано влияние индуктивно-связанного контура, выполненного в виде тонкого диска, на характеристики линейного импульсно-индукционного двигателя, охлаждаемого жидким азотом. Разработана математическая модель двигателя, кратковременно подключаемого к источнику постоянного тока, которая учитывает электромагнитные, тепловые и динамические процессы, а также их нелинейности. Показано, что при определенных параметрах обмотки и дискового индуктивно-связанного контура возможно повышение механических показателей работы линейного двигателя.

Линейный импульсно-индукционный двигатель (ЛИИД) рассматривается как эффективное электромеханическое устройство, преобразующее энергию источника питания за малое время в высокоскоростной разгон на коротком рабочем участке [1,2]. Устройства такого типа используются в различных механизмах ударного действия, скоростных электроприводах, в том числе с бесконтактным движением исполнительного элемента, на испытательных динамических стендах и полигонах, пусковых и стартовых системах и др. [3,4].

Кратковременный режим работы этих устройств и ЛИИД, в частности, осуществляется при высоких удельных электромагнитных нагрузках, значительно превышающих аналогичные характеристики электромеханических устройств

продолжительного действия [5]. Обеспечить высокие импульсные электромагнитные нагрузки активных токонесущих элементов при относительно низком напряжении, малых потерях и высокой добротности системы возбуждения позволяет криогенное охлаждение. Функционирующие при сверхнизких, как правило гелиевых, температурах сверхпроводящие обмотки надежно работают в условиях постоянных или медленно меняющихся токовых и механических нагрузок. Криорезистивные обмотки (КРО), наоборот, способны выдерживать высокие плотности тока именно в кратковременном режиме [6]. При импульсном возбуждении их электромагнитные параметры могут превышать аналогичные параметры сверхпроводящих обмоток, причем в последние быстрый ввод-вывод тока часто вообще со-

пряжен с потерей сверхпроводящего состояния [7]. У линейного импульсно-индукционного двигателя основным является именно переходный быстропротекающий режим работы, что и обуславливает применение криорезистивных обмоток, для охлаждения которых может использоваться например, жидкий азот — один из наиболее доступных и безопасных хладагентов [8].

Традиционный ЛИИД, как правило, содержит статорную обмотку возбуждения и коаксиально установленный токопроводящий якорь, представляющий собой короткозамкнутую катушку, диск или цилиндр [9,10]. При подключении обмотки к накопителю энергии происходит электродинамическое взаимодействие между индуцированным в якоре и возбуждаемым в обмотке токами, сопровождающееся перемещением якоря с исполнительным элементом, например, бойком ударного механизма.

Рассмотрим влияние фиксированного относительно статорной обмотки индуктивно связанных контура (ИСК), выполненного в виде тонкого диска, на характеристики линейного импульсно-индукционного двигателя с криогенным охлаждением. Этот ИСК коаксиально расположен смежно боковой стороне обмотки противоположно ускоряемому якорю. В традиционном ЛИИД при подключении обмотки к источнику постоянного тока, например, униполярному генератору, с напряжением U_0 токи в обмотке и перемещаемом вдоль оси z якоре, пренебрегая сопротивлением подводящих проводов, удобно описать рекуррентными соотношениями [11]

$$\begin{aligned} i_a(t_{k+1}) = & \frac{U_0}{R_0 + R_a} - \frac{i_b(t_k)v}{R_0 + R_a} \frac{dM_{ab}}{dz} + \\ & + \left[U_0 - (R_0 + R_a) i_a(t_k) - v i_b(t_k) \frac{dM_{ab}}{dz} \right] \times \\ & \times \left[\frac{\chi_1 \exp(\chi_2 \Delta t) - \chi_2 \exp(\chi_1 \Delta t)}{(R_0 + R_a)(\chi_2 - \chi_1)} \right] + \\ & + \frac{\exp(\chi_2 \Delta t) - \exp(\chi_1 \Delta t)}{(1 - K_{ab}^2)(\chi_2 - \chi_1)(L_0 + L_a)L_b} \times \left[\left\{ v M_{ab}(z) \frac{dM_{ab}}{dz} - \right. \right. \\ & \left. \left. - L_b(R_0 + R_a) \right] i_a(t_k) + U_0 L_b + i_b(t_k) \times \right. \\ & \times \left(M_{ab}(z) R_b - v L_b \frac{dM_{ab}}{dz} \right); \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \times \left\{ i_a(t_k) \left[(R_0 + R_a) M_{ab}(z) - v(L_a + L_0) \frac{dM_{ab}}{dz} \right] - \right. \\ & \left. - U_0 M_{ab}(z) + i_b(t_k) \left(M_{ab}(z) v \frac{dM_{ab}}{dz} - (L_a + L_0) R_b \right) \right\}, \end{aligned} \quad (2)$$

где a и b — индексы обмотки и якоря; R_0 , L_0 — сопротивление и индуктивность источника энергии; $i_{a,b}$, $R_{a,b}$, $L_{a,b}$ — ток, сопротивление и индуктивность обмотки и якоря; $M_{ab}(z)$ — коэффициент взаимоиндуктивности между обмоткой и якорем; v — скорость движения якоря; $K_{ab} = M_{ab}(z)(L_a L_b)^{-0.5}$ — коэффициент магнитной связи между обмоткой и якорем; $\Delta t = t_{k+1} - t_k$.

$$\begin{aligned} \chi_{1,2} = & \pm \left[\frac{\left((L_0 + L_a) R_b + (R_0 + R_a) L_b - 2v M_{ab}(z) \frac{dM_{ab}}{dz} \right)^2}{2L_b(1 - K_{ab}^2)(L_0 + L_a)} - \right. \\ & - \left. \frac{R_b(R_0 + R_a) - v^2 \left(\frac{dM_{ab}}{dz} \right)^2}{L_b(1 - K_{ab}^2)(L_0 + L_a)} \right]^{0.5} - \\ & - \frac{(L_0 + L_a) R_b + (R_0 + R_a) L_b - 2v M_{ab}(z) \frac{dM_{ab}}{dz}}{2L_b(1 - K_{ab}^2)(L_0 + L_a)}. \end{aligned}$$

Предполагая, что обмотка полностью неподвижна и не испытывает отдачи, активные элементы и изоляционная прокладка между ними — не сжимаемы, скорость перемещения якоря с исполнительным элементом определяем уравнением

$$\begin{aligned} i_a i_b \frac{dM_{ab}}{dz} = & (m_b + P) \frac{dv}{dt} + K_T v + \\ & + K_P (\Delta z \pm z_0) + 0.5 \gamma \beta v^2, \end{aligned} \quad (3)$$

где m_b , P — масса якоря и исполнительного элемента; K_T — коэффициент динамического трения; K_P — коэффициент упругости буферного элемента (возвратной пружины) с начальным сжатием z_0 ; Δz — перемещение якоря; γ — плотность среды перемещения; β — коэффициент аэродинамического сопротивления движению якоря и исполнительного элемента с максимальным радиусом r_β .

Введение в традиционный ЛИИД индуктивно-связанного контура формально снижает электродинамическую силу отталкивания, действующую на якорь, поскольку левая часть уравнения

(3) уменьшается на величину $i_c i_b \frac{dM_{bc}}{dz}$ (c — индекс ИСК) — силу притяжения якоря к ИСК. Однако из-за изменения токов в обмотке i_a и якоре i_b данное утверждение не представляется столь однозначным [12]. Математическая модель ЛИИД с неподвижным ИСК, определяющая характер изменения токов в системе, может быть представлена в виде

$$i_a(R_0 + R_a) + (L_0 + L_a) \frac{di_a}{dt} + M_{ab}(z) \frac{di_b}{dt} + M_{ac} \frac{di_c}{dt} + v i_b \frac{dM_{ab}}{dz} = U_0; \quad (4)$$

$$i_b R_b + L_b \frac{di_b}{dt} + M_{ab}(z) \frac{di_a}{dt} + M_{bc}(z) \frac{di_c}{dt} + v \left(i_a \frac{dM_{ab}}{dz} + i_c \frac{dM_{bc}}{dz} \right) = 0; \quad (5)$$

$$i_c R_c + L_c \frac{di_c}{dt} + M_{ac} \frac{di_a}{dt} + M_{bc}(z) \frac{di_b}{dt} + v i_b \frac{dM_{bc}}{dz} = 0. \quad (6)$$

Совместное решение уравнений (4)–(6) позволяет свести их к дифференциальному уравнению относительно, например, тока обмотки

$$\begin{aligned} \alpha_3 \frac{d^3 i_a}{dt^3} + \alpha_2 \frac{d^2 i_a}{dt^2} + \alpha_1 \frac{di_a}{dt} + \alpha_0 i_a = \\ = U_0 \left[R_b R_c - v^2 \left(\frac{dM_{bc}}{dz} \right)^2 \right], \end{aligned} \quad (7)$$

где $\alpha_3 = \lambda L_b L_c (L_0 + L_a)$;

$$\begin{aligned} \alpha_2 = L_b L_c q_1 (R_0 + R_a) + (L_0 + L_a) (R_b L_c q_2 + R_c L_b q_3) + \\ + 2v\sqrt{(L_0 + L_a)L_b L_c} \left(s_1 \sqrt{L_c} \frac{dM_{ab}}{dz} + s_3 \sqrt{L_0 + L_a} \frac{dM_{bc}}{dz} \right); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \alpha_1 = R_b R_c (L_0 + L_a) + (R_0 + R_a) (L_b R_c + L_c R_b) - \\ - v^2 \left[(L_0 + L_a) \left(\frac{dM_{bc}}{dz} \right)^2 + L_c \left(\frac{dM_{ab}}{dz} \right)^2 - 2M_{ac} \frac{dM_{ab}}{dz} \times \right. \\ \times \left. \frac{dM_{bc}}{dz} + 2R_c M_{ab}(z) \frac{dM_{ab}}{dz} + 2M_{bc}(z) (R_0 + R_a) \frac{dM_{bc}}{dz} \right]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \alpha_0 = R_b R_c (R_0 + R_a) + \\ + v^2 \left[2 \frac{dM_{ab}}{dz} \frac{dM_{bc}}{dz} - (R_0 + R_a) \left(\frac{dM_{bc}}{dz} \right)^2 - R_c \left(\frac{dM_{ab}}{dz} \right)^2 \right]; \end{aligned}$$

$$\lambda = q_1 + K_{ab} s_1 + K_{ac} s_2; \quad q_1 = 1 - K_{bc}^2;$$

$$q_2 = 1 - K_{ac}^2; \quad q_3 = 1 - K_{ab}^2;$$

$$s_1 = K_{bc} K_{ac} - K_{ab}; \quad s_2 = K_{bc} K_{ab} - K_{ac};$$

$$s_3 = K_{ab} K_{ac} - K_{bc}; \quad K_{ab} = \frac{M_{ab}(z)}{\sqrt{L_a L_b}};$$

$$K_{ac} = \frac{M_{ac}}{\sqrt{L_a L_c}}; \quad K_{bc} = \frac{M_{bc}(z)}{\sqrt{L_b L_c}}.$$

С учетом начальных условий решение для токов в обмотке, якоре и ИСК можно представить в виде

$$\begin{aligned} i_a(t) = \frac{U_0}{\xi} \left[\left(R_b R_c - v^2 \left(\frac{dM_{bc}}{dz} \right)^2 \right) \left[(p_2 - p_3)[p_1(p_2 + p_3) + \right. \right. \\ \left. \left. + p_2 p_3 \exp(p_1 t)] + (p_3 - p_1)[p_2(p_3 + p_1) + \right. \right. \\ \left. \left. + p_1 p_3 \exp(p_2 t)] + (p_1 - p_2)[p_3(p_1 + p_2) + \right. \right. \\ \left. \left. + p_1 p_2 \exp(p_3 t)] \right] \alpha_0^{-1} - \frac{q_1 \Xi}{\lambda(L_0 + L_a)} - b_1 \Psi \right]; \end{aligned} \quad (8)$$

$$i_b(t) = -\frac{U_0}{\xi} \left(b_2 \Psi + \frac{s_1 \Xi}{\lambda \sqrt{L_b(L_0 + L_a)}} \right); \quad (9)$$

$$i_c(t) = -\frac{U_0}{\xi} \left(b_3 \Psi + \frac{s_2 \Xi}{\lambda \sqrt{L_c(L_0 + L_a)}} \right), \quad (10)$$

$$\text{где } \xi = p_1(p_2^2 - p_3^2) + p_2(p_3^2 - p_1^2) + p_3(p_1^2 - p_2^2);$$

$$p_n = \frac{1}{3\alpha_3} \left[2\sqrt{\alpha_2^2 - 3\alpha_1\alpha_3} \cos\left(\frac{2\pi(n-1) + \zeta}{3}\right) - \alpha_2 \right] -$$

корни характеристического уравнения дифференциального уравнения (7); $n = 1, 2, 3$;

$$\zeta = \arccos\left(\frac{4,5\alpha_1\alpha_2\alpha_3 - \alpha_2^3 - 13,5\alpha_0\alpha_3^2}{(\alpha_2^2 - 3\alpha_1\alpha_3)^{1,5}}\right);$$

$$\begin{aligned} \Xi = (p_3^2 - p_2^2) \exp(p_1 t) + (p_1^2 - p_3^2) \exp(p_2 t) + \\ + (p_2^2 - p_1^2) \exp(p_3 t); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Psi = (p_3 - p_2) \exp(p_1 t) + (p_1 - p_3) \exp(p_2 t) + \\ + (p_2 - p_1) \exp(p_3 t); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_1 = \frac{1}{\lambda^2(L_0 + L_a)} \left[\frac{R_0 + R_a}{L_0 + L_a} q_1^2 + \frac{R_b}{L_b} s_1^2 + \frac{R_c}{L_c} s_2^2 + \right. \\ \left. + \frac{2v s_1}{\sqrt{L_b L_c (L_0 + L_a)}} \left(q_1 \sqrt{L_c} \frac{dM_{ab}}{dz} + s_2 \sqrt{L_0 + L_a} \frac{dM_{bc}}{dz} \right) \right]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_2 = \frac{1}{\lambda^2 \sqrt{L_b (L_0 + L_a)}} \left[s_1 \left(\frac{R_0 + R_a}{L_0 + L_a} q_1 + \frac{R_b}{L_b} q_2 \right) + \frac{R_c}{L_c} s_2 s_3 - \right. \\ \left. - \frac{v}{\sqrt{L_b}} \left(\frac{dM_{ab}}{dz} \frac{2K_{ac}^2 K_{bc}^2 - K_{ab}^2 - 1 - K_{bc}s_3 - K_{ac}s_2}{\sqrt{L_0 + L_a}} + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{K_{ac}q_2 + K_{ab}s_3 + K_{bc}s_1}{\sqrt{L_c}} \frac{dM_{bc}}{dz} \right) \right]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_3 = \frac{1}{\lambda^2 \sqrt{L_c (L_0 + L_a)}} \left[s_2 \left(\frac{R_0 + R_a}{L_0 + L_a} q_1 + \frac{R_c}{L_c} q_3 \right) + \frac{R_b}{L_b} s_1 s_3 - \right. \\ \left. - \frac{v}{\sqrt{L_b}} \left(\frac{dM_{ab}}{dz} \frac{K_{bc}q_1 + K_{ab}s_2 + K_{ac}s_1}{\sqrt{L_0 + L_a}} + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{K_{ac}s_3 + K_{bc}s_2 + K_{ab}q_3}{\sqrt{L_c}} \frac{dM_{bc}}{dz} \right) \right]. \end{aligned}$$

Помимо электродинамических параметров характеристики криогенного двигателя сильно зависят от теплофизических параметров и условий охлаждения активных элементов. Так, при быстром нагружении КРО большим током мощность внутренних тепловыделений может динамически превышать мощность теплоотвода хладагентом, вызывая стремительный рост температуры, а значит, и сопротивления. Если плотность теплового потока превысит критическое значение, то происходит дополнительное ускорение роста темпе-

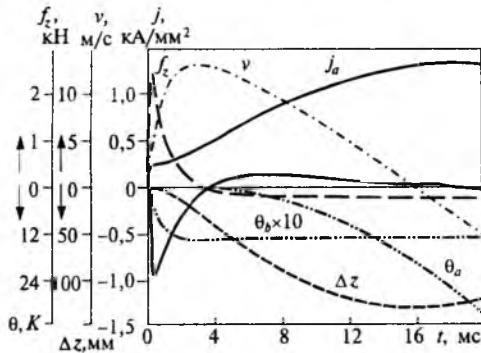


Рис.1.

ратуры из-за изменения характера кипения криогенной жидкости с резким уменьшением теплоотдачи.

Особенность работы криорезистивных обмоток состоит в том, что при нагружении большим током их сопротивление изменяется не только от температуры, но и от возбуждаемого магнитного поля из-за магниторезистивного эффекта [13]. Таким образом, в криогенных ЛИИД возникает сильная взаимозависимость электромагнитных, индукционных, тепловых и механических процессов друг от друга. Так, увеличение механической нагрузки замедляет движение якоря, и взаимодействие активных элементов происходит при более сильной магнитной связи. Из-за этого повышаются амплитуды как индуцированных, так и возбуждаемого токов, сильнее растут магнитные поля и температуры, что в свою очередь вызывает увеличение сопротивления и уменьшение тока возбуждения и т.д. [10].

Рассмотрим процессы в ЛИИД, у которого коаксиально установленные обмотка возбуждения и якорь, выполненный в виде короткозамкнутой катушки, содержат, соответственно 300 и 50 витков медного провода диаметром 0,9 мм и имеют одинаковые радиальные размеры: внутренний диаметр 5 мм, а наружный — 105 мм. Витки у якоря уложены в один аксиальный слой, а у обмотки в 6 слоев с возможностью изменения расстояния между ними. Короткозамкнутая якорная катушка прикреплена к неметаллическому исполнительному элементу массой 100 г, сжимающему при работе пружину с коэффициентом жесткости $K_p = 2 \text{ кН}/\text{м}$ при отсутствии нулевого сжатия. Обмотка возбуждения подключается к источнику постоянного тока с напряжением $U_0 = 300 \text{ В}$. Для криогенного охлаждения активных элементов двигателя используется жидкий азот с температурой кипения 77 К при атмосферном давлении. В качестве критериев эффективности преобразования энергии в ЛИИД будем рассматривать наибольшее перемещение якоря Δz_m при наименьшем росте температуры θ за определенное время при максимальном КПД

$$\eta(t) = \frac{(m_b + P)v^2 + K_p \Delta z^2}{2U_0 \int i_a dt}.$$

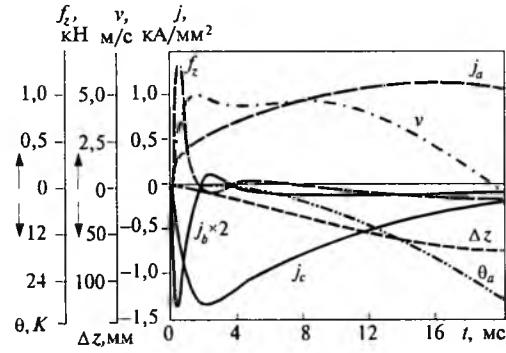


Рис.2.

Если витки уложены плотно и высота КРО составляет $h_a = 6 \text{ мм}$, то коэффициент магнитной связи в исходном состоянии достаточно высок и составляет 0,93 при близком расположении обмотки и якоря. На рис.1 показан характер изменения плотностей тока в обмотке j_a и якоре j_b , усредненный по сечению рост их температур θ_a и θ_b , аксиальная сила, действующая на якорь f_z , под действием которой происходит его перемещение Δz со скоростью v . В таком двигателе ток в якоре имеет импульсный характер в основном из-за быстрого удаления от обмотки с изменением направления протекания после 3,25 мс. Всплеск тока в якоре в свою очередь вызывает нарушение линейности нарастания тока в обмотке в начальный момент. В последующем из-за превышения критической токовой нагрузки начинается лавинный рост температуры обмотки, вызывая сначала замедление, а затем и снижение тока обмотки возбуждения. Импульсный характер тока приводит к импульсу электродинамической силы отталкивания f_z в начале переходного процесса. Однако в дальнейшем на якорь с исполнительным элементом действует тормозная сила как электродинамического, так и механического характера. Максимальное значение КПД составляет 19,8% при 1 мс.

Если к противоположной якорю стороне обмотки прикрепить индуктивно связанный контур, выполненный в виде диска с аналогичными радиальными размерами, то характер процессов в ЛИИД претерпит изменения. На рис.2 и 3 показаны характеристики этого двигателя при

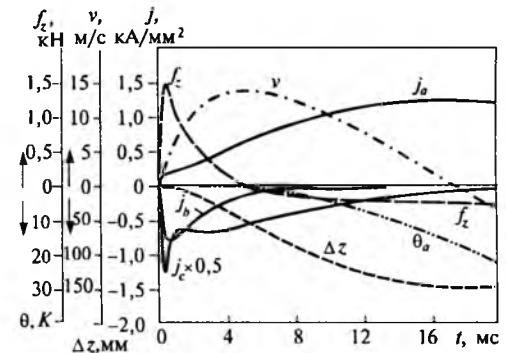


Рис.3.

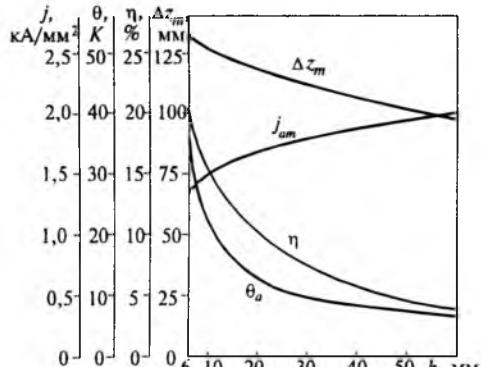


Рис.4.

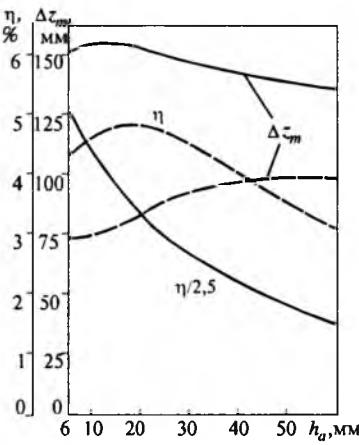


Рис.5.

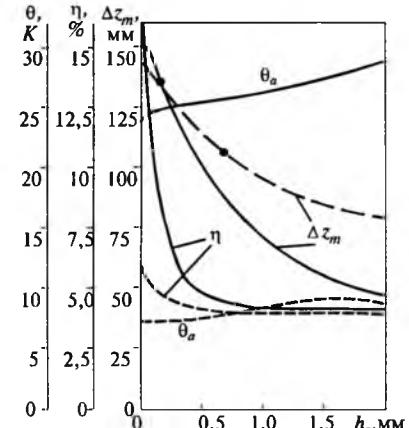


Рис.6.

наличии дискового ИСК высотой, соответственно 1,0 и 0,05 мм. Плотность тока в 1 мм диске j_c имеет максимальное значение 1,36 kA/mm^2 через 2,25 мс после начала работы (рис.2). При этом амплитуда тока в якоре снижается почти на 30%, и, что существенно, изменение направления этого тока происходит в интервале 1,75—3,5 мс. Как следствие, амплитуда силы f_z снижается на 45%, а максимальная скорость — на 61%. Однако за счет меньшего перемещения якоря, а значит, и меньшей противодействующей силы в конце рассматриваемого интервала (20 мс) скорость практически выходит на нулевое значение, в отличие от предыдущего варианта (рис.1). Таким образом, практически все основные механические показатели при введении 1 мм дискового ИСК в традиционный ЛИИД снизились и максимальное КПД упало до 4,3%. К положительным факторам можно отнести лишь снижение темпа роста тока и температуры КРО.

При выполнении ИСК в виде диска высотой 0,05 мм (рис.3) ряд механических характеристик изменяется в лучшую сторону по сравнению с традиционным вариантом двигателя (рис.1). Хотя максимальное значение КПД понижается на 37%, но при этом максимальная скорость повышается с 13,3 до 13,6 м/с, а максимальное перемещение якоря с дополнительным элементом, сжимающим пружину, — с 132 до 152 мм. Такое поведение объясняется прежде всего изменением характера индуцированных токов в якоре и ИСК. Поскольку в диске ток i_c довольно мал (но плотность j_c значительна), то его негативное воздействие на силу отталкивания не столь ощущимо. Но за счет сильной магнитной связи с обмоткой ($K_{ac}=0,96$) и малой индуктивности всплеск тока i_c практически совпадает с пиком тока якоря. И несмотря на уменьшение амплитуды тока в якоре на 16%, дальнейшее его снижение становится более медленным при сохранении направления протекания. В результате и аксиальная сила, несмотря на уменьшение ампли-

туды на 38%, все равно оказывается более эффективной для ускорения якоря из-за более длительного сохранения полярности (до 5 мс). Таким образом, дисковый ИСК высотой 0,05 мм, продлевая силу отталкивания, увеличивает эффективность преобразования энергии в ЛИИД.

Рассмотрим влияние высоты КРО h_a на параметры импульсного двигателя. На рис.4 показано изменение максимальных значений плотности тока обмотки j_{am} , перемещения якоря Δz_m и КПД η , а также рост температуры в конце рассматриваемого интервала θ_a при увеличении аксиальной высоты КРО h_a в традиционном ЛИИД (при отсутствии ИСК). Очевидно, что с увеличением высоты КРО h_a происходит уменьшение коэффициента магнитной связи, что и вызывает снижение механических показателей: Δz_m и η . За счет меньшего влияния индуктивного якорного тока и увеличения охлаждаемой поверхности снижается нагрев обмотки и повышается ее ток. На рис.5 показано изменение максимальных значений перемещения якоря Δz_m и η двигателя, содержащего дисковый ИСК высотой 0,05 мм (сплошные линии) и 1,0 мм (штриховые линии) в зависимости от аксиальной высоты КРО h_a . Во всем диапазоне рассматриваемых параметров наблюдается снижение КПД при введении ИСК в двигатель. Но максимальное перемещение якоря у двигателя с ИСК 0,05 мм больше, а с ИСК 1,0 мм меньше, чем у традиционного варианта двигателя. При этом не происходит плавного уменьшения перемещения Δz_m с увеличением высоты обмотки. Наибольшее перемещение якоря при наличии ИСК 0,05 мм обеспечит не самая компактная обмотка (6 мм), как в традиционном варианте (рис.4), а обмотка высотой 12—15 мм. Если же у двигателя имеется ИСК высотой 1,0 мм, то с увеличением высоты обмотки растет и Δz_m . Как показывает анализ, такое поведение двигателя объясняется тем, что вызываемое ИСК индуктивное повышение тока обмотки с увеличением ее высоты оказывается прева-

лирующим над уменьшением тока якоря, более удаленного от ИСК, чем обмотка.

Таким образом, выяснено, что эффективная работа двигателя в значительной степени определяется параметрами дискового ИСК во взаимосвязи с высотой КРО. На рис.6 представлены кривые роста температуры КРО θ_a , максимальных КПД и перемещений якоря в зависимости от высоты дискового ИСК h_c для двигателей, содержащих компактную обмотку высотой 6 мм (сплошные линии) и обмотку высотой 40 мм (штриховые линии). С уменьшением высоты h_c диска замедляется рост температуры, особенно компактной обмотки, и возрастает КПД, не достигая значений традиционного ЛИИД. Кружками на кривых показаны перемещения якоря при отсутствии ИСК. Таким образом, дисковый ИСК с большой высотой понижает эффективность двигателя, а с малой высотой, наоборот, повышает. Для ЛИИД с обмоткой высотой 40 мм диск ИСК должен быть тоньше 0,65 мм, при высоте обмотки 40 мм диск должен быть тоньше 0,2 мм.

Для проверки основных теоретических результатов и исследования характеристик линейного импульсно-индукционного двигателя была изготовлена и испытана модель, в которой якорь с неметаллическим исполнительным элементом перемещался по горизонтальной направляющей изоляционной трубе при подключении обмотки к сетевому источнику. Обмотка, якорь (до начала движения) и дисковый ИСК охлаждались жидким азотом. При экспериментальных исследованиях регистрировались механические характеристики двигателя и ток обмотки возбуждения. Из-за наличия отдачи и сжатия активных элементов в аксиальном направлении экспериментальные результаты по перемещению якоря с исполнительным элементом, сжимающим пружину, оказались ниже расчетных. Но в целом результаты испытаний подтвердили основные теоретические положения и установленные закономерности и находятся в удовлетворительном согласии с результатами моделирования на ЭВМ быстропротекающих переходных процессов ЛИИД.

Выводы

1. Разработана математическая модель линейного импульсно-индукционного криогенного двигателя при наличии дополнительного индуктивно связанных контура, которая описывает электромагнитные, тепловые и динамические характеристики с учетом теплофизических, магниторезистивных и механических нелинейностей.

2. Введение дискового индуктивно связанного контура в традиционный ЛИИД уменьшает его КПД, но при этом позволяет увеличить скорость и перемещение якоря. Для этого высота диска не

должна превышать определенного значения, иначе происходит снижение всех механических показателей двигателя.

Список литературы

1. Бондалетов В.Н., Иванов Е.Н., Петров С.П. и др. Исследование эффективности ускорения проводников в импульсном магнитном поле соленоида//Журнал прикладной механики и технической физики. 1983. №2. С. 82—86.
2. Liao M., Zabar Z., Czarkowski D at al. On the design of a coilgun as a rapid-fire grenade launcher//IEEE Transactions on Magnetics. 1999. Vol. 35. № 1. P. 148—153.
3. Ряшенцев Н.П., Ряшенцев В.Н. Электромагнитный привод линейных машин. Новосибирск: Наука, 1985.
4. Kitamura K. Japan stellt die Weichen neu//Technische Rundschau. 1989. Vol. 50. S. 32—39.
5. Becherini G., Raugi M., Telini A. Thermal and mechanical stress in induction coilguns//IEEE Transactions on Magnetics. 1999. Vol. 35. № 1. P. 130—135.
6. Болюх В.Ф., Данько В.Г. Работа криорезистивной обмотки возбуждения в кратковременном режиме//Техническая электродинамика. 1990. № 5. С. 36—41.
7. Iwasa Y., Lim Y., Yunus M.I. Stability and quenching in high-temperature superconductors//IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 1995. Vol. 5. № 2. P. 389—392.
8. Болюх В.Ф., Эль Юссеф И.М. Влияние охлаждения жидким азотом на эффективность линейного индукционного ударного двигателя//Техническая электродинамика. 1998. № 2. С. 52—57.
9. Васковский Ю.Н., Рогач С.М., Чемерис В.Т. Математическое моделирование индукционно-динамического ударного двигателя//Техническая электродинамика. 1984. № 4. С. 42—47.
10. Болюх В.Ф. Электромеханическое взаимодействие короткозамкнутого контура и криорезистивной обмотки, возбуждаемой от емкостного накопителя//Электричество. 1994. № 8. С. 40—46.
11. Болюх В.Ф. Электродинамическое взаимодействие криорезистивной обмотки возбуждения с индуктивно связанным контуром//Техническая электродинамика. 1993. № 1. С. 6—12.
12. Болюх В.Ф. Электродинамические процессы в линейном импульсно-индуктивном двигателе с подвижной криорезистивной обмоткой возбуждения//Электротехника. 1999. № 2. С. 3—10.
13. Бертинов А.И., Алиевский Б.Л., Шерстюк А.Г. Электрические потери и сопротивление криогенных индукторов с учетом эффекта магнитосопротивления//Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 1972. № 6. С. 72—77.

Болюх Владимир Федорович — доцент, докторант кафедры «Общая электротехника» Харьковского ГПУ (бывший ХПИ). Окончил физико-технический факультет ХПИ в 1979 г. по специальности «Криогенная техника». В 1987 г. защитил кандидатскую диссертацию в ХПИ по тематике, связанной с разработкой сверхпроводящих магнитных систем для линейных электромеханических преобразователей энергии. Область научных интересов: разработка электромеханических устройств с криорезистивными и сверхпроводящими обмотками возбуждения.

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

К расчету экономического эффекта в преобразовательной схеме «две обратные звезды»

ЗБОРОВСКИЙ И.А., доктор техн. наук

Приведены формулы для оценки экономической эффективности исключения уравнительного реактора и переноса его функции на специальный трансформатор, полученные в результате теоретических и экспериментальных, полученные в результате исследований.

Для того чтобы обеспечить параллельную работу двух трехфазных преобразователей с нулевыми точками Кюблером в начале 30-х годов был предложен уравнительный реактор с ферромагнитным магнитопроводом, между двумя ветвями которого осуществлена «сильная» магнитная связь.

Интерес к схеме без уравнительного реактора появился в связи с публикацией в журнале «Electrical Times» [1], в которой отмечалось, что в электрохимической промышленности широко применяются шестифазные схемы выпрямления как с уравнительным реактором, так и без него. В последнем случае используется трехфазный магнитопровод с двумя боковыми ярмами (иное название: пятистержневой магнитопровод). В дальнейшем была исследована альтернативная модификация — трехфазный магнитопровод с одним боковым ярмом (иное название: четырехстержневой магнитопровод) [2—4].

Ни в одной из известных публикаций нет экономического обоснования выбора одной из трех упомянутых модификаций схемы «две обратные звезды» с уравнительным реактором или без него.

Цель статьи: вывод формул, необходимых для экономической оценки рассматриваемых схем, т.е. для определения:

1. Массы магнитопроводов и обмоточной меди.
2. Потери в мощности в магнитопроводе и меди обмоток.

На основании указанной в п.п. 1,2 информации, а также технологии изготовления может быть решен вопрос о выборе оптимальной схемы.

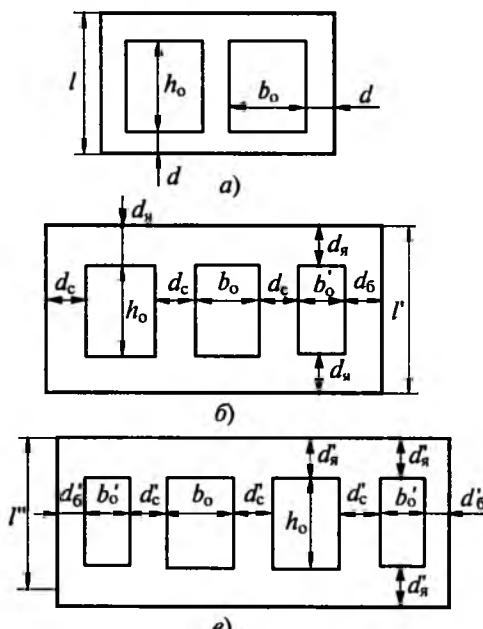
Поставленная задача решается с использованием заводской методики расчета трансформаторно-реакторного оборудования, упомянутой литературы и экспериментального исследования схемы «две обратные звезды» без уравнительного реактора.

Размеры магнитопровода трансформаторов для схемы без уравнительного реактора определяются по таблице.

Значения коэффициентов K_b , K_c , K_a второй строки таблицы при умножении на диаметр d (рисунок, а) дают диаметры: d_b , d_c , d_a (рисунок, б). При умножении значений указанных коэффициентов третьей строки таблицы на d получим диаметры: d'_b , d'_c , d'_a (рисунок, в). Значения коэффициентов в K_b и K_a даны в виде дроби, числитель которой соответствует диодной схеме, а знаменатель — тиристорной. Коэффициент K_{b1} определен для прямоугольного сечения вертикальной части бокового ярма в отличие от K_b — для круглого сечения. $K_{b1}d$ — меньший размер, а d_a , d'_a — большие размеры прямоугольного сечения. Так как на вертикальной части бокового ярма нет обмотки, то технологичнее ее выполнить в виде прямоугольного сечения.

При определении коэффициентов по таблице приняты следующие соображения:

1. Амплитуда магнитной индукции в любом из участков магнитной цепи не превосходит значения в магнитопроводе трансформатора с уравнительным реактором.



Сечение магнитопровода трансформаторов для схем:
а — с уравнительным реактором; б — без уравнительного реактора с одним боковым ярмом; в — без уравнительного реактора с двумя боковыми ярмами

Рисунок	K_b	K_{b1}	K_c	K_a
б	0,594/1,059	0,262/0,786	1,059	1,059/1,12
в	0,42/0,749	0,1308/0,416	1,059	1,059

2. Амплитуда магнитной индукции в вертикальной части бокового ярма (рисунок, б) для тиристорной схемы в случае равенства площади поперечного сечения указанной части и основных стержней

$$B_{\text{в.б}} = 0,447 B_{\text{и}}, \quad (1)$$

где $B_{\text{и}}$ — амплитуда магнитной индукции в трансформаторе для схемы с уравнительным реактором.

Значение амплитуды магнитной индукции в вертикальной части бокового ярма близко к условию равенства потерь мощности в стали при частотах 50 и 150 Гц и синусоидальной индукции. При этом магнитная индукция при частоте 50 Гц принята равной ее значению в трансформаторе для схемы с уравнительным реактором. Действительно,

$$\frac{B_{150}}{B_{50}} = \left(\frac{1}{3}\right)^{1,56/2,2} = 0,459. \quad (2)$$

3. Соотношение (1) выполняется и для трансформатора без уравнительного реактора, предназначенног для диодной схемы. Отличие от тиристорной схемы заключается в том, что сечение вертикальной части бокового ярма меньше. Это видно из таблицы. Для диодной схемы $K_b = 0,594$ вместо 1,059 — для тиристорной.

4. Сумма магнитных потоков в двух боковых ярмах (рисунок, в) равна потоку в боковом ярме (рисунок, б).

5. Если обозначить фазы магнитопровода (рисунок, б) слева направо *ABC*, то в основных ярмах между фазами *BC* происходит сложение магнитных потоков фаз *A* и *B*. Это определяет поперечное сечение указанных ярм для тиристорной схемы: их сечение в 1,12² раза больше (таблица), чем у трансформатора для схемы с уравнительным реактором (рисунок, а). Поэтому поперечное сечение ярм между фазами *A* и *B* (рисунок, б) по конструктивным соображениям при-

ходится завышать — $\left(\frac{1,12}{1,059}\right)^2$ (таблица). Соответственно амплитуда магнитной индукции в указанных ярмах уменьшается по сравнению с тем же параметром трансформатора (рисунок, а) для схемы с уравнительным реактором.

Массы магнитопроводов (рисунок, а, б, в) соответственно пропорциональны их объемам

$$V = (3l + 4b_o)S_{\text{i}};$$

$$V_{16} = [l'(3K_c^2 + K_b^2) + K_{\text{я}}^2(4b_o + b'_o)]S_{\text{i}};$$

$$V_{26} = [l''(3K_c^2 + 2K_b^2) + K_{\text{я}}^2(4b_o + 2b'_o)]S_{\text{i}}, \quad (3)$$

где S_{i} — площадь поперечного сечения магнитопровода трансформатора для схемы с уравнительным реактором.

Массы магнитопроводов с одним и двумя боковыми ярмами сравнивались по указанному параметру с трансформатором ТДНПУ-2500/10-ПУ3, предназначенным для схемы с уравнительным ре-

актором (выпрямленное напряжение 150 В, ток нагрузки 50 кА).

На основании таблицы и выражений (3) рассчитанные массы магнитопроводов: с одним и двумя боковыми ярмами для тиристорных преобразователей соответственно равны 1,57 и 1,558 о.е. (за базовую величину принята масса магнитопровода трансформатора ТДНПУ-25000/10-ПУ3);

— для диодного преобразователя 1,295; 1,36.

Из сравнения масс магнитопроводов для тиристорного преобразователя видно, что они мало отличаются: масса с двумя боковыми ярмами на 0,76% меньше. Более существенное отличие для диодного преобразователя: масса с двумя боковыми ярмами на 5% больше.

Определяющими факторами, влияющими на соотношение масс, являются повышенное сечение ярем трансформатора с одним боковым ярмом для тиристорного преобразователя (рисунок, б) и наличие двух боковых ярем в магнитопроводе (рисунок, в).

С учетом того, что конструкция магнитопровода (рисунок, б) проще и технологичнее, чем альтернативная (рисунок, в), в дальнейшем рассматриваются потери мощности в магнитопроводе с одним боковым ярмом.

Магнитопровод с одним боковым ярмом (рисунок, б) в дальнейшем изложении сравнивается по потерям мощности с исходным базовым трансформатором, предназначенным для схемы с уравнительным реактором (рисунок, а). Выводятся формулы для определения потерь в отдельных частях магнитопровода, которые затем суммируются. Указанные потери при условии равенства удельных потерь [5]:

$$p \sim \left(\frac{B_{\text{~}}}{B_{\text{i}}}\right)^{2,2} \left(\frac{f}{f_{\text{i}}}\right)^{1,56} \frac{m}{m_{\text{i}}} n, \quad (4)$$

где

$$n = \left(1 - \frac{p_{\text{rc}}}{p_{\text{c}}}\right) \left[\left(\frac{K_{\text{Ф.и}}}{1,11}\right)^2 - 1 \right] + 1, \quad (5)$$

B — амплитуда магнитной индукции в части магнитопровода с боковым ярмом; f_{i}, f — частота магнитных индукций в базовом трансформаторе и в части магнитопровода с боковым ярмом; m_{i}, m — массы магнитопровода базового трансформатора и части магнитопровода с боковым ярмом; p_{c} — потери при синусоидальном законе магнитной индукции с фактической амплитудой и частотой в магнитопроводе с боковым ярмом; p_{rc} — то же, но потери на гистерезис; $K_{\text{Ф.и}}$ — коэффициент формы напряжения, индуцированного в обмотке на соответствующей части магнитопровода с боковым ярмом.

Представляется возможным выделить составляющие потерь мощности в следующих частях магнитопровода (рисунок, б):

1. Вертикальная и горизонтальные части бокового ярма.
 2. Основные ярма, примыкающие и не примыкающие к боковому ярму.
 3. Основные стержни.
- Для вертикальной части бокового ярма согласно (4) и с учетом (1)

$$p_{\text{в.б}} = \left(\frac{B_{\text{в.б}}}{B_i} \right)^{2,2} \left(\frac{f_{\text{в.б}}}{f_i} \right)^{1,56} \frac{K_6^2(h_0 + 2d_s)}{3l + 4b_o} n_{\text{в.б}} p_i = \\ = 0,944 n_{\text{в.б}} \frac{K_6^2(h_0 + 2d_s)}{3l + 4b_o} p_i, \quad (6)$$

где p_i — потери мощности в магнитопроводе трансформатора для схемы с уравнительным реактором.

Вычислим $n_{\text{в.б}}$ по (5). Для этого найдем

$$\frac{p_{\text{fc}}}{p_c} = \left(\frac{p_{\text{fc}}}{p_c} \right)_{f_i=50 \text{ Гц}} \left(\frac{f_i}{f_{\text{в.б}}} \right)^{0,56} = \frac{0,25}{3^{0,56}} = 0,135, \quad (7)$$

где отношение потерь на гистерезис p_{fc} к потерям в стали p_c равно 0,25 для стали 3408 толщиной 0,3 мм [6].

Из (7) согласно (5) для тиристорного преобразователя

$$n_{\text{в.б}} = (1 - 0,135) \left(\frac{1}{1,11^2} - 1 \right) + 1 = 0,837. \quad (8)$$

Для диодного преобразователя $K_{\phi,i} = 1,15$ и $n_{\text{в.б}} = 1,063$.

Потери мощности в горизонтальных частях бокового ярма

$$p_{\text{г.б}} = 1,888 n_{\text{г.б}} \left(\frac{K_6}{K_y} \right)^{4,4} \frac{K_y^2 b_o'}{3l + 4b_o} p_i, \quad (9)$$

где $n_{\text{г.б}} = n_{\text{в.б}}$.

Потери мощности в основных ярмах, примыкающих к боковому ярму,

$$p_y' = 2n_y' \frac{K_y^2 b_o}{3l + 4b_o} p_i, \quad (10)$$

где соответственно для тиристорного и диодного преобразователей $n_y' = 1; 1,47$.

Потери в основных ярмах, не примыкающих к боковому ярму,

$$p_y'' = 2n_y'' \frac{K_y^{4,4}}{K_y^{2,4}} \frac{b_o}{3l + 4b_o} p_i, \quad (11)$$

где $n_y'' = 1,384; 1$ соответственно для тиристорного и диодного преобразователей.

Потери мощности в основных стержнях

$$p_c = 3n_c \frac{K_c^2 l'}{4b_o + 3l} p_i, \quad (12)$$

где $l' = h_0 + 2K_y d$; $n_c = n_y''$.

Потери в магнитопроводе

$$p = p_{\text{в.б}} + p_{\text{г.б}} + p_y' + p_y'' + p_c. \quad (14)$$

Из-за увеличения диаметра основных стержней трансформатора растет средняя длина витка первичной и вторичной обмоток. Поэтому потери в меди обмоток (основные и добавочные) увеличиваются на

$$p_d = p_m (K_c - 1). \quad (15)$$

В виде примера рассчитаем увеличение потерь в магнитопроводе с боковым ярмом и в меди обмоток трансформатора в схеме без уравнительного реактора.

Базовый трансформатор ТДНПУ-25000/10-ПУЗ содержит четыре шестифазные вентильные обмотки для питания четырех секций тиристорного преобразователя. Соответственно в трансформатор встроено четыре уравнительных реактора.

Параметры базового трансформатора и уравнительных реакторов

Масса стали магнитопровода трансформатора, кг	9323
Потери в стали его магнитопровода p_i , кВт	~16
Масса обмоточной меди на трансформаторе, кг	4203
Потери в меди обмоток трансформатора, кВт	156,7
Масса стали магнитопровода реактора, кг	419
Потери в магнитопроводе реактора, кВт	1,76
Масса меди на один реактора, кг	205
Потери в меди одного реактора, кВт	6,62
Высота магнитопровода трансформатора l , мм	2310
Диаметр стержней d , мм	450
Высота окна магнитопровода h_0 , мм	1410
Ширина окна магнитопровода b_o , мм	439
Ширина окна, образованного боковым ярмом b_o , мм	240,2

Вычисляем составляющие потерь в магнитопроводе трансформатора с боковым ярмом для схемы без уравнительного реактора по формулам (6)–(12) (базовое значение мощности — потери в магнитопроводе трансформатора для схемы с уравнительными реакторами):

$$p_{\text{в.б}} = \frac{0,944 \cdot 0,837 \cdot 1,059^2 (1410 + 2 \cdot 1,12 \cdot 450)}{3 \cdot 2310 + 4 \cdot 439} = 0,247 \text{ о.е.}$$

$$p_{\text{г.б}} = 1,888 \cdot 0,837 \left(\frac{1,059}{1,12} \right)^{4,4} \frac{1,12^2 \cdot 240,2}{8685,6} = 0,0428 \text{ о.е.}$$

$$p_y' = 2 \frac{1,12^2 \cdot 439}{8685,6} = 0,1268 \text{ о.е.}$$

$$p_y'' = 2 \cdot 1,384 \frac{1,059^{4,4} \cdot 439}{1,12^{2,4} \cdot 8685,6} = 0,137 \text{ о.е.}$$

$$p_c = 3 \cdot 1,384 \frac{1,059^2 \cdot 2418}{8685,6} = 1,296 \text{ о.е.}$$

Потери в стали магнитопровода с боковым ярмом по (14)

$$p = 1,8496 \text{ о.е.} = 29,59 \text{ кВт.}$$

Сумма потерь в трансформаторе для схемы без уравнительных реакторов

$$p_{\Sigma} = 29,59 + 156,7 + 9,245 = 195,53 \text{ кВт,}$$

где последнее слагаемое в сумме рассчитано по (15).

Суммарные потери в трансформаторе и уравнительных реакторах

$$p' = 16 + 156,7 + 4 \cdot 1,76 + 4 \cdot 6,62 = 206,22 \text{ кВт.}$$

Следовательно, потери мощности в схеме без уравнительных реакторов уменьшились на 10,69 кВт.

Рассчитаем превышение стоимости активных материалов в схеме без уравнительных реакторов.

Для этого найдем стоимость электротехнической стали на магнитопровод трансформатора с боковым ярмом

$$\frac{1,57 \cdot 9323}{0,95} 13,5 = 208000 \text{ руб.}$$

Здесь и ниже цены даны на конец 1998 г.

Дополнительный расход обмоточной меди на трансформатор без уравнительных реакторов составляет 248 кг. Стоимость электротехнической стали и дополнительный расход меди на трансформатор составляют 219160 руб.

Стоимость материалов, включающих магнитопровод трансформатора + магнитопроводы реакторов + обмоточную медь реакторов,

$$\frac{9323 + 4 \cdot 419}{0,95} 13,5 + 4 \cdot 205 \cdot 45 = 193202 \text{ руб.}$$

Стоимость ошиновки внутри трансформатора 10253 руб.

Итого: 203455 руб.

Следовательно, система без уравнительного реактора на 15705 руб. дороже.

Выводы

1. Получены формулы для расчета размеров, массы магнитопровода и потерь мощности транс-

форматора в схеме без уравнительного реактора, которые могут быть использованы при расчете экономического эффекта.

2. Конструкция магнитопровода с одним боковым ярмом, в особенности для диодных преобразователей, более предпочтительна, чем с двумя боковыми ярмами.

3. Конкретный пример масляного трансформатора ТДНПУ-25000/10ПУЗ показал, что потери электроэнергии в схеме без уравнительных реакторов несколько меньше, а стоимость активных материалов несколько больше.

Несомненное преимущество такой схемы — более высокая надежность, которая достигается исключением четырех реакторов и сложной ошиновки внутри трансформатора.

Список литературы

1. Низковольтные выпрямители для электрохимической промышленности// Электротехническая промышленность. Сер. Преобразовательная техника. М.: Информмэлектро. 1976. Вып. 7(78).

2. Зборовский И.А. Состояние разработок вентильных преобразователей по схеме «две обратные звезды»// Электричество. 1994. № 6.

3. Захаревич С.В., Исакова Е.Н., Кузнецова В.В., Светоносов В.П. Особенности проектирования преобразовательных трансформаторов для схемы «две обратные звезды без уравнительного реактора»// Тез. докладов «Силовая преобразовательная техника и ее применение в народном хозяйстве. Миасс, 1989.

4. Зборовский И.А. Современное состояние и развитие теории электромагнитных процессов в шестифазных преобразователях с двумя параллельными трехфазными системами// Тез. докладов «Силовая полупроводниковая техника и ее применение в народном хозяйстве. Миасс, 1989.

5. Лейтес Л.В. Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов. М.: Энергия, 1981.

6. Холоднокатаные электротехнические стали/Под ред. Молотилова Б.В. М.: Металлургия, 1989.

Журнал готов принять к публикации рекламный материал, отражающий новые разработки, исходя из следующей ориентировочной стоимости:

обложка —	3-я сторона — 4000 руб.
	4-я сторона — 5000 руб.
внутри журнала —	1 полоса — 3000 руб.
	1/2 полосы — 1500 руб.
	1/4 полосы — 800 руб.
	1/8 полосы — 500 руб.

Посреднические услуги в организации рекламы, принятой журналом, оплачиваются — 10% от стоимости рекламы (в рублевом эквиваленте).

ЭЛЕКТРОПРИВОД

Синтез статической СПР скорости двухмассового неустойчивого, под влиянием отрицательного вязкого трения, объекта методом полиномиальных уравнений

АКИМОВ Л.В., доктор техн. наук, проф., КОЛОТИЛО В.И., инж.

Харьковский ГТУ

Для электроприводов постоянного тока с неустойчивой двухмассовой механической частью при критических значениях отрицательного вязкого трения в характеристике нагрузки методом полиномиальных уравнений с использованием стандартного распределения по Баттерворту синтезирована статическая система подчиненного регулирования, обеспечивающая требуемое качество переходных процессов. Найденный тип регулятора скорости позволяет использовать традиционную обратную связь по скорости двигателя и обеспечивает работу электропривода как на падающем, так и на восходящем участках характеристики нагрузки при изменении момента инерции механизма не менее, чем в четыре раза. Получены аналитические зависимости ошибок по управляемому и возмущающему воздействиям.

В [1] имеется значительное число публикаций, посвященных решению проблемы обеспечения заданного качества управления двухмассовым электромеханическим объектом (ДЭМО), нелинейная реактивная нагрузка которого включает положительное, в том числе равное нулю, и отрицательное вязкое трение (ОВТ), характеризуемое коэффициентом жесткости механической характеристики механизма $\pm\beta_c$. Причины и условия динамической неустойчивости данного объекта при $\beta_c < 0$ раскрыты в [2]. Там же рассмотрены способы стабилизации и формы существования автоколебательных режимов, ухудшающих качество технологического процесса и снижающих из-за поломок кинематических звеньев надежность работы электропривода.

В [3] для расширения зон динамической устойчивости рассматриваемого ДЭМО предложено использовать различные жесткие и гибкие обратные связи по току (моменту) двигателя, упругому моменту, скорости первой и второй масс. Однако полученные результаты носят частный характер, зависящий от отношения $b = \beta_c / |\beta|$ жесткости механической характеристики механизма к модулю жесткости $\beta = (C\Phi)^2 / R$, механической характеристики электропривода, а также от известного параметра $m = T_m / T_e$.

Решению данной проблемы способствует использование принципов модального управления [4–7]. Вместе с тем это ведет к существенному усложнению системы из-за необходимости использования наблюдающих устройств [4, 5, 8]. К тому же работа системы модального управления с наблюдателем сопровождается большими бросками упругого момента при резких изменениях нагрузки [6].

Таким образом, можно прийти к выводу, что проблема управления неустойчивым ДЭМО, в силу влияния ОВТ, сохраняет свою актуальность.

В связи с этим представляет интерес, не выходя за рамки принципа последовательной коррекции, как это сделано для неустойчивого одномассового объекта при нелинейном характере нагрузки [9], найти структуру и параметры регулятора скорости (РС) при традиционной настройке регулятора тока (РТ) системы подчиненного регулирования (СПР) для случая, когда жесткость механической характеристики нагрузки $\beta_c < 0$ также приводит к неустойчивости исходного ДЭМО — двигателя постоянного тока совместно с исполнительным механизмом.

Цель исследования состоит в синтезе регулятора скорости, обеспечивающего традиционный для СПР характер переходных процессов в неустойчивом ДЭМО, методом полиномиальных уравнений, предложенным в [10].

Структурная схема СПР скорости ДЭМО с настроенным на модульный оптимум контуром тока и неустойчивой механической частью приведена на рис.1. В соответствии с ней при $\beta_c < 0$, пренебрежении влиянием ЭДС двигателя и представлении контура тока в виде звена первого порядка с постоянной времени $2T_\mu$, найдена передаточная функция объекта регулирования контура скорости, имеющая вид

$$W_{ob}(p) = \frac{\omega_1(p)}{U_{PC}(p)} \frac{\frac{(C\Phi)K_{dc}}{K_{pt}\beta_c} \left(\frac{\gamma}{\Omega_{12}^2} p^2 - \frac{\beta_c}{G_{12}} p + 1 \right)}{(2T_\mu p + 1) \left(\frac{T_c^*}{\Omega_{12}^2} p^3 - \frac{\gamma}{(\gamma-1)\Omega_{12}^2} p^2 + T_c^* p - 1 \right)}, \quad (1)$$

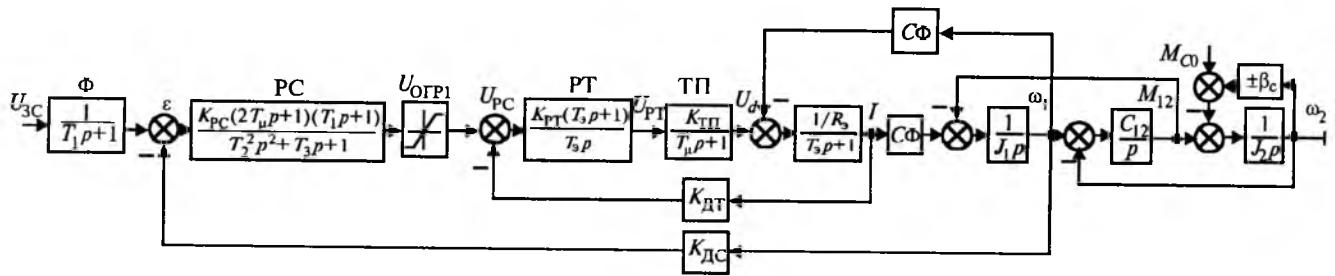


Рис.1. Структурная схема СПР скорости неустойчивым, под влиянием ОВТ, двухмассовым электромеханическим объектом

где $\gamma = \frac{J_1 + J_2}{J_1}$ — параметр, характеризующий соотношение масс; $\Omega_{12} = \sqrt{C_{12}\gamma/J_2}$ — резонансная частота упругих колебаний, с^{-1} ; $T_c^* = (J_1 + J_2)/|\beta_c|$ — механическая постоянная времени, с; $K_{\text{дт}}$, $K_{\text{дс}}$ — коэффициенты усиления датчиков тока и скорости.

Из (1) следует неустойчивость объекта, а поэтому для синтеза РС воспользуемся методом полиномиальных уравнений [10]. Согласно этому методу передаточную функцию объекта (1) представим как

$$W_{06}(p) = \frac{P(p)}{Q(p)} = \frac{K_0 P_{k+}(p) P_{n+}(p) P_{-}(p)}{Q_{k+}(p) Q_{n+}(p) Q_{-}(p) p^s}, \quad (2)$$

где $K_0 = (C\Phi)K_{DC}/K_{DT}\beta_c$ — коэффициент усиления объекта; $P_{k+}(p)$, $Q_{k+}(p)$ — полиномы, имеющие в качестве своих нулей только левые нули и полюсы объекта, компенсируемые при помощи регулятора; $P_{n+}(p)$, $Q_{n+}(p)$ — полиномы, содержащие только левые нули и полюсы объекта, в компенсации которых нет необходимости; $P_-(p)$, $Q_-(p)$ — полиномы, содержащие правые и нейтральные нули и полюсы, за исключением расположенных в точке $p = 0$, компенсация которых неприемлема из-за нарушения условия грубости; $s = 0,1,2$ — количество полюсов объекта в точке $p = 0$.

Из сравнения (1) и (2) следует, что

$$\begin{aligned} P_{k+}(p) &= 1; \quad P_{n+}(p) = 1; \quad P_-(p) = \frac{\gamma}{\Omega_{12}^2} p^2 - \frac{\beta_c}{C_{12}} p + 1; \\ Q_{k+}(p) &= 2 T_\mu p + 1; \quad Q_+(p) = 1; \\ Q_-(p) &= \frac{T_c^*}{\Omega_{12}^2} p^3 - \frac{\gamma}{(\gamma-1)\Omega_{12}^2} p^2 + T_c^* p - 1; \quad s = 0. \quad (3) \end{aligned}$$

На основании метода полиномиальных уравнений примем передаточную функцию РС в виде

$$W_{\text{PC}}(p) = \frac{Q_{k+}(p)M(p)}{K_0 P_{k+}(p)N(p)p^{v-s}}, \quad (4)$$

где v — желаемый порядок астатизма замкнутой системы регулирования скорости; $M(p)$, $N(p)$ — неизвестные полиномы; они определяются из полиномиального уравнения синтеза

$$M(p)P_-(p)P_{++}(p) + N(p)Q_-(p)Q_{++}(p)p^v = G(p), \quad (5)$$

в котором $G(p)$ — характеристический полином замкнутой системы, задаваемый исходя из условия обеспечения желаемого характера переходного процесса, в частности, отвечающего одному из известных стандартных распределений [11].

Определим обозначаемые в виде $| \cdot |$ степени полиномов, входящих в (2), на основании передаточной функции объекта (1) и ее составляющих (3). Получим:

$$|P| = 2; \quad |P_{k+}| = 0; \quad |P_{n+}| = 0; \quad |P_-| = 2; \\ |Q| = 4; \quad |Q_{k+}| = 1; \quad |Q_{n+}| = 0; \quad |Q_-| = 3.$$

Тогда для степени полиномов $M(p)$, $N(p)$ и $Q(p)$ при синтезе статической системы регулирования скорости с $v = 0$ будем иметь:

$$|M| = |Q_-| + |Q_{\pi_+}| + v - 1 = 3 + 0 + 0 - 1 = 2;$$

$$|N| = |Q| - |P_{k+}| - 1 = 4 - 0 - 1 = 3; \quad (6)$$

$$|G| = |M| + |N| + 1 = 2 + 3 + 1 = 6.$$

Для упрощения реализации и настройки РС уменьшим на единицу степени полиномов $M(p)$, $N(p)$ и $G(p)$. Эта возможность предусматривается в методе полиномиальных уравнений [10]. Вместе с тем данная процедура исключает свободный выбор эквивалентной малой постоянной времени T_0 замкнутой системы или, что тоже самое, среднегеометрического корня $\omega_0 = 1/T_0$ характеристического полинома $G(p)$.

Исходя из сказанного, при окончательном выборе степени полиномов $|M| = 1$, $|N| = 2$ и $|G| = 5$, запишем уравнение синтеза (5) в развернутой форме

$$\begin{aligned}
 & (m_1 p + m_0) \left(\frac{\gamma}{\Omega_{12}^2} p^2 - \frac{\beta_c}{C_{12}} p + 1 \right) + (n_2 p^2 + n_1 p + n_0) \times \\
 & \times \left(\frac{T_c^*}{\Omega_{12}^2} p^3 - \frac{\gamma}{(\gamma - 1)\Omega_{12}^2} p^2 + T_c^* p - 1 \right) = \\
 & = T_0^5 p^5 + \alpha_4 T_0^4 p^4 + \alpha_3 T_0^3 p^3 + \alpha_2 T_0^2 p^2 + \alpha_1 T_0 p + 1, \quad (7)
 \end{aligned}$$

где $\alpha_1 - \alpha_4$ — коэффициенты, соответствующие выбранному стандартному распределению.

Например, для фильтра Баттервортса [11]:

$$\alpha_1=3,24; \quad \alpha_2=5,24; \quad \alpha_3=5,24; \quad \alpha_4=3,24.$$

Представим левую часть уравнения (7) в виде

слагаемых по мере убывания степени p

$$\begin{aligned} & \frac{n_2 T_c^*}{\Omega_{12}^2} p^5 + \left(\frac{n_1 T_c^*}{\Omega_{12}^2} - \frac{n_2 \gamma}{(\gamma-1) \Omega_{12}^2} \right) p^4 + \\ & + \left(\frac{m_1 \gamma}{\Omega_{12}^2} - \frac{n_1 \gamma}{(\gamma-1) \Omega_{12}^2} + T_c^* n_2 + \frac{n_0 T_c^*}{\Omega_{12}^2} \right) p^3 + \\ & + \left(\frac{m_0 \gamma}{\Omega_{12}^2} - \frac{m_1 \beta_c}{C_{12}} - \frac{n_0 \gamma}{(\gamma-1) \Omega_{12}^2} + n_1 T_c^* - n_2 \right) p^2 + \\ & + \left(m_1 - \frac{m_0 \beta_c}{C_{12}} + n_0 T_c^* - n_1 \right) p + (m_0 - n_0). \end{aligned} \quad (8)$$

Сравним при степенях p^5 , p^4 , p^3 , p^2 и p^0 полученные выражения (8) с правой частью уравнения (7) и найдем значения коэффициентов m_i и n_i полиномов $M(p)$ и $N(p)$:

$$n_2 = \frac{\Omega_{12}^2}{\omega_0^5 T_c^*}, \quad (9)$$

$$n_1 = \frac{\Omega_{12}^2}{T_c^*} \left[\frac{\alpha_4}{\omega_0^4} + \frac{\gamma}{(\gamma-1)\omega_0^5 T_c^*} \right], \quad (10)$$

$$\begin{aligned} n_0 = & \frac{\Omega_{12}^2 C_{12}}{[\gamma \beta_c - T_c^* C_{12}(\gamma-1)]} \left\{ \frac{\alpha_3}{\omega_0^3} - \frac{\alpha_1 \gamma}{\omega_0 \Omega_{12}^2} - \frac{\gamma \beta_c}{\Omega_{12}^2 C_{12}} + \right. \\ & \left. + \left(\frac{\gamma}{(\gamma-1) \Omega_{12}^2} - \frac{\gamma}{\Omega_{12}^2} \right) n_1 - T_c^* n_2 \right\}; \end{aligned} \quad (11)$$

$$m_1 = \frac{\Omega_{12}^2}{\gamma} \left(\frac{\alpha_3}{\omega_0^3} - \frac{T_c^*}{\Omega_{12}^2} n_0 - T_c^* n_2 + \frac{\gamma}{(\gamma-1) \Omega_{12}^2} n_1 \right); \quad (12)$$

$$m_0 = 1 + n_0, \quad (13)$$

где n_2 , c^2 ; n_1 , c , m_1 , c .

Для определения среднегеометрического корня ω_0 синтезируемой статической СПР скорости двухмассового электропривода, значение которого в данном случае оказывается зависимым от параметров неустойчивой механической части, воспользуемся сомножителем уравнения (8), стоящим при p^2 . Подставим в него найденные значения коэффициентов (9)–(13). В результате поиск возможных для реализации значений ω_0 должен быть осуществлен по уравнению

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\gamma}{\Omega_{12}^2} - \frac{\gamma \beta_c A}{C_{12} \Omega_{12}^2} \right) \omega_0^5 - \alpha_4 \frac{\gamma A}{\Omega_{12}^2} \omega_0^4 - \alpha_3 \omega_0^3 + \\ & + \alpha_2 \left(A - \frac{\beta_c \Omega_{12}^2}{C_{12} \gamma} \right) \omega_0^2 + \alpha_1 \left(\Omega_{12}^2 - \frac{\beta_c \Omega_{12}^2}{(\gamma-1) T_c^* C_{12}} + \right. \\ & + \left. \frac{A \gamma (2-\gamma)}{(\gamma-1) T_c^*} \right) \omega_0 + \left(\frac{\gamma \Omega_{12}^2}{(\gamma-1) T_c^*} - \frac{\Omega_{12}^2}{T_c^*} + \frac{\beta_c \Omega_{12}^2}{C_{12} \gamma} - \right. \\ & \left. - \frac{\beta_c \Omega_{12}^2 \gamma}{(\gamma-1)^2 T_c^* C_{12}} - A \Omega_{12}^2 + \frac{A \gamma^2 (2-\gamma)}{(\gamma-1)^2 T_c^*} \right) = 0; \end{aligned}$$

$$A = \frac{C_{12} \gamma - \frac{C_{12} \gamma}{\gamma-1} + \frac{\beta_c T_c^* \Omega_{12}^2}{\gamma}}{\gamma \beta_c - T_c^* C_{12} (\gamma-1)}. \quad (14)$$

Допустим, что уравнение (14) имеет хотя бы одно вещественное положительное решение ω_{0r} . Тогда передаточную функцию РС на основании (4) представим в виде:

$$W_{PC}(p) = \frac{K_{PC}(2T_\mu p + 1)(T_1 p + 1)}{T_2^2 p^2 + T_3 p + 1} \quad (15)$$

или

$$W_{PC}(p) = \frac{K_{PC}(2T_\mu p + 1)(T_1 p + 1)}{(T_2^* p + 1)(T_3^* p + 1)}, \quad (16)$$

где

$$K_{PC} = \frac{m_0}{n_0 K_0} = \frac{m_0 K_{DT} \beta_c}{n_0 K_{DC} (C\Phi)} \quad (17)$$

— коэффициент усиления регулятора;

$$T_1 = \frac{m_1}{m_0}; \quad T_3 = \frac{n_1}{n_0}; \quad T_2^2 = \frac{n_2}{n_0} \quad (18)$$

— постоянные времени, с, и кроме того

$$T_{2,3}^* = \frac{T_3}{2} \pm \sqrt{\frac{T_3^2}{4} - T_2^2}, \quad (19)$$

что обосновывает возможность разложения полинома знаменателя (15) в случае $T_3 > 2T_2$ на два простых сомножителя знаменателя (16).

Таким образом, при нулевом астатизме замкнутой системы регулирования скорости в качестве РС следует использовать ПД²-регулятор с апериодическим фильтром второго порядка или ПИП²-регулятор.

Принципиальная схема ПИП²-РС с блоком ограничения БО приведена на рис.2. Передаточная функция регулятора, выраженная через его параметры

$$\begin{aligned} W_{PIP^2-PC}(p) = & \frac{R_{acc} + R_{sh}}{R_{ac}} \times \\ & \times \frac{\left(\frac{R_{acc} R_{sh}}{R_{acc} + R_{sh}} C_{acc} p + 1 \right) (R_l C_3 p + 1)}{(R_{sh} C_{acc} p + 1) \left(\frac{R_{ac} C_1}{4} p + 1 \right)}. \end{aligned} \quad (20)$$

Сравнение (20) с (16) приводит к следующим соотношениям, позволяющим рассчитывать параметры РС:

$$\frac{R_{acc} R_{sh}}{R_{acc} + R_{sh}} C_{acc} = T_1; \quad R_l C_3 = 2T_\mu; \quad R_{sh} C_{acc} = T_2^*;$$

$$\frac{R_{ac} C_1}{4} = T_3^*; \quad K_{PC} = \frac{R_{acc} + R_{sh}}{R_{ac}}; \quad R_{ac} = R_c; \quad C_1 = C_2.$$

Передаточная функция замкнутой системы на рис.1 с учетом фильтра $W_\phi(p) = (T_1 p + 1)^{-1}$ на ее входе

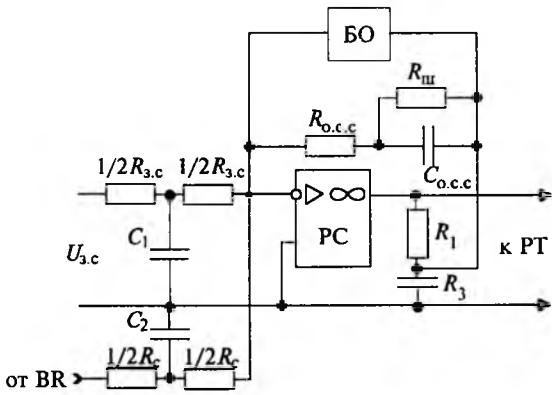


Рис.2. Принципиальная схема ПИП²-РС с подключенной обратной связью по скорости

$$W(p) = \frac{\omega_1(p)}{U_{ac}(p)} = \frac{(1/K_{dc})\omega_0^5 \left(\frac{\gamma}{\Omega_{12}^2} p^2 - \frac{\beta_c}{C_{12}} p + 1 \right) m_0}{p^5 + \alpha_4 \omega_0 p^4 + \alpha_3 \omega_0^2 p^3 + \alpha_2 \omega_0^4 p^2 + \alpha_1 \omega_0^4 p + \omega_0^5}. \quad (21)$$

Разработанная статическая система имеет ошибки по управляющему и возмущающему воздействиям при $\beta_c < 0$:

$$\Delta\omega_u = \frac{n_0}{m_0 + n_0} \frac{1}{K_{dc}}; \quad (22)$$

$$\Delta\omega_{ct} = -\frac{n_0}{\beta_c(m_0 + n_0)} M_{c0}. \quad (23)$$

При $\beta_c = 0$, т.е. при нагрузках электропривода типа $M_c = M_{c0} = \text{const}$, система на рис.1 приобретает астатические свойства по управлению, так как становится однократноинтегрирующей с передаточной функцией объекта, следующей из (1), вида

$$W_{o0}(p) = \frac{\frac{(C\Phi)K_{dc}}{K_{dt}} \left(\frac{\gamma}{\Omega_{12}^2} p^2 + 1 \right)}{(J_1 + J_2)p(2T_m p + 1) \left(\frac{\gamma}{\Omega_{12}^2} p^2 + 1 \right)}.$$

В данном случае в электроприводе будет отсутствовать ошибка по управлению, а статическая ошибка по скорости от действия возмущения примет значение

$$\Delta\omega_{ct0} = -\frac{n_0}{\beta_c m_0} M_{c0}, \quad (24)$$

где M_{c0} — постоянная составляющая момента соотивления; β_c — коэффициент вязкого трения, входящий расчетной величиной в K_{pc} (17).

Проведем исследование синтезированной СПР скорости ДЭМО (рис.1) на примере электропривода ТП-Д со следующими параметрами силовой части: $K_{tp}=51,3$; $T=0,004$ с; $R_s=0,087$ Ом; $L_s=6,873 \cdot 10^{-3}$ Гн; $T_m=0,079$ с; $J_1=10$ кг·м²; $J_2=-10$ кг·м²; $\gamma=2$; $C_{12}=5 \cdot 10^3$ Н·м/рад; $(C\Phi)=2,68$ В·с.

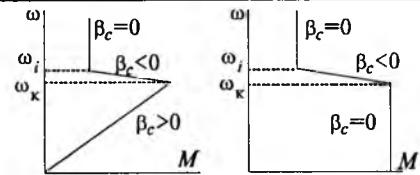


Рис.3. Нелинейный характер нагрузки, отвечающий зависимостям:
а — (25); б — (26)

$$\Omega_{12}=31,6 \text{ с}^{-1}; T_m=(J_1+J_2)R_s/(C\Phi)^2=0,242 \text{ с}; m=T_m/T_m=3,06; U_h=440 \text{ В}; I_h=400 \text{ А}; \omega_h=157 \text{ с}^{-1}; M_h=1070 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

При жесткости механической характеристики двигателя $\beta=(C\Phi)^2/R_s=82,5$ Н·м·с зададимся критическим значением коэффициента ОВТ $\beta_{c,kp}=-100$ Н·м·с, при котором параметр $b=\beta_{c,kp}/\beta=-1,212$. Принятое значение $\beta_{c,kp} < 0$ усугубляет решаемую задачу условием статической неустойчивости ДЭМО, что вполне допустимо, учитывая случайный характер ОВТ.

Примем $U_{3.c}=10$ В, $K_{dc}=0,0638$ В·с, $K_{dt}=0,005$ В/А, $K_{pt}=3,35$ и найдем механическую постоянную времени $T_c^* = (J_1 + J_2)|\beta_{c,kp}| = 0,2$ с.

Будем считать, что данный электропривод находится под воздействием нелинейной нагрузки M_c различных видов:

$$M_c = \begin{cases} +\beta_c \omega_2, \beta_c = 10 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}, & 0 \leq \omega_2 \leq \omega_i; \\ -\beta_{c,kp} \omega_2, |\beta_{c,kp}| = 100 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}, \omega_i < \omega_2 \leq \omega_k; \\ 500 \text{ Н}\cdot\text{м}, \beta_c = 0, & \omega_2 > \omega_k. \end{cases} \quad (25)$$

2.

$$M_c = \begin{cases} 1070 \text{ Н}\cdot\text{м}, \beta_c = 0, & 0 \leq \omega_2 \leq \omega_i; \\ -\beta_{c,kp} \omega_2, |\beta_{c,kp}| = 100 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}, \omega_i < \omega_2 \leq \omega_k; \\ 500 \text{ Н}\cdot\text{м}, \beta_c = 0, & \omega_2 > \omega_k, \end{cases} \quad (26)$$

характер которых показан на рис.3, а также может работать в режиме ХХ при $M_c=0$ и с традиционной нагрузкой

$$3. M_c = M_{c0} = M_h = \text{const}.$$

Для последующего сравнения допустим, что первоначально в качестве РС был принят П-регулятор с коэффициентом усиления $K_{pc}=36,5$, рассчитанным по известной методике [12] без учета ДЭМО и нелинейного характера нагрузки.

При определении параметров синтезированной здесь передаточной функции РС (15) или (16) с учетом настройки всей системы по Баттерворту, прежде всего по уравнению (14) найдены следующие значения среднегеометрических корней, из которых два оказались положительными величинами:

$$\omega_0 = -7,59; \omega_0 = 32,89; \omega_0 = 25,09; \omega_0 = -36,72; \omega_0 = -46,07.$$

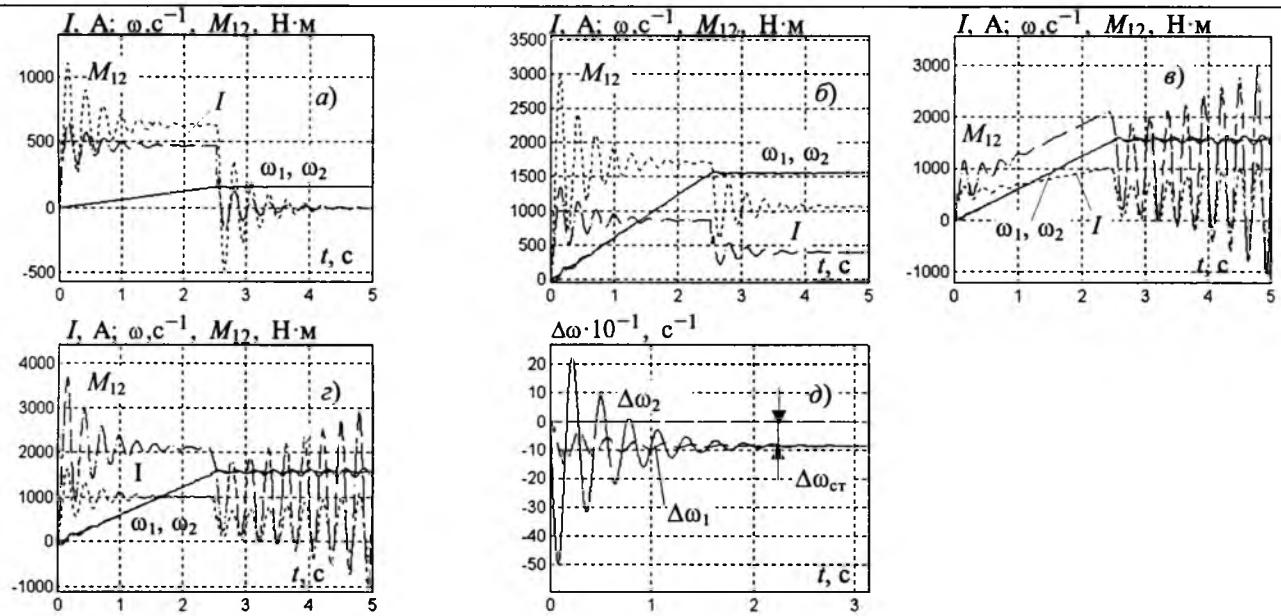


Рис.4. Переходные процессы в ДЭМО с СПР при П-РС

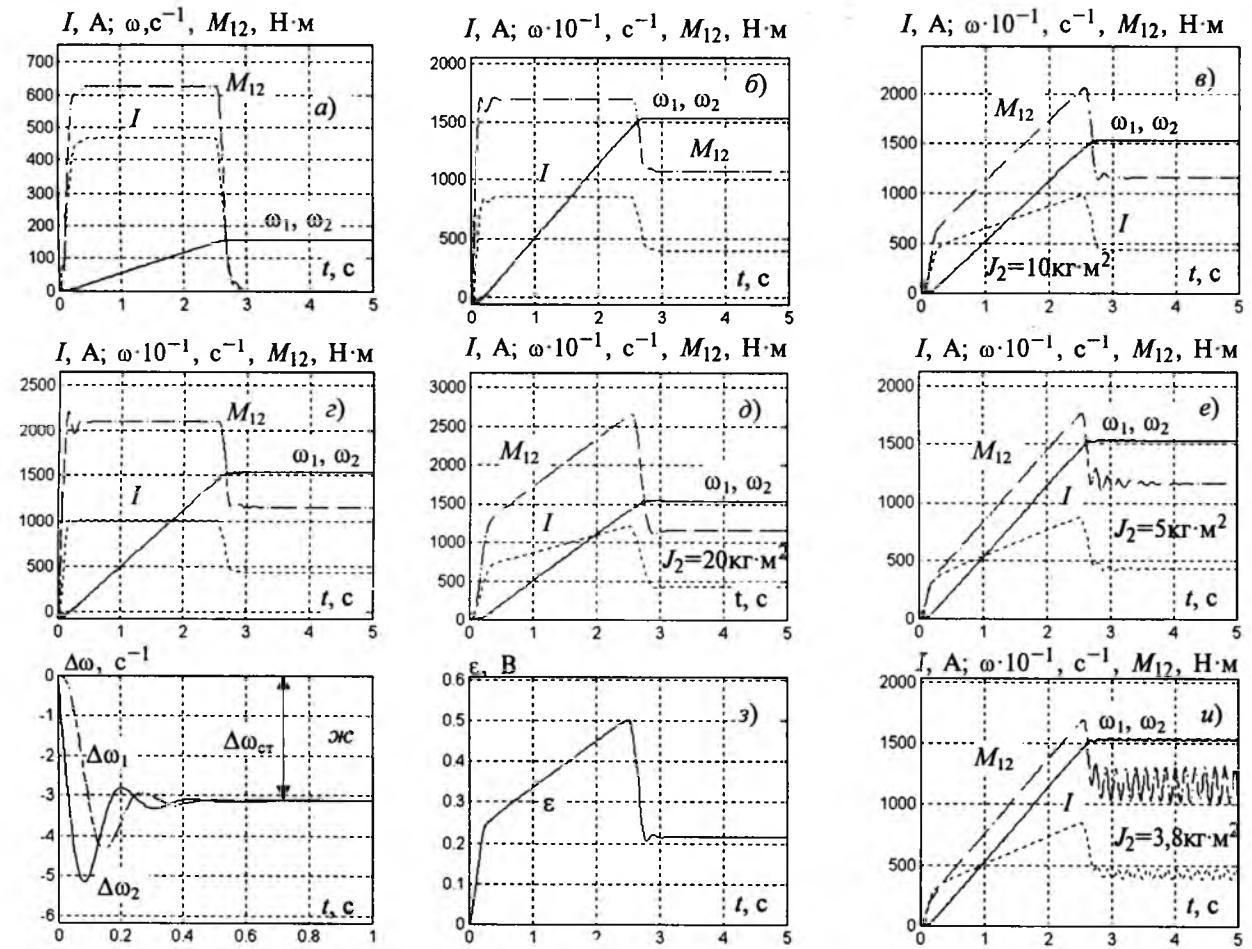


Рис.5. Переходные процессы в исходно неустойчивом ДЭМО с СПР при синтезированном РС

Для последующих расчетов принято $\omega_{0i} = 25,09 \text{ с}^{-1}$ и получены значения (9)–(13) коэффициентов полиномов $N(p)$ и $M(p)$: $n_2 = 5,12 \cdot 10^{-4} \text{ с}^2$; $n_1 = 4,67 \cdot 10^{-2} \text{ с}$; $n_0 = 0,41$; $m_1 = 0,1225 \text{ с}$; $m_0 = 1,41$.

По ним на основании (18) определены постоянные времени звеньев, входящих в РС: $T_1 = 0,087 \text{ с}$; $T_2^2 = 1,25 \cdot 10^{-3} \text{ с}^2$; $T_3 = 0,114 \text{ с}$ и по зависимости (19) — $T_2^* = 0,101 \text{ с}$ и $T_3^* = 0,012 \text{ с}$. Найден по (17) коэффициент усиления регуля-

тора $K_{PC} = 10$ и $2T_\mu = 0,008$ с.

На рис.4 показаны осциллограммы компьютерных исследований системы на рис.1 с традиционным П-РС в режимах разгона: а) на ХХ; б) под нагрузкой $M_c = M_{c0} = \text{const}$; в) при нелинейном характере нагрузки (25); г) с нелинейной нагрузкой (26), а также характер изменения просадки скорости $\Delta\omega$ (д) при мгновенном приложении нагрузки с расчетным значением статической ошибки $\Delta\omega_{\text{ст}} = -4T_\mu M_c / J_\Sigma = -0,857 \text{ c}^{-1}$. Осциллограммы свидетельствуют не только о колебательном характере динамических процессов, связанном с наличием упругости, но и об неустойчивости системы, обусловленной влиянием ОВТ.

Работа синтезированной статической СПР скорости с исходно неустойчивым ДЭМО при ее настройке по методу полиномиальных уравнений с использованием распределения по Баттерворту приведена на рис.5. Из рис.5, а—г видно, что система успешно работает как при традиционной нагрузке $M_{c0} = \text{const}$ (рис.5, б), так и в случае ее нелинейного характера (25) и (26) (рис.5, в, г), включающем участки с критическим значением ОВТ $\beta_{c,kr} < 0$. Система устойчива при любом характере нагрузки и в ней отсутствуют какие-либо колебания тока I , упругого момента M_{12} , скорости двигателя ω_1 и механизма ω_2 .

Осциллограммы на рис.5, д и е подтверждают работоспособность системы при увеличении и уменьшении момента инерции механизма J_2 в два раза по отношению к принятому $J_2 = 10 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$.

Таким образом, система допускает широкий диапазон изменения не только коэффициента вязкого трения в пределах $-\beta_{c,kr} < \beta_c < +\beta_c$, но и в четыре раза момента инерции второй массы.

На осциллограмме рис.5, ж показан характер изменения просадки скорости при действии на электропривод возмущающего воздействия $M_{c0} = 1070 \text{ Н}\cdot\text{м}$. При этом расчетное значение (24) статической ошибки $\Delta\omega_{\text{ст0p}} = -3,13 \text{ c}^{-1}$ совпадает с ее экспериментальным значением $\Delta\omega_{\text{ст0з}} = -3,129 \text{ c}^{-1}$, что подтверждает правильность зависимости (24). Процесс на рис.4, з соответствует изменению ошибки по управлению $\varepsilon = U_{z,c} - U_{o,c,c} = n_0 / (n_0 + m_0) = 0,226 \text{ В}$, которая в пересчете на скорость дает $\Delta\omega_i = \varepsilon / K_{DC} = 3,54 \text{ c}^{-1}$, что отвечает формуле (22).

Характерно (рис.4, и), что только при $J_2 = 3,8 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ в системе возникает автоколебательный режим, связанный с нелинейным характером нагрузки, обусловленным ОВТ.

Таким образом, проведенные исследования и полученные результаты убеждают в перспективности использования синтезированного РС с традиционной структурой СПР не только для ликвидации исходной неустойчивости системы и предотвращения в ней автоколебательных режимов, вызываемых наличием отрицательного вяз-

кого трения, но и для получения в электроприводе с ДЭМО требуемого качества переходных процессов.

Выводы

1. Показано применение метода полиномиальных уравнений для синтеза передаточной функции РС системы подчиненного регулирования скорости электропривода с двухмассовой механической частью, работающего при нелинейном характере реактивной нагрузки, включающем падающие участки, приводящие к исходно неустойчивому объекту управления.

2. Доказано, что для данного класса электроприводов при создании статической системы регулирования скорости необходимо использовать ПД²-РС с апериодическим фильтром второго порядка, который при определенных параметрах может быть заменен ПИП²-РС. В обоих случаях на входе системы должен быть установлен фильтр с соответствующими параметрами.

3. Найдены выражения ошибок по управляемому и возмущающему воздействиям для электропривода с двухмассовой механической частью и падающим участком механической характеристики нагрузки.

4. По результатам компьютерных исследований установлено, что при синтезе РС следует отдать предпочтение распределению корней по Баттерворту, а не биномиальному, так как при этом обеспечиваются отсутствие колебательности и необходимое качество переходных процессов при $\beta_c < 0$, а также при изменении момента инерции второй массы в четыре раза.

5. При отсутствии влияния вязкого трения в характере нагрузки механизма, найденный тип РС способствует созданию однократноинтегрирующей СПР регулирования скорости устойчивым ДЭМО с высоким качеством переходных процессов.

Список литературы

1. Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика//Труды научно-технических конференций. Харьков: Основа, 1996, 1997, 1998.

2. Клепиков В.Б., Осичев А.В. Определение границ устойчивости электропривода с отрицательным вязким трением и с учетом упругости кинематической цепи// Электричество. 1989. №1. С.36—41.

3. Klepikov V.B., Lutskova T.B. About choice of feedback type for stability providing of electromechanical systems with negative viscous friction //Int. Conf "Results of scientific cooperation between the KhSPU and University of Miscolc", Miscolc, March, 1994.

4. Борцов Ю.А., Соколовский Г.Г. Автоматизированный электропривод с упругими связями. С-Пб: Энергоатомиздат, 1992.

5. Автоматизированные электромеханические системы с модальными регуляторами и наблюдателями состояния//Под ред. В.Б.Клепикова, Л.В.Акимова. Харьков: ХГПУ, 1997.

6. Акимов Л.В., Клепиков А.В. Синтез системы монодривного управления упругим электромеханическим объектом с нагрузкой типа пара трения //Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. Харьков: Основа, 1996. С.51—58.

7. Александров Е.Е., Кузнецов Б.И., Радиевский А.Е., Гернюк Н.Э. Оптимизация электромеханических систем с упругими элементами. Харьков: ИМС, 1995.

8. Клепиков В.Б., Котляров В.О., Осичев А.В. О влиянии наблюдающих устройств на устойчивость замкнутой двухмассовой электромеханической системы с отрицательным вязким трением//Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. Харьков: ХГПУ, 1998. С.59—62.

9. Акимов Л.В., Колотило В.И. Синтез СПР скорости неустойчивого, под влиянием отрицательного вязкого трения, объекта методом полиномиальных уравнений //Электротехника. 1999. №3. С.22—31.

10. Залялев С.Р. О применении метода полиномиальных уравнений для синтеза непрерывных систем электропривода//Электротехника. 1998. №2. С.48—53.

11. Красовский А.А., Поспелов Г.С. Основы автоматики и технической кибернетики. М.: Госэнергоиздат, 1962.

12. Лебедев Е.Д., Неймарк В.Е., Пистрак М.Я., Слежановский О.В. Управление вентильными электроприводами постоянного тока. М.: Энергия, 1970.

Акимов Леонид Владимирович — профессор кафедры "Автоматизированные электромеханические системы" Харьковского государственного политехнического университета. Закончил электромашиностроительный факультет Харьковского политехнического института (ныне ХГПУ) в 1961 г. В 1989 г. защитил докторскую диссертацию по теме: "Теория, алгоритмизация проектирования и создание оптимальных по быстродействию электроприводов при ограничениях координат и идеализированном управлении" в МЭИ.

Колотило Виталий Иванович — аспирант кафедры "Автоматизированные электромеханические системы" Харьковского государственного политехнического университета. Закончил электромашиностроительный факультет Харьковского государственного политехнического университета в 1996 г.

Разработка и исследование модели многосвязной системы электроприводов непрерывного трубного оправочного прокатного стана

БОРОДИН М.Ю., канд. техн. наук, доц., СУСЕНКО О.С., инж.

Уральский ГТУ

Описана модель многосвязной системы электроприводов непрерывного трубного оправочного стана, включающая модель процесса прокатки. Представлены основные результаты численных экспериментов с моделью стана по исследованию влияния статических и динамических характеристик электроприводов на силовой режим стана. Выявлены недостатки существующего способа управления скоростным режимом стана и указан возможный способ их преодоления.

Непрерывные станы рассматриваемого типа входят в состав трубопрокатного агрегата и имеют 7—10 клетей, прокатка выполняется на длинной свободной оправке [1]. Индивидуальный привод валков каждой клети выполнен через редуктор от двигателя постоянного тока. Электроприводы (ЭП) клетей непрерывного стана представляют собой многосвязную электромеханическую систему. Их взаимодействие обусловлено связью клетей через прокатываемый металл и наличием свободной оправки. Силы взаимодействия клетей через прокат (силовой режим прокатки) зависят от скоростей валков связанных клетей (скоростной режим стана). Настройка скоростного режима стана заключается в согласовании скоростей валков связанных клетей. Погрешности настройки скоростного режима приводят к ухудшению качества готовой трубы, а значительные ошибки — к авариям, в результате которых происходят

потери заготовки, повреждение оборудования стана и его остановка на продолжительное время. Наилучшим силовым режимом является режим свободной прокатки, при котором отсутствуют напряжения и подпоры в прокатываемом металле.

В настоящее время для станов данного типа не обеспечивается автоматическая настройка скоростного режима. ЭП клетей имеют локальные, не связанные между собой, системы автоматического регулирования (САР) скоростей двигателей. Установка заданий на скорости выполняется оператором стана во время пауз между прокаткой труб. Информация, которой при этом руководствуется оператор, обычно крайне ограничена и может трактоваться субъективно. Поэтому актуальна задача построения системы автоматического управления скоростным режимом (САУ СР), обеспечивающей согласованное управление всеми электроприводами стана, с целью дости-

жения желаемого силового режима. Для создания такой системы необходима достаточно быстро действующая модель процесса прокатки, позволяющая решать задачу управления силовым режимом средствами электроприводов в реальном времени. В статье представлена математическая модель стана, объединяющая модели электроприводов клетей с моделью процесса прокатки, и обсуждаются основные результаты ее исследования. По результатам исследований выявлены недостатки типового для существующих станов варианта системы управления ЭП клетей и указан возможный способ построения САУ СР.

Математическая модель стана

Модель стана включает в себя модели электроприводов клетей $1, \dots, N$ и модель процесса прокатки. Структура модели N -клетевого стана показана на рис.1. Структура модели ЭП подробно показана для ЭП 1-й клети, для ЭП остальных клетей она аналогична.

Модели электроприводов клетей

Структура рассматриваемой модели ЭП соответствует типовому варианту построения систем управления электроприводов клетей непрерывных трубных станов. Управление скоростью двигателя (следовательно, и скоростью валков данной клети) осуществляется в САР скорости двигателя с подчиненным контуром регулирования тока якоря [2]. Описание САР в модели выполнено в относительных единицах. В САР используется регулятор скорости пропорционально-интегрального типа, при котором обеспечивается абсолютно жесткая механическая характеристика ЭП. Опыт разработки и эксплуатации станов данного типа показал целесообразность смягчения механичес-

ких характеристик [3], для чего применяется дополнительная к стандартной структуре отрицательная обратная связь по статическому моменту (ОСМ) двигателя. Статический момент определяется косвенно по сигналам датчиков тока якоря и скорости двигателя.

При исследовании модели стана рассматриваются моменты и скорости электропривода, принятые к валкам, а не к валу двигателя, как это обычно принято. Это объясняется тем, что все переменные модели прокатки определяются заданными скоростями валков. Если использовать в модели прокатки скорости двигателей, это усложнит ее, поскольку потребует дополнительного учета различных для каждой клети передаточных чисел редукторов. Выходной переменной модели ЭП принимается скорость валков Ω_{bi} (индекс i здесь и далее обозначает номер клети). Момент сопротивления нагрузки на валках $M_{c.bi}$ (момент сопротивления клети) рассчитывается в модели прокатки и зависит от скоростного режима всего стана. Механическая характеристика электропривода, в рамках данного подхода, связывает скорости валков с вращающим моментом на валках:

$$\Omega_{bi} = \Omega_{b0i} - \frac{M_{bi}}{\beta_i}; \quad i = 1 \dots N, \quad (1)$$

где Ω_{b0i} — скорость валков при холостом ходе; β_i — жесткость механической характеристики ЭП, Н·м·с.

Значение жесткости β_i зависит от установленного в САР коэффициента ОСМ:

$$\beta_i = \frac{M_{6i}}{k_{ci}\Omega_{bi}K_p^2\eta_i}, \quad (2)$$

где M_{6i} , Ω_{6i} — базовые значения момента и скорости для системы относительных единиц; k_{ci} — коэффициент ОСМ, о.е.

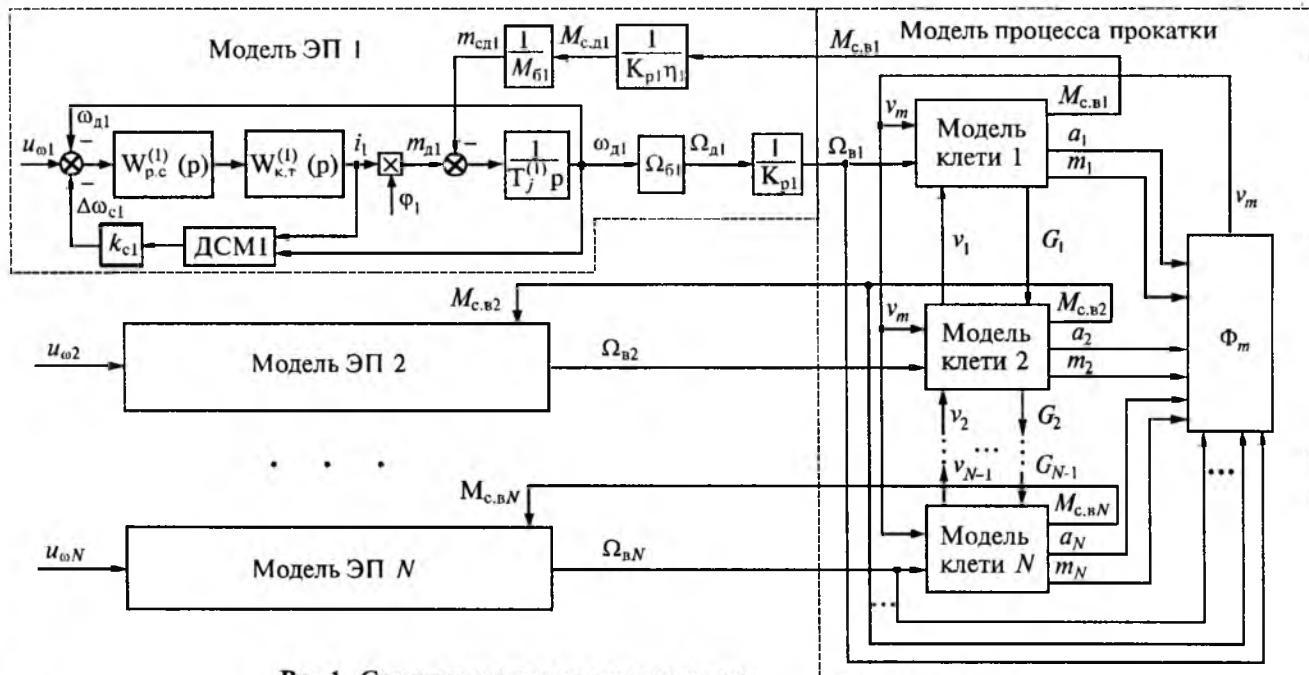


Рис.1. Структурная схема модели стана

Очевидно, что $\beta_i = \infty$ обеспечивается при $k_{ci} = 0$. При рассматриваемой структуре ЭП оператор может воздействовать на скоростной режим двумя способами: изменения сигналы задания на скорость $u_{\omega i}$ и изменения коэффициенты ОСМ k_{ci} . На практике обычно применяется первый способ в течение времени пауз между прокаткой труб, а коэффициенты ОСМ изменяются редко. Скорости холостого хода ЭП зависят от сигнала задания на скорость САР:

$$\Omega_{B0i} = \frac{u_{\omega i} \Omega_{B0}}{k_{pi}}. \quad (3)$$

Далее под *заданием на скорость* i -й клети понимается значение Ω_{B0i} в абсолютных единицах скорости. Для исследования прокатки при установленном режиме используется *статическая модель стана*, в которой ЭП идеализировано представлен только выражением (1) как безынерционное звено. При подробном описании динамики ЭП (рис.1) получим *динамическую модель стана*.

Модель процесса прокатки

Построение модели процесса прокатки выполнено на основе [4], при этом сохранены методы математического описания и основные допущения. В [4] рассмотрена прокатка трубы на свободной оправке в одной клети без подпоров и натяжений. Вариант построения модели прокатки в многоклетевом стане, послуживший прототипом рассматриваемой модели, представлен в [5]. В модели прокатки по заданному приводами скоростному режиму $\Omega_{B1}, \dots, \Omega_{BN}$ вычисляются: моменты сопротивления клетей $M_{c,B1}, \dots, M_{c,BN}$, силы взаимодействия $G_1, \dots, G_{(N-1)}$ (для каждого межклетевого промежутка), скорости проката в межклетевых промежутках v_0, \dots, v_N и скорость оправки v_m . Для сил взаимодействия принято, что при натяжении их значение положительно, а при подпоре — отрицательно. Звеньями модели прокатки являются модели прокатки в каждой клети и звено вычисления скорости оправки (Φ_m , рис.1). Между моделями смежных клетей имеют место: кинематическая связь — из условия постоянства скоростей проката в соответствующем межклетевом промежутке; силовая связь — из условия равновесия металла в межклетевом промежутке. Переменными модели клети также являются логарифмический коэффициент вытяжки a_i и положение критического сечения по валку m_i [4,5]. Значение a_i находится из вариационного уравнения, выражающего принцип минимума полной мощности деформации. Значение m_i находится из условия равновесия моментов сил, приложенных к валку. Скорость оправки вычисляется из условия равновесия действующих на нее сил трения и зависит от a_i , m_i , Ω_{Bi} всех клетей, в которых происходит прокатка (загруженных клетей). Модель прокатки имеет следующие особенности.

1. Поскольку в ходе прокатки одной трубы изменяется число загруженных клетей, структура модели будет переменной. Отрезок времени, в течение которого число загруженных клетей не изменяется, составляет одну *стадию прокатки*. Для N -клетевого стана число стадий равно $(2N-1)$. Стадии можно разделить на стадии заполнения $1, \dots, (N-1)$, стадию заполненного стана N и стадии освобождения $(N+1), \dots, (2N-1)$. Продолжительность стадии N зависит от длины трубы и обычно превышает длительность всех вместе взятых остальных стадий.

2. Исходя из допущений при построении модели прокатки, в ее уравнениях отсутствует переменная t (время), а также производные и интегралы по времени. Переменные модели связаны со скоростным режимом безынерционно и мгновенно реагируют на его изменение. Принято, что при изменении числа загруженных клетей, заполнение (или освобождение) клети прокатом и изменение скорости оправки происходят мгновенно. Уравнения модели состоят из функционалов, большинство из которых невозможно свести к функциям. Для переменных a_i и m_i не удается получить явных выражений. Система решается численно с помощью итеративного алгоритма, содержащего процедуры численной минимизации функций (применяется дихотомический алгоритм поиска минимума) и численного интегрирования по квадратурной формуле Гаусса. Для повышения скорости вычислений при нахождении решения системы уравнений модели выполнена аппроксимация наиболее сложных зависимостей методом линейных сплайнов. Решение полной системы уравнений модели стана, содержащей дифференциальные уравнения ЭП, выполняется методом Рунге-Кutta 4-го порядка.

3. При критических значениях сил взаимодействия происходит авария: разрыв трубы (при критическом натяжении) или гофрообразование (при критическом подпоре). Модель может определить эти значения. Критерием определения аварии является превышение напряжениями в прокате предела текучести или достижение положением критического сечения значений, выходящих за пределы очага деформации клети.

Для нахождения по заданному силовому режиму соответствующего ему скоростного режима используется обращенная модель прокатки. Однозначная связь скоростного и силового режимов имеет место при заданном постоянном значении скорости одной из клетей (называемой опорной). Обращенная модель по заданным значениям сил взаимодействия и скорости опорной клети определяет скорости остальных клетей, т.е. находит скоростной режим, соответствующий заданному силовому режиму.

Исследование модели стана

Для исследования возможностей управления силовым режимом при существующей структуре системы управления ЭП был проведен ряд численных экспериментов с моделью 6-клетевого стана. Схема выполнения эксперимента следующая: для модели выбираются постоянные задания на скорости и постоянные жесткости механических характеристик и рассчитываются силы взаимодействия, моменты сопротивления, скорости прокатки и оправки и другие переменные модели в ходе прокатки одной трубы. Параметры модели приняты по данным непрерывного стана агрегата ТПА-80 Синарского трубного завода (г.Каменск-Уральский). Исследовались как статическая, так и динамическая модели стана. Переменные статической модели изменяются только в моменты перехода от одной стадии к другой, а в течение стадии их значения постоянны. Временные графики для переменных статической модели имеют ступенчатую форму. В динамической модели учитывается инерционность ЭП, что приводит к появлению переходных процессов для переменных модели прокатки. При исследовании сравнивались результаты моделирования при абсолютно жестких механических характеристиках ЭП и конечных значениях жесткостей. В первом случае используется обозначение $\beta = \infty$, а во втором — $\beta < \infty$; β (без индекса) обозначает жесткости для всех приводов. Для динамической модели требуемая жесткость обеспечивается принятием соответствующего коэффициента ОСМ.

1. Для выбора заданий на скорости использована обращенная модель прокатки. Для стадий 2—10, где прокатка ведется в нескольких клетях, по обращенной модели определены скоростные режимы, обеспечивающие свободную прокатку. В качестве опорной для каждой стадии принимается первая из загруженных клетей. Результаты (табл.1) показывают, что на разных стадиях свободную прокатку обеспечивают различные скоростные режимы. Следовательно, постоянный скоростной режим обеспечивает свободную прокатку только на одной из стадий.

Таблица 1

Скоростные режимы, обеспечивающие свободную прокатку

№ стадии	Ω_{B1}, c^{-1}	Ω_{B2}, c^{-1}	Ω_{B3}, c^{-1}	Ω_{B4}, c^{-1}	Ω_{B5}, c^{-1}	Ω_{B6}, c^{-1}
2	9,00	12,64	—	—	—	—
3	9,00	12,18	16,87	—	—	—
4	9,00	12,56	16,83	21,71	—	—
5	9,00	12,55	16,84	21,72	27,72	—
6	9,00	12,57	16,86	21,75	27,83	32,76
7	—	12,57	16,83	21,74	27,80	32,73
8	—	—	16,83	21,67	27,76	32,65
9	—	—	—	21,67	27,72	32,63
10	—	—	—	—	27,72	32,62

Полученные значения скоростей для полностью заполненного стана (6-й стадии) обозначим $\Omega_{B1}^*, \dots, \Omega_{B6}^*$; в последующих экспериментах с моделью эти значения принимаются как задания на скорости.

2. Исследование статической модели стана при $\beta = \infty$. Принятые задания на скорости $\Omega_{B1}^*, \dots, \Omega_{B6}^*$ при $\beta = \infty$ обеспечивают свободную прокатку на стадии 6. При постоянных заданиях на скорости и $\beta = \infty$ скоростной режим стана на всех стадиях будет постоянным. На рис.2 показаны временные графики для скорости оправки и моментов сопротивления первых трех клетей стана. На графиках границы стадий показаны штриховыми линиями и подписаны номера стадий. Как следует из рис.2, в ходе прокатки происходит перераспределение нагрузок приводов клетей. Причиной этого является изменение скорости оправки (рис.2) и сил взаимодействия (рис.3,а) от стадии к стадии. Например, при переходе от стадии 1 к стадии 2 скорость оправки увеличивается на 0,12 м/с. Из условия сохранения баланса мощностей внешних сил и сил сопротивления в стане определяется сила взаимодействия 1-й и 2-й клетей $G_1 = -3,14$ кН (знак «—» означает подпор). В начале стадии 3 скорость оправки еще увеличивается, а подпор между 1-й и 2-й клетями уменьшится. На рис.3,а приведены временные графики для сил взаимодействия $G_1—G_4$, которые показывает, что силовые режимы на каждой стадии будут различны, несмотря на стационарность силового режима.

3. Исследование статической модели стана при $\beta < \infty$. Задания на скорости приняты равными $\Omega_{B1}^*, \dots, \Omega_{B6}^*$ (п.1). Для обеспечения свободной прокатки на стадии 6 жесткости должны выбираться по формуле:

$$\beta_i = \frac{M_{Bi}^{(cb)}}{\Omega_{B0i} - \Omega_{Bi}^{(cb)}}, \quad i = 1 \dots 6, \quad (4)$$

где $M_{Bi}^{(cb)}$, $\Omega_{Bi}^{(cb)}$ — рассчитанные обращенной моделью прокатки момент и скорость валков при свободной прокатке на стадии 6.

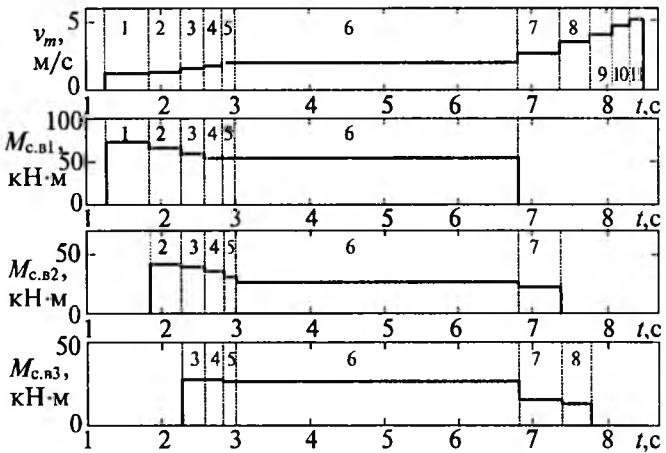


Рис.2. Скорость оправки и моменты сопротивления 1-й — 3-й клетей (расчет по статической модели стана)

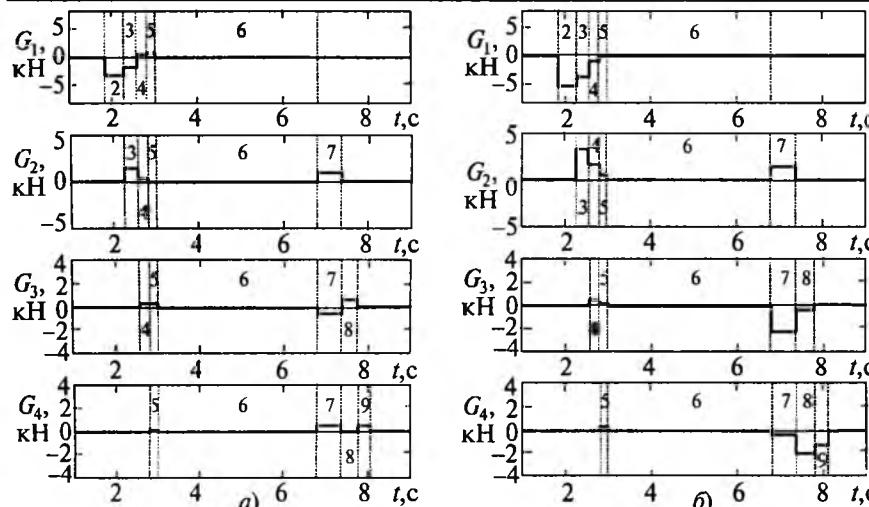


Рис.3. Силы взаимодействия в 1-м — 4-м межклетевых промежутках (расчет по статической модели стана):

a — при $\beta = \infty$; *б* — при $\beta < \infty$

Изменив скорость опорной клети в обращенной модели прокатки, можно получить другие значения $\Omega_{\text{в}i}^{(\text{св})}$, а значит и жесткостей. Для скорости валков первой клети (выбранной в качестве опорной) 9 с^{-1} , полученные по формуле (4) жесткости приведены в табл.2.

Таблица 2
Жесткости механических характеристик ЭП

№ клети	1	2	3	4	5	6
β , кН·м·с	641,1	199,2	158,0	88,7	54,5	29,3

При постоянных жесткостях ($\beta < \infty$) и постоянных заданиях на скорости скоростной режим стана будет изменяться при переходе от одной стадии к другой, что является дополнительным фактором изменения силового режима. На рис.3,б приведены графики G_1-G_4 для данного случая. Из рис.3 следует, что при уменьшении жесткостей механических характеристик и сохранения свободной прокатки на стадии 6 силы взаимодействия на стадиях заполнения (освобождения) больше (по модулю), чем при $\beta = \infty$. Силы взаимодействия на стадиях заполнения и освобождения стана как при $\beta = \infty$, так и при $\beta < \infty$ возможно уменьшить, если отказаться от условия свободной прокатки при заполненном стане.

4. Исследование влияния ошибок при задании скоростей валков. Для статической модели при одинаковых исходных значениях заданий на скорости ($\Omega_{\text{в}1}^* \dots \Omega_{\text{в}6}^*$) для случаев $\beta = \infty$ и $\beta < \infty$ (табл.2) изменялось одно из заданий, при постоянном значении других, в сторону увеличения и уменьшения до тех пор, пока одна из сил взаимодействия не достигнет критического значения (что означает аварию). Полученные критические значения заданий на скорости $\Omega_{\text{в}0(\min)}$

и $\Omega_{\text{в}0(\max)}$ приведены в табл.3, откуда следует, что при $\beta < \infty$ возможны большие, чем при $\beta = \infty$, ошибки при установке заданий на скорости, не приводящие к аварии. Это объясняется тем, что в случае $\beta < \infty$ рост сил взаимодействия с ростом ошибок задания скоростей происходит более равномерно. Например, при уменьшении задания на скорость третьей клети, при $\beta = \infty$, авария наступает при $\Omega_{\text{в}03} = 16,55 \text{ с}^{-1}$. При этом максимальные значения сил взаимодействия второй клети со смежными клетями $G_1 = -3,14 \text{ кН}$, $G_2 = -9,15 \text{ кН}$. Последнее значение является критическим подпором и приводит к аварии. При том же задании на скорость третьей клети и $\beta_3 = 158 \text{ кН}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$ $G_1 = -5,56 \text{ кН}$ — большее, чем в предыдущем случае, но $G_2 = -6,41 \text{ кН}$, что меньше критического значения.

Таблица 3
Критические значения заданий на скорости

№ клети	1	2	3	4	5	6
$\Omega_{\text{в}0}$ (исходные), с^{-1}	9,00	12,57	16,86	21,75	27,83	32,76
$\Omega_{\text{в}0(\max)}$, с^{-1} ($\beta=\infty$)	9,28	12,78	17,14	21,92	28,13	33,43
$\Omega_{\text{в}0(\max)}$, с^{-1} ($\beta<\infty$)	9,28	12,90	17,20	22,01	29,29	33,69
$\Omega_{\text{в}0(\min)}$, с^{-1} ($\beta=\infty$)	8,60	12,19	16,55	21,21	27,47	32,12
$\Omega_{\text{в}0(\min)}$, с^{-1} ($\beta<\infty$)	8,52	12,19	16,34	21,11	27,29	31,83

5. Исследование динамической модели стана при $\beta = \infty$. Принятые задания на скорости $\Omega_{\text{в}1}^* \dots \Omega_{\text{в}6}^*$ при $\beta = \infty$ обеспечивают свободную прокатку в установившемся режиме на стадии 6. В начале каждой стадии происходит скачкообразное изменение нагрузки приводов клетей, вследствие чего возникают переходные процессы скоростей валков. Быстро действие реальных приводов станов данного типа таково, что время переходных процессов при приеме (бросе) нагрузки соизмеримо с продолжительностью стадий заполнения (освобождения), и на некоторых стадиях установившийся режим может отсутствовать. Переходные процессы скоростей валков приводят к переходным процессам сил взаимодействия и других переменных модели прокатки. На рис.4,а показаны временные графики для силы взаимодействия между второй и третьей клетями $G_2(t)$ от момента захвата проката в третью клеть (начало стадии 3) до выброса проката из второй клети (окончание стадии 7). Для удобства моделировалась прокатка короткой трубы, и продолжительность стадии 6 относительно невелика. Установившийся режим для G_2 имеет место только для стадий 6 и 7, а для стадий заполнения (3—5) он отсутствует. Скорость оправки согласно принятому допущению в начале стадии мгновенно устанав-

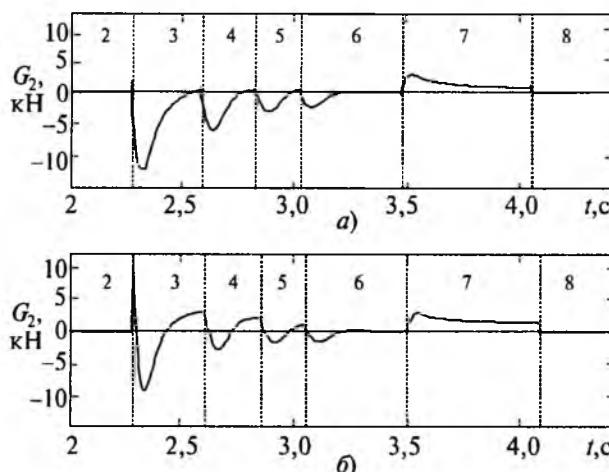


Рис.4. Сила взаимодействия во втором межклетевом промежутке (расчет по динамической модели стана):
а — при $\beta = \infty$; б — при $\beta < \infty$

лиивается равной новому значению. Скорости валков, из-за инерционности приводов, в начале стадии сохраняют свои значения. Поэтому значение G_2 модели может меняться скачком в начале стадии. Дальнейшее изменение G_2 на данной стадии определяется динамическим изменением скоростного режима и происходит плавно.

6. Исследование динамической модели стана при $\beta < \infty$. Принятые задания на скорости $\Omega_{B1}^* \dots \Omega_{B6}^*$ при $\beta < \infty$ (табл.2) обеспечивают свободную прокатку в установившемся режиме на стадии 6. График $G_2(t)$ для данного случая показан на рис.4,б. Сравнив рис.4,а и б, можно сделать вывод, что изменение жесткости влияет не только на установленные значения сил взаимодействия, но и на вид их переходных процессов. Так, при захвате во вторую клеть (начало стадии 2) при $\beta < \infty$ (рис.4,б) происходит скачок натяжения до значения $G_2 = 10,1$ кН, а при $\beta = \infty$ (рис.4,а) он значительно меньше (1,7 кН). Это объясняется различным соотношением скоростей Ω_{B1} и Ω_{B2} для этих случаев в начале стадии 2. При $\beta_1 = \infty$ имеет место статическое падение скорости Ω_{B1} под нагрузкой, а при $\beta_1 = \infty$ оно отсутствует, и скорость Ω_{B1} за время первой стадии успевает восстановиться до значения скорости холостого хода. Анализ динамической модели показывает, что в переходных процессах силы взаимодействия могут достигать значений, соизмеримых с критическими, даже если их установленные значения относительно невелики.

7. Сопоставление результатов модели с экспериментальными данными. Переходные процессы, рассчитанные моделью, качественно сопоставлены с процессами, записанными системой мониторинга непрерывного стана агрегата ТПА-80 Синарского трубного завода [6]. Системой мониторинга фиксируются токи и скорости двигателей стана при прокатке. На рис.5 приведены графики тока и скорости двигателя третьей клети стана, записанные системой мониторинга: $I_3^{**}(t)$,

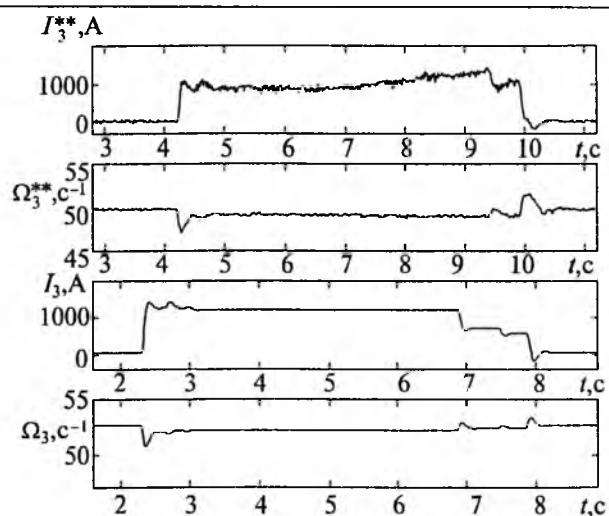


Рис.5. Ток и скорость двигателя третьей клети. Процессы, записанные системой мониторинга и рассчитанные по модели стана

$\Omega_{B3}^{**}(t)$, и те же процессы, рассчитанные моделью: $I_3(t)$, $\Omega_{B3}(t)$. Отметим следующие особенности. На графике $I_3^{**}(t)$ четко видны моменты выброса из первой и второй клетей и неразличим момент выброса из третьей клети, поскольку на стадии 8 (загруженные клети 3—6) ток I_3^{**} близок к нулю. Это говорит о том, что в реальном стане на стадии 8 прокатка проходила с большим натяжением G_3 . При заполненном стане наблюдается медленный рост I_3^{**} , что, по-видимому, вызвано изменением параметров инструмента и прокатываемого металла (не учитываемым в модели).

Выводы

Из проведенных экспериментов с моделью следуют выводы о недостатках существующего способа управления скоростным режимом стана, когда задания на скорости и коэффициенты ОСМ не изменяются в темпе прокатки.

1. Режим свободной прокатки невозможно обеспечить на всех стадиях, а только в установившемся режиме одной из стадий. При этом на других стадиях возникают существенные силы взаимодействия.

2. Силы взаимодействия в динамических режимах могут в несколько раз превышать статические и быть близки к критическим значениям. Отсутствует возможность существенно уменьшить динамические силы взаимодействия.

3. Смягчение механических характеристик ЭП (при правильном выборе жесткостей) позволяет выравнивать силы взаимодействия в различных межклетевых промежутках при ошибках в задании скоростей, но в целом не улучшает силового режима.

4. Рассмотренные недостатки неустранимы в рамках существующей структуры системы управления ЭП. Предполагается разработка САУ СР,

к которой предъявляется требование обеспечить силовой режим, близкий к свободной прокатке на всех стадиях. Для этого в САУСР управление скоростным режимом должно осуществляться в темпе прокатки, что возможно, например, при введении автоматически изменяемых коэффициентов ОСМ. Для синтеза алгоритма управления необходимо использовать модель процесса прокатки. В САУ СР предполагается применение дополнительных обратных связей от объекта управления (например, от датчика скорости оправки).

Список литературы

1. Полухин А.А., Федосов Н.М., Королев А.А., Матвеев Ю.М. Прокатное производство: М.: Металлургия, 1982.
2. Проектирование электроприводов: Справочник/Под ред. А.М. Вейнгера. Свердловск: Средне-Уральское книжное изд-во, 1980.
3. Хотулов В.К., Минкин А.В., Артамонов В.С. Исследование влияния характеристик электроприводов 9-клетевого непрерывного стана агрегата 30—102 на качество труб//Труды ВНИИМЕТМАШ. 1967. № 19. С. 136—161.
4. Колмогоров В.Л., Швейкин В.В. Расчет деформа-

ций, мощности и среднего удельного давления при прокатке трубы на длинной оправке//Труды УПИ. 1958. С. 232—245.

5. Бородин М.Ю., Сусенко О.С. Математическая модель трубного стана как объекта управления//Оптимизация режимов работы электроприводов. Красноярск: КГТУ, 1997. С.93—99.

6. Бородин М.Ю., Сусенко О.С., Метельков В.П. Методы исследования и контроля параметров систем управления электроприводов переменного тока//Труды 11-й научно технической конференции «Электроприводы переменного тока». Екатеринбург, 1998. С. 281—283.

Бородин Михаил Юрьевич — доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Уральского государственного технического университета. Закончил электротехнический факультет УГТУ в 1976 г. Защитил кандидатскую диссертацию в 1988 г. Тема диссертации «Электропривод постоянного тока с микропроцессорным регулированием скорости механизмов типа многоклетевых трубных станов».

Сусенко Олег Сергеевич — аспирант кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Уральского государственного технического университета. Закончил электротехнический факультет УГТУ в 1996 г.

Электропривод на основе торцевого электродвигателя с высококоэрцитивными постоянными магнитами

П.Н.БЕЛЬЙ, канд. техн.наук

Кременчугский ГПИ

Рассмотрены особенности построения регулируемого электропривода на основе торцевого электродвигателя с постоянными магнитами. Описана конструкция и приведена практическая схема управления торцевым электродвигателем.

Научно-технический прогресс выдвигает все более высокие требования к техническим устройствам и системам, разрабатываемым на основе электромеханических и электронных преобразователей. Перспективными представляются усовершенствование и разработка электродвигателей (ЭД) нового поколения, которые максимально приспособлены к совместной работе с электронной системой управления, а также позволили реализовать малоотходную технологию массового производства с улучшенным использованием объема электрической машины.

В связи с этим целесообразно исследовать возможность создания на базе торцевых конструкций регулируемого непосредственного электропривода различных исполнительных механизмов и автоматизированных систем, а также использование его в автономных транспортных системах, технологическом оборудовании.

Выбор торцевой конструкции обусловлен тем, что она позволяет использовать модульный принцип построения [1], а также разнообразить варианты компоновок различных систем и устройств. Кроме того, если их использовать в качестве силовых ЭД, что является важным для непосредственного электропривода, то при размере фланца свыше 165 мм торцевая конструкция превосходит по своим показателям машину цилиндрического выполнения [2].

Электродвигатель (рис.1) содержит двусторонний статор 1, на котором размещены обмотки управления двух фаз 2_1 и 2_2 и ротор 3, жестко закрепленный на валу и содержащий немагнитный диск, в котором с шагом $\tau_r = 30^\circ$ равномерно размещены по окружности с чередованием полюсов двенадцать высококоэнергетических постоянных магнитов (ПМ) системы Nd-Fe-B размерами $20 \times 30 \times 3$ мм. К корпусу ЭД пристроен дат-

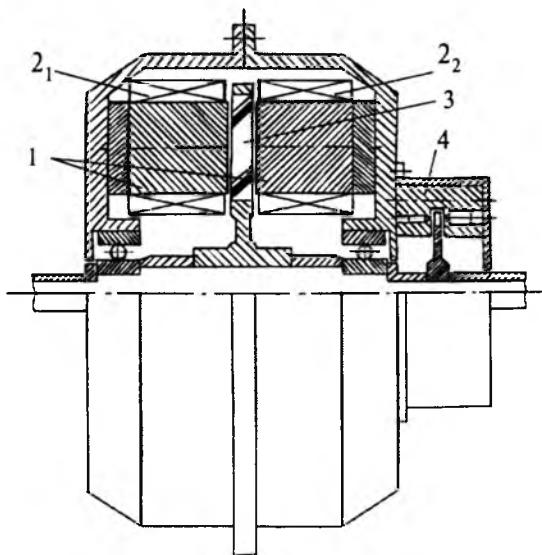


Рис.1.

чик 4 фотоэлектрического типа.

Статор ЭД представляет собой активно-распределенный слой (АРС), который выполняется намоткой катушечных групп с ферромагнитными пластинами из электротехнической стали [3].

Такое техническое решение позволяет свести к минимуму зубцовую составляющую пульсации, а следовательно, уменьшить магнитный шум и вибрацию, улучшить виброакустические характеристики привода и повысить его надежность.

Следует также отметить, что в данной конструкции ЭД поперечные силы магнитного притяжения полюсов статора к ПМ ротора взаимно уравновешены благодаря расположению ПМ на середине двойного рабочего зазора, что позволяет разгрузить подшипниковый узел.

Электродвигатель может работать в трех режимах: шаговом, автокоммутации и в режиме вентильного двигателя постоянного тока.

При работе ЭД в шаговом режиме осуществляется отработка ротором единичного шага при одновременном возбуждении двух фаз ЭД с подачей на каждую фазу биполярных напряжений прямоугольной формы.

Использование обратной связи по положению ротора в схеме ЭД (рис.2), включающего в себя, кроме ЭД, также микропроцессорную систему управления на основе датчика шагов (ДШ), микропроцессора (МП) и силового полупроводникового коммутатора фаз (СПКФ), позволяет реализовать режим автокоммутации фаз с обеспечением непрерывного (автосинхронного) движения ротора.

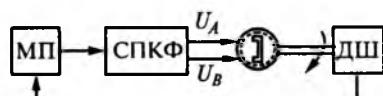


Рис.2.

Оценку представленной конструкции ЭД в шаговом режиме и автокоммутации можно провести с помощью следующих коэффициентов добротности [4], показывающих технический уровень двигателя, его качество: отношений максимального момента ЭД к потребляемой им мощности (M_{\max}/P_1), к массе ротора (M_{\max}/m_r), к массе активной части ЭД (M_{\max}/m_a) и к объему этой части (M_{\max}/V_a). Отношение (M_{\max}/m_r) показывает способность к ускорению. Объем и масса активной части данного ЭД $V_a = 720,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$; $m_a = 4 \text{ кг}$; масса ротора $m_r = 0,385 \text{ кг}$. Потребляемая мощность $P_1 = 120 \text{ Вт}$.

Максимальный вращающий момент ЭД можно представить известной формулой

$$M_{\max} = \frac{pmn}{aK} B_{\delta \text{ср}} I_{\text{ст}} w_r l_{\text{пр}} R,$$

где $B_{\delta \text{ср}}$ — среднее значение магнитной индукции на середине рабочего зазора δ ; R — радиус круга, который проходит через центры ПМ (задается при проектировании ЭД); p — число пар полюсов ротора, приходящихся на обмотку статора; $l_{\text{пр}}$ — длина активного проводника; $I_{\text{ст}}$ — ток статора; w_r — число витков катушечной группы, приходящейся на полюс; n — число активных стержней обмотки статора; m — число фаз; a — число пар параллельных стержней обмотки статора; $K = M_{\text{ср}}/M_{\max}$ — коэффициент связи между средним и максимальным моментами, при распределении кривой индукции в рабочем зазоре (рис.3), имеющем близко прямоугольную форму, $K \approx 0,75 \div 0,85$.

Экспериментальные исследования осуществлялись на физической модели (рис.3,а), состоящей из ферромагнитной пластины, на которой расположены два призматических Nd-Fe-B — магнита разноименной полярности толщиной 3 мм. Замыкателем магнитного потока служит зубцово-пазовый магнитопровод, эквивалентирующий АРС, с толщиной зубца 2 мм. Измерение индукции магнитного поля осуществлялось с помощью

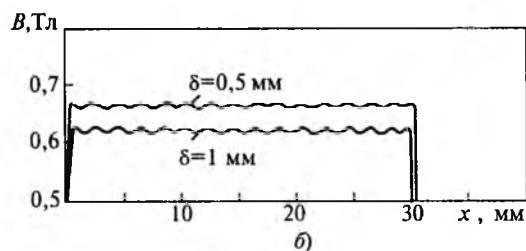
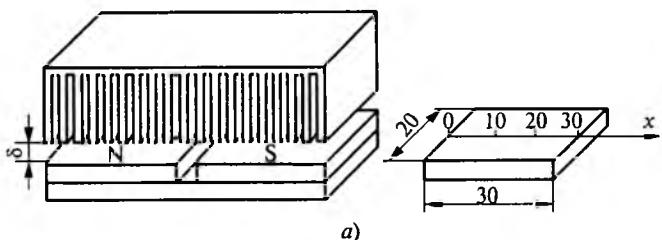


Рис.3.

преобразователя Холла, соединенного с входом тесламетра.

С учетом того, что кривая магнитной индукции в рабочем зазоре δ имеет практически прямоугольную форму (рис.3,б), то согласно [5] среднее значение магнитной индукции

$$B_{\delta} = \frac{h_m B_r k_3}{h_m \frac{S_{\delta}}{S_m} + 2\delta\mu_m},$$

где h_m — толщина ПМ; δ — воздушный зазор; S_m и S_{δ} — площади соответственно ПМ и воздушного зазора; $\mu_m = B_r/H_c$ — магнитная проницаемость ПМ; B_r, H_c — остаточная индукция и коэрцитивная сила ПМ по индукции (паспортные данные).

В таблице приведены рассчитанные коэффициенты добротности представленной на рис.1 конструкции ЭД в шаговом режиме работы при следующих параметрах: $h_m = 3 \cdot 10^{-3}$ м; $B_r = 1,25$ Тл, $\delta = 0,25 \cdot 10^{-3}$ м; $\mu_m = 1,35$; $l_{np} = 30 \cdot 10^{-3}$ м; $p = 6$; $R = 60 \cdot 10^{-3}$ м; $m = 2$; $a = 6$; $w_t = 230$; $n = 12$.

M_{max}/P_1 , Н·м/кВт	M_{max}/m_r , Н·м/кг	M_{max}/m_a , Н·м/кг	$M_{max}/V_a \cdot 10^3$, Н·м/м ³
63,35	20,78	1,85	11,2

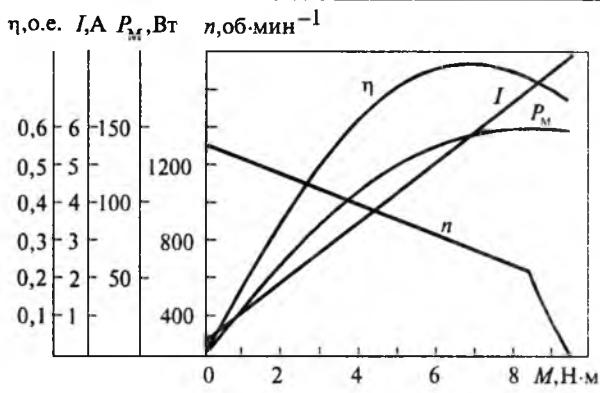


Рис.5.

При использовании ЭД в режиме ВД постоянного тока в качестве коммутирующего элемента используется немагнитный диск с прорезями, жестко закрепленный на валу двигателя; сигнальными элементами которого являются 2 светодиода и 2 фотодиода. При вращении вала последовательно освещаются фотодиоды, что приводит к отпиранию соответствующих ключей полупроводникового преобразователя (ПП), практическая схема которого показана на рис.4.

Приведенная схема ПП позволяет осуществлять управление скоростью ВД с помощью режима управляемого выпрямителя. При этом следует также отметить, что осуществив в схеме ПП незначительные изменения, можно будет управлять скоростью ВД посредством широтно-импульсной модуляции.

Нагрузочные характеристики ЭД при работе в качестве ВД постоянного тока (рис.5) снимались на специальном стенде, оснащенном электромагнитным тормозом, создающим изменяющийся в широких пределах момент нагрузки, измерителем скорости вращения вала ВД, приборами для измерения электрических величин на входе и выходе ПП.

Выходы

1. Проведенные экспериментальные исследования ЭД в режиме ВД постоянного тока показывают возможность создания регулируемого электропривода, имеющего при тех же массогабаритных показателях двигателя КПД, повышенный на 10–20% в сравнении с другими маломощными моментными двигателями. Кроме того, обеспечивается устойчивый плавнорегулируемый режим работы ВД при скоростях от $n_{min} = 60$ об/мин до $n_{max} = 1100$ об/мин и рост электромагнитного момента при низких скоростях до $M_{em} = (8,5–9,5)$ Н·м.

2. Расчитанные значения добротности при работе ЭД в шаговом режиме и непрерывном (автосинхронном) движении ротора в сравнении с другими цилиндрическими шаговыми двигателями при равных электромагнитных нагрузках дают основание считать представленную конструкцию перспективной для применения в непосредствен-

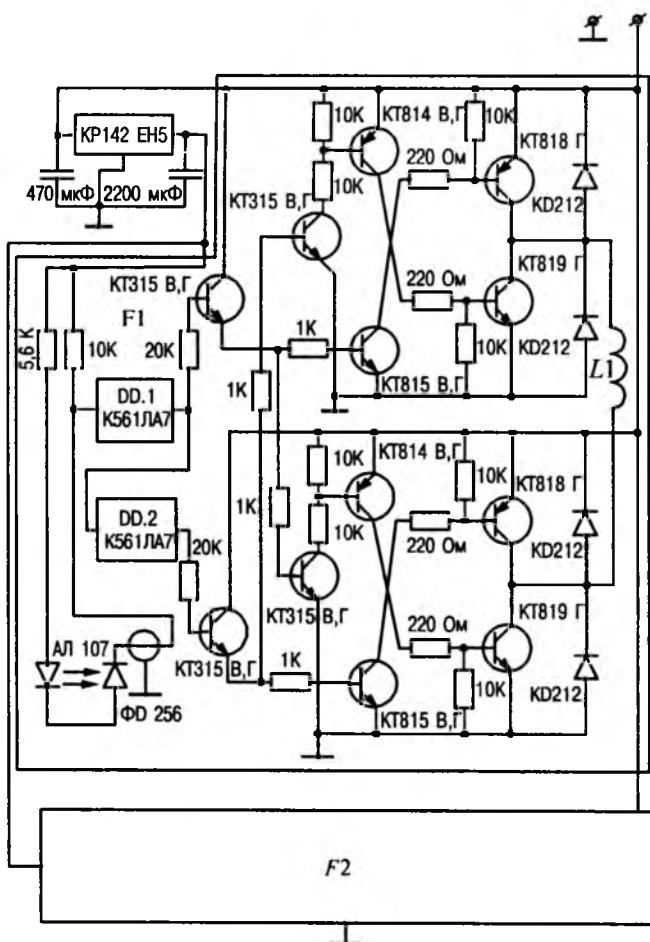


Рис.4.

ном программно-управляемом электроприводе различных исполнительных механизмов и систем.

Список литературы

1. Белый П.Н. Принципы построения дисковых магнитоэлектрических двигателей малой мощности//Электромеханика. 1997. № 6. С.18—20.

2. Адвоткин Н.П., Овчинников И.Е. Состояние и перспективы развития вентильных электродвигателей для станкостроения и робототехники//Бесколлекторные регулируемые электрические машины: СПб: ВНИИЭлектромаш, 1998. С.5—19.

3. Казанский В.М., Пашков Н.И. Потенциал развития малых электрических машин с ферромагнитными обмоточными структурами//Техническая электродинамика. 1994. № 3. С.49—53.

4. Ратмиров В.А., Ивоботенко Б.А. Шаговые двигатели для систем автоматического управления. М.: Госэнергоиздат, 1962.

5. Белый П.Н., Счастливый В.Г. Инженерный метод расчета статических и механических характеристик линейного синхронного двигателя//Электромеханические и полупроводниковые преобразователи электроэнергии. Киев: ИЭД АН Украины, 1992. С.87—93.

Совершенствование исполнительных механизмов вертикального перемещения на базе индукторной машины

СМИРНОВ А.Ю., канд. техн. наук

Изложены основные положения, характеризующие общие принципы построения систем электропривода для исполнительных механизмов вертикального перемещения на базе индукторной машины, направленные на обеспечение плавности хода, ограничение скорости опускания регулирующего органа и на повышение устойчивости к воздействию температурных полей в зоне расположения механизма.

Рассмотрены способ диагностирования состояния исполнительного механизма по току электродвигателя и вариант схемной реализации этого способа.

Предельно высокая надежность и длительный ресурс, достигаемые даже при самых жестких условиях эксплуатации, обеспечили использование индукторных машин в современных исполнительных механизмах вертикального перемещения. От машин с изолированными в магнитном отношении фазами вращательного и поступательного движения, применявшимся в таких механизмах [1—3], машины индукторного типа отличаются предельной простотой конструкции, намного меньшим расходом активных материалов и недостижимыми в указанных аналогах удельными моментными и энергетическими показателями.

Различают три основных режима электромеханического преобразования энергии в исполнительных механизмах вертикального перемещения:

— фиксированная стоянка под током — удержание регулирующего органа (РО) в статическом режиме;

— двигательный режим (подъем и опускание РО);

— режим обесточивания (аварийное опускание РО под действием собственного веса).

Два последних режима связаны с выделением избыточной потенциальной энергии от веса подвижных частей механизма. В одном из них избыточная энергия рассеивается в процессе переходных колебаний ротора двигателя, а в другом — в

результате ударного взаимодействия подвижных и неподвижных частей механизма.

Направляя эти процессы в более благоприятное русло, можно не только увеличить срок службы данных ответственнейших механизмов, но и существенно повысить их функциональную надежность за счет уменьшения вероятности возникновения автоколебаний и заклинивания в нижнем положении. Опыт эксплуатации показывает, что эти явления могут иметь место как на действующих установках, так и при эксплуатации в стендовых условиях.

Остановимся сначала на принудительном перемещении РО в двигательном режиме. В этом режиме осуществляется импульсное питание машины, т.е. она функционирует в качестве шагового двигателя. Первоначально импульсное питание шаговых двигателей обеспечивалось от источника напряжения одного постоянного или двух—трех уровней [4]. При таком питании в систему «двигатель—нагрузка» на каждом такте коммутации вводится избыточная электрическая энергия, которая провоцирует периодический режим затухания колебаний ротора при отработке шагов [1].

Между тем, возможности современной схемотехники позволяют сформировать импульс тока в фазах двигателя любой заданной формы. Воз-

действия на спектр временных гармоник импульса фазного тока, можно активно влиять на форму поля в воздушном зазоре машины и получать таким образом любой желаемый закон движения ротора на шаге.

Зададимся условием получения равномерного движения ротора на каждом такте коммутации:

$$\frac{d\theta}{dt} = \text{const.}$$

Тогда движение РО, которое в общем случае описывается системой дифференциальных уравнений баланса напряжений электрических контуров двигателя и уравнением движения ротора [4], может быть описано единственным уравнением баланса электромагнитного момента двигателя и его механической нагрузки. Для машины с контуром возбуждения, образованным совокупностью фазных обмоток, это уравнение имеет вид:

$$M_t \pm M_b = \frac{z}{2} \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m \frac{dL_{jk}}{d\theta} i_j i_k, \quad (1)$$

где M_t и M_b — составляющие механической нагрузки двигателя, соответственно момент от действия сил трения в механизме и силы веса РО; z — число зубцов ротора индукторной машины; m — число фаз ее обмотки; L_{jk} — само- (при $j = k$) или взаимоиндуктивность (при $j \neq k$) фаз обмотки; i_j , i_k — мгновенные значения тока в соответствующих фазах.

Для индукторной машины с независимым контуром возбуждения многочлен электромагнитного момента в уравнении (1) может содержать только слагаемые взаимоиндуктивности фаз якорной обмотки с контуром возбуждения.

Алгоритм определения формы периодической кривой импульса фазного тока по (1) вполне может быть реализован не только в автономном вычислительном процессе, но и непосредственно в блоке управления, с помощью микропроцессорных средств. Он содержит процедуру определения номеров фаз обмотки, момент от действия которых при текущем угловом положении ротора имеет положительное направление, и процедуру вычисления тока выделенных фаз, исходя из условия пропорциональности токов производным изменения их само- или взаимоиндуктивностей по углу:

$$i_j / i_{j+1} / \dots / i_{j+\frac{m}{2}} = \frac{dL_{jj}}{d\theta} : \frac{dL_{j+1,j+1}}{d\theta} : \dots : \frac{dL_{j+\frac{m}{2}, j+\frac{m}{2}}}{d\theta} \quad (2)$$

для машины с самовозбуждением или

$$i_j / i_{j+1} / \dots / i_{j+\frac{m}{2}} = \frac{dM_j}{d\theta} : \frac{dM_{j+1}}{d\theta} : \dots : \frac{dM_{j+\frac{m}{2}}}{d\theta} \quad (3)$$

для машины с независимым возбуждением, с обмоткой без реверса тока в фазах.

Установив закон распределения тока между

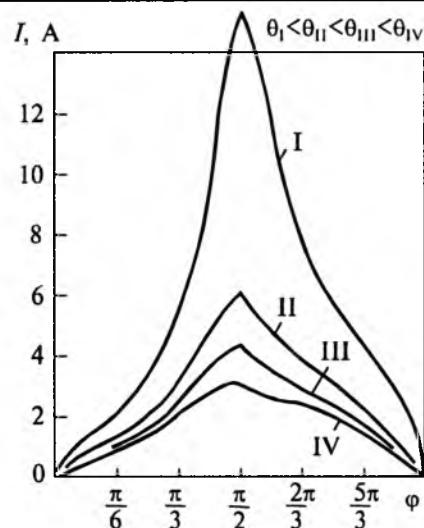


Рис.1. Результаты расчета формы импульса тока для равномерного движения ротора индукторной машины

выделенными фазами обмотки, можно найти форму кривой тока в одной фазе на полупериоде ее изменения (на другом полупериоде производная изменения индуктивных параметров фазы по углу имеет отрицательный знак, поэтому ее ток должен иметь нулевое значение). Токи остальных фаз повторяют найденную кривую со смещением друг относительно друга на часть периода, определяемую пространственным положением их осей:

$$\Delta\phi_{jk} = \frac{2\pi}{m} (j - k). \quad (4)$$

Задача решается при различных значениях угла нагрузки, установленного в диапазоне $0 < \theta < \pi/2$, в зависимости от требований по запасу статической устойчивости двигателя и привода. Меньшим значениям этого угла соответствует больший запас устойчивости, характеризуемый отношением предельного и номинального моментов нагрузки, достигаемый однако при меньшем КПД двигателя и привода вследствие увеличения потерь в меди.

Варианты импульсов тока, рассчитанные на основе (1) и (3) для индукторного двигателя с самовозбуждением при различных значениях угла нагрузки ($0 < \theta_1 < \theta_2 < \theta_3 < \theta_4 < \pi/2$), показаны на рис.1. Кривые даны в функции периодической координаты, связанной с временем через угловую скорость вращения ротора $\phi = \omega t$.

Можно заметить, что из функций, имеющих простое аналитическое выражение, наилучшим образом приближается к полученным кривым треугольная форма импульса тока с длительностью возрастающего и убывающего отрезков, составляющей по четверти периода. Такая форма, реализуемая с помощью более простых схемотехнических решений, наилучшим образом подходит при работе машины на средних или высоких частотах.

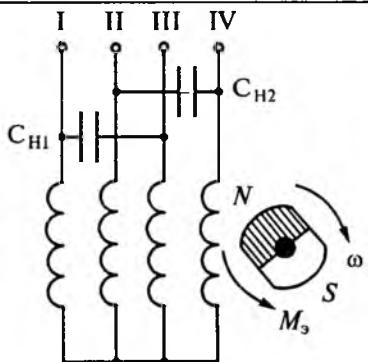


Рис.2. Динамическое торможение ротора магнитоэлектрической индукторной машины

ких частотах. Импульсы тока в этом случае следуют с частотой, превышающей двойную частоту собственных колебаний ротора и связанных с ним подвижных частей механизма. На таких частотах вынужденные колебания ротора частично или полностью поглощаются приводом, и требования к точности задания формы импульсов тока снижаются.

Теперь уточним способы преобразования потенциальной энергии, которая выделяется при перемещении РО.

Для постепенной ее утилизации можно применить динамическое торможение в приводе с индукторной машиной, имеющей магнитоэлектрический контур возбуждения. Проще всего тормозной электромагнитный момент M_s , направленный против вектора скорости вращения ротора $\bar{\omega}$, может быть получен в двигателе с четным числом фаз обмотки якоря: путем включения нагрузки (обычно емкостной) между выводами диаметрально противоположных фаз (рис.2) [5].

Однако при такой схеме предъявляются очень высокие требования к надежности нагрузочных конденсаторов C , поскольку нарушение электрической прочности изоляции хотя бы одного из них влечет за собой полную потерю работоспособности механизма во всех режимах его работы. Кроме того, расчеты [6] и опыты эксплуатации показывают, что машина с магнитоэлектрическим контуром возбуждения плохо поддается форсировке, необходимой в случаях аномального увеличения момента на перемещение РО и имеет в форсированном режиме склонность к размагничиванию магнитов.

Более удачное решение можно получить, если использовать постоянные магниты в качестве вспомогательного индуктора, дополняющего магнитную цепь индукторной машины с электромагнитным возбуждением, для выполнения функции ограничения скорости опускания РО [7–9]. Отсутствие нежелательного влияния основного (электромагнитного) и вспомогательного (магнитоэлектрического) индукторов достигается выбором числа их пар полюсов в соотношении

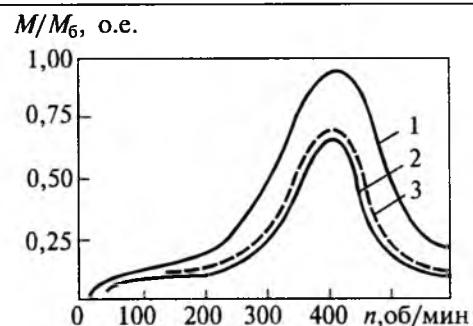


Рис.3. Характеристики тормозного момента холодной и горячей машины:

— эксперимент; - - - расчет

2:1 и применением совмещенной обмотки на статоре с тем же соотношением чисел пар полюсов [10,11].

Нагрузочные конденсаторы в такой машине подключаются к одной группе фазных зажимов, а напряжение питания в двигательном режиме — к другой, эквипотенциальной по отношению к точкам подключения конденсаторов. Поэтому выход из строя конденсаторов не может привести к потере управляемости механизма в целом, вызвав лишь потерю контроля за скоростью опускания РО при обесточенном двигателе.

Опыт эксплуатации показывает, что чрезмерный разгон РО при обесточивании двигателя возможен также и под влиянием температурных полей. Из-за уменьшения остаточного потока постоянных магнитов тормозной электромагнитный момент, развиваемый обесточенным двигателем, характеризуется глубокой зависимостью от температуры. При переходе от холодного состояния машины к горячему он уменьшается более чем на треть (рис.3, кривые 1 и 2).

Влияние температурных полей на качество режима опускания РО при обесточивании двигателя достаточно просто можно учесть с помощью температурного коэффициента уменьшения тормозного электромагнитного момента горячей машины по сравнению с холодной:

$$K_T = \frac{M_{\text{гор}}}{M_{\text{хол}}} . \quad (5)$$

Функцию этого коэффициента удобно выразить в полиномиальной форме, используя математический аппарат теории планирования эксперимента [12] и результаты экспериментальных исследований.

Для базовой модификации индукторной машины получена следующая полиномиальная зависимость:

$$K_T = 1,0454 - 0,5 \cdot 10^{-3} T - 0,23 \cdot 10^{-3} C - 0,6 \cdot 10^{-5} \omega - 0,36 \cdot 10^{-4} TC - 0,27 \cdot 10^{-5} T\omega + 0,2 \cdot 10^{-5} C\omega . \quad (6)$$

Она позволяет рассчитать температурный коэффициент уменьшения генераторного момен-

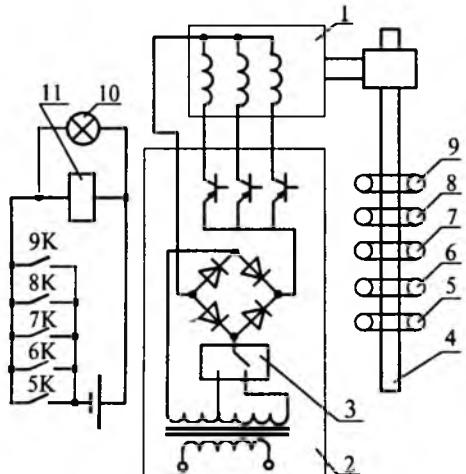


Рис.4. Схема исполнительного механизма с простейшими цепями контроля технического состояния

та в функции температуры, скорости вращения ротора и емкости нагрузочных конденсаторов, значения которых выражены в градусах Цельсия, оборотах в минуту и микрофарадах, соответственно. Расчетная характеристика тормозного электромагнитного момента горячей машины, полученная по (5) и (6), показана на рис.3, кривая 3.

Интересная возможность дальнейшего повышения надежности механизма с индукторной машиной открывается благодаря тому, что вследствие необходимости работы на очень низких частотах ее номинальный ток и ток КЗ практически совпадают. Это качество позволяет манипулировать током в пределах до номинального, добиваясь уравновешивания нагрузки предельным электромагнитным моментом двигателя, т.е. таким, который он развивает при угле нагрузки $\theta_n = \pi/2$.

Используя зависимость предельного электромагнитного момента двигателя от тока его якоря, которая для каждого двигателя есть величина однозначная и монотонно возрастающая, можно производить косвенные измерения момента нагрузки и трения в механизме. Это трение, измеренное в долях от определенных базисных (паспортных) значений, может служить характеристикой состояния механизма.

В простейшем варианте исполнительного механизма с элементами контроля технического состояния в блок управления введен переключатель источника питания с номинального на один или несколько пониженных уровней мощности (рис.4). Каждому из пониженных уровней ставится в соответствие характерное значение трения в механизме. Соответствие устанавливается через известную для каждой конкретной модификации двигателя зависимость предельного момента нагрузки от тока.

Для механизма с одним пониженным уровнем мощности по рис.4 в качестве характерного значения трения в механизме следует принять

максимально допустимое значение трения, указанное в паспорте на механизм. Переключатель на пониженный уровень подводимой мощности 3 в блоке управления 2 двигателем 1 переводит привод в режим проверки технического состояния. В этом режиме начинается подъем РО 4 из нижнего положения вверх до некоторой высоты, допустимой по условиям эксплуатации. Через заданный промежуток времени, определяемый синхронной скоростью вращения ротора двигателя, фиксируется наличие РО в требуемом положении или его отсутствие. Положение РО определяется посредством катушек 5-9 датчика положения, на выходах 5K-9K которогорабатывается сигнал «Неисправность исполнительного механизма», в случае отсутствия РО в требуемом положении. Сигнал выдается на устройство индикации 10 и на элементы автоматики 11, вводящие в действие цепи принудительного опускания РО вместо режима обесточивания (на рис.4 не показаны).

В рассмотренном варианте исполнительного механизма с режимом проверки технического состояния может быть несколько уровней пониженной мощности,рабатывающих предупреждения различной степени категоричности: от осторожного предупреждения, предназначенного только для принятия к сведению, до настоятельного требования замены механизма. В сочетании с другими методами диагностирования можно организовать более сложные схемы технической диагностики, позволяющие не только определять текущее состояние механизма, но и делать прогноз его остаточного ресурса, а также проверять исправность отдельных его частей.

Исполнительные механизмы с элементами контроля технического состояния по току двигателя уже нашли применение на действующих объектах, в частности на ледоколах. Экспериментально подтверждено, что минимальный ток двигателя, при котором обеспечивается нормальное, без заеданий, функционирование механизма, монотонно возрастает с увеличением продолжительности эксплуатации. По мере выработки ресурса минимальный ток, а следовательно, и трение в механизме приобретают экспоненциально нарастающий характер. Дальнейшая эксплуатация такого механизма становится невозможной без принудительного перемещения РО вниз посредством включения двигателя. Такой механизм требует замены.

Рассмотренные механизмы вертикального перемещения являются предельными с точки зрения предъявляемых требований к безотказности работы и ресурсу, а применяемые в них индукторные машины — одним из наиболее надежных типов двигателя. Поэтому технические решения, направленные на оптимизацию процесса преобразования энергии в таком механизме, на повы-

шение оперативности контроля его состояния, позволяют в максимальной степени приблизиться к абсолютным показателям по функциональной надежности при многолетнем сроке эксплуатации. Тем самым создается задел в виде комплекса перспективных технических решений, применимых для создания электропривода сверхвысокой надежности в других областях техники: там, где это качество должно быть получено в особо тяжелых и экспериментальных условиях.

Список литературы

1. Бамдас А.М., Леонтьев А.И., Титов Е.Г., Юрченко А.И. Исполнительные электродвигатели и элементы автоматики сервоприводов ядерных реакторов. М.: Атомиздат, 1971.
2. Емельянов И.Я., Воскобойников В.В., Масленок В.А. Основы проектирования механизмов управления ядерных реакторов. М.: Атомиздат, 1978.
3. Юрьевич Г.П., Мерлин Л.М., Курахтанов Г.И. и др. Электроприводы регулирующих органов ядерных реакторов. М.: Энергоатомиздат, 1985.
4. Дискретный электропривод с шаговыми двигателями/Под ред. М.Г.Чиликина. М.: Энергия, 1971.

5. А.с. 350104 СССР. Электрический шаговый двигатель/С.Д.Истомин, Е.Г.Титов, В.С.Пронин, И.И.Жучков//Открытия. Изобретения. 1972. № 26.

6. Смирнов А.Ю. Расчет электрических машин с магнитоэлектрическим индуктором методом проводимостей зубцовых контуров//Электричество. 1989. № 12.

7. А.с. 1632237 СССР. Устройство для вертикального перемещения регулирующего органа/А.Ю.Смирнов, А.Ю.Гурьев, В.И.Будцин//Открытия. Изобретения. 1996. № 34.

8. А.с. 1692270 СССР. Устройство для вертикального перемещения регулирующего органа/В.И.Будцин, А.Ю.Смирнов, А.Ю.Гурьев//Открытия. Изобретения. 1996. № 34.

9. Пат. 2030798. Россия. Устройство для вертикального перемещения регулирующего органа/А.Ю.Смирнов//Открытия. Изобретения. 1995. № 7.

10. А.с. 1676007 СССР. Трехфазно-однофазная совмещенная обмотка/А.Ю.Смирнов//Открытия. Изобретения. 1991. № 33.

11. Смирнов А.Ю. Подразделенные обмотки и их применение в электрических машинах переменного тока//Электричество. 1995. № 7.

12. Ивоботенко Б.А., Ильинский Н.Ф., Копылов И.П. Планирование эксперимента в электромеханике. М.: Энергия, 1975.

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ

О некоторых процессах, происходящих в жидкостях при бесконтактном действии электрического поля

КРАСИКОВ Н.Н., академик АЭН, ШУВАЕВА О.В., инж. КОКУНИН А.В.

Рассматривается принципиальная возможность применения электрических полей высокой напряженности в технологических процессах, связанных с фазовыми превращениями, устойчивостью супензий.

Экономия электрической энергии в технологических процессах обычно связывается с уменьшением тепловых потерь, которые пропорциональны I^2 . Пренебрежимо малыми токами отличается применение энергии в электрополевой форме, которое было успешно реализовано в электрофильтрах Котреля, используемых для очистки газообразных сред от твердых и жидких примесей, при других применениях сильных полей [1].

Ранее [2,3] было предложено использовать электрополевое воздействие источника $U = 20$ кВ на воду при отсутствии электрического контакта ее с электродами, когда верхний электрод был отделен от жидкости воздушной прослойкой, а нижний — диэлектрическим днищем сосуда. Было однозначно установлено повышение биологической активности такой воды в отношении развития растений, при лечении заболеваний. Использование электрообработанной воды при замесе

увеличивало прочность силикатного кирпича на 12—15%. Отмеченный эффект обусловлен объемно-зарядовой поляризацией жидкости по К.М.Поливанову [4].

Практическое использование электрических полей не ограничивается отмеченным. Нами сделана попытка при сохранении методики электрообработки [2] рассмотреть их влияние на фазовое превращение испарения жидкостей, что характеризовалось изменением их массы, определяемой на микроаналитических весах с погрешностью 0,1 мг. Отмечено (рис.1) более активное испарение воды по сравнению с неполярной жидкостью ($\epsilon=2$) — углеводородом парафинового ряда — додеканом ($C_{12}H_{26}$). Для воды, являющейся полярной жидкостью ($\epsilon=81$), характерно усиление испарения, причем сильнее в случае нахождения анода над поверхностью жидкости, чем при противоположном расположении элек-

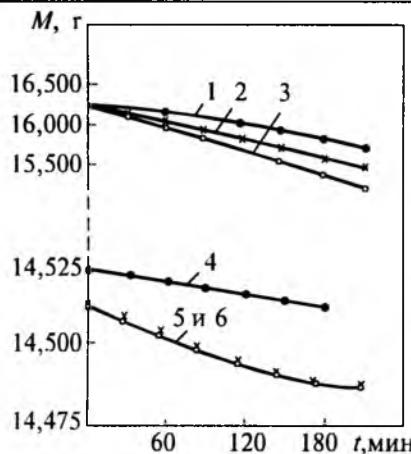


Рис.1. Зависимость изменения жидкостей M от времени электрообработки для дистилированной воды (1, 2, 3) и додекана (4, 5, 6) масштаб по ординате разный для разных жидкостей:

1, 4 — контрольные образцы; 2, 5 — при катоде над поверхностью жидкости; 3, 6 — при аноде над поверхностью жидкости

трода. Для неполярной жидкости, хотя и имеется некоторое усиление полем перехода жидкости в пар, но оно практически не зависит от направления действующего поля и существенно меньше, чем у воды. Контрольные образцы характеризуют испарение жидкостей при отсутствии электрического поля.

В технологических процессах часто приходится иметь дело с коллоидно-дисперсными системами, поэтому интересно характеризовать действие электрического поля на устойчивость таких систем. Нами изучено поведение кварца в дистилированной воде концентрацией около 500 мг/л. Седиментация частиц кварца характеризовалась косвенно изменением оптической плотности, измеряемой при помощи фотоэлектрокалориметра в процентах от оптической плотности исходной воды. Отмечено в этом случае (рис.2) некоторое повышение устойчивости при

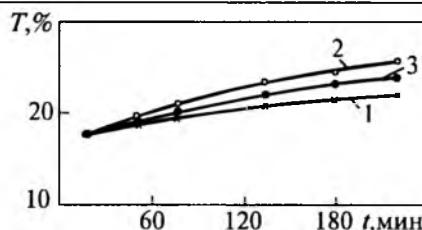


Рис.2. Зависимость оптической плотности суспензии кварца T от оптической плотности дистиллированной воды для образцов:

1 — контрольного; 2, 3 — в поле при расположении анода снизу и сверху жидкости, соответственно

электрообработке, причем оно резче при нахождении анода под жидкостью. При этом заряд частиц кварца не установлен.

Детальная интерпретация происходящих явлений может осуществляться на молекулярном уровне. Однако следует отметить, что в рассмотренных случаях характерно избирательное влияние электрического поля на полярные компоненты, каковыми могут являться молекулы H_2O либо поляризующиеся частицы кварца в жидкости.

Таким образом электрические поля, в принципе, могут влиять на испарение жидкостей, на устойчивость дисперсий. Эффект, хотя и представляется на данном этапе малым, но при соответствующем подходе может применяться в технологиях с жидкостями.

Список литературы

- Попков В.И., Левитов В.И., Ларинов В.П. и др. Состояние и перспективы научных исследований в области применения сильных электрических полей// Электричество. 1977. № 9. С. 1—8.
- Красиков Н.Н. Электроактивация воды//Электротехника. 1996. № 4. С. 57—59.
- Красиков Н.Н. К моделированию электрополевой активации воды//Электротехника. 1999. № 3. С. 58—60.
- Поливанов К.М. Теория электромагнитного поля. М.: Энергия, 1969.

**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: 254-11-52

Выбор вторичных напряжения и тока первой ступени трансформатора дуговых сталеплавильных печей

САВИЦКИ А. канд.техн.наук

Ченстоховский политехнический институт (Польша)

Указанны проблемы выбора электрического режима дуговых сталеплавильных печей большой мощности. Введен показатель интенсивности дуг. На его основе разработана новая классификация печей. Рассчитаны потоки энергии дуг в основных стадиях плавления шихты. Дано физическое объяснение индекса износа футеровки В.Е. Швабе, который в настоящее время применяется в печестроении. Решена проблема однозначного расчета требуемого напряжения U_{2l} и тока $I_N = I_e$ первой ступени печного трансформатора.

В мировой практике эксплуатации дуговых сталеплавильных печей переменного тока (ДСП) большой емкости (70—100 т и более) наблюдаются тенденции выбора электрических режимов работы, которые отличаются большим разнообразием и часто противоречат друг другу. Отдельные ведущие печестроительные фирмы мира накопили значительный опыт проектирования и эксплуатации ДСП. На его основе однозначно установлено, что в мощных и сверхмощных печах независимо от требуемого увеличения мощности печного трансформатора необходимо повышать линейное напряжение U_{2l} его первой ступени. В выборе рабочего тока I_N существующие мнения противоречивы. Традиционное мнение [1] предусматривает его значение меньше тока I_m , которому соответствует достижение максимума мощности электрических дуг (табл.1).

Как следует из табл.1, большинство современных металлургических печей указанного класса имеет рабочий ток I_N меньший тока I_m . Одновременно высказывается мнение [2] о необходимости работы печей с короткими дугами и током $I_N > I_m$. Например, в таком режиме работает печь одной из японских фирм (печь 1 в табл.1). Некоторые российские печи (печи 8—10 в табл.1)

работают, напротив, с токами $I_N \ll I_m$ вблизи значений тока I_f , которому соответствует максимальное значение индекса износа футеровки Швабе R_F . От рабочего тока дуг I_N зависят все энергетические показатели работы печи. Несмотря на определяющее значение тока дуги в современных методах проектирования ДСП его выбор остается неопределенным. В этой связи неоднозначной является и принятая сегодня классификация печей по мощности печного трансформатора. Одной и той же мощности трансформатора в стадии плавления твердой загрузки соответствуют два режима работы печи. Первый связан с короткими дугами (низкоимпедансные печи), а другой — с режимами длинных дуг (высокоимпедансные печи). Длина же дуги зависит не только от значения напряжения U_{2l} трансформатора, но и от тока I_N . Поэтому энергетические показатели и интенсивность плавления шихты зависят не столько от мощности трансформатора S_t , сколько от соотношения напряжения U_{2l} и тока I_N высшей ступени печного трансформатора, а также от приведенных сопротивлений R и X электрического контура печи.

Показатель интенсивности дуг ДСП. При выборе параметров печного трансформатора необходимо учитывать интенсивность плавления дугами твердой загрузки. Ее повышение сокращает время расплавления шихты и снижает расход электроэнергии на тонну выплавленной стали. Если дуги горят в колодцах, то интенсивность плавления шихты зависит прежде всего от уровня мощности излучения плазмы столба дуги P_e . Вместе с тем, как показали исследования [3], доля мощности излучения плазмы от полной мощности дуги может изменяться в широких пределах в зависимости от указанных параметров трансформатора и сопротивлений электрического контура печи. Возможность получения максимальной интенсивности излучения плазмы дуг в печи зависит от напряжения первой ступени трансформатора U_{2l} и тока короткого замыкания печи I_z . В [3] был предложен параметр K_q в качестве показателя интенсивности дуг печи:

Таблица 1

Параметры действующих промышленных ДСП вместимостью 70—100 т

Печь № — страна	Q , т	R , мОм	X , мОм	U_{2l} , В	I_f , кА	I_e , кА	I_m , кА	I_N , кА	K_q (МВ·А) μ
1—J*	70	0,6	3,0	435	41,9	35,3	53,4	60	0,51
2—J	70	1	4,5	650	40,7	42,3	52,1	40	0,756
3—J	70	0,805	2,9	610	57,3	60	73,7	67,5	1,02
4—It	80	0,517	4,614	627	42,1	42,9	52,2	44	0,611
5—It	80	0,621	7,682	802	33	35,4	40	35,9	0,602
6—It	80	0,514	4,505	880	59,4	67,2	75,1	65,4	1,233
7—Ru	100	0,28	4,19	761	57,5	62,8	71,7	60,7	0,796
8—Ru	100	0,3	3,5	573	50,9	52,7	64	50,5	0,54
9—Ru	100	0,5	2,8	478	49,5	46,6	63,1	38,8	0,464
10—Ru	100	0,58	3,1	486	45,4	42,7	57,8	34,6	0,432
11—Ru	100	0,575	3,35	417	36,8	30,5	46	34,6	0,295

* J — Япония; It — Италия; Ru — Россия.

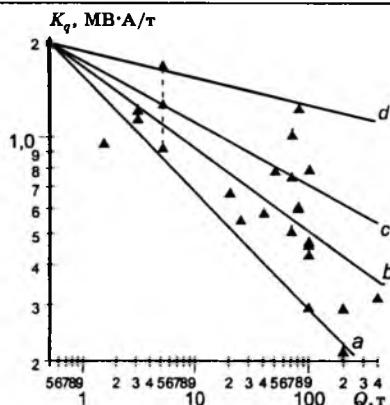


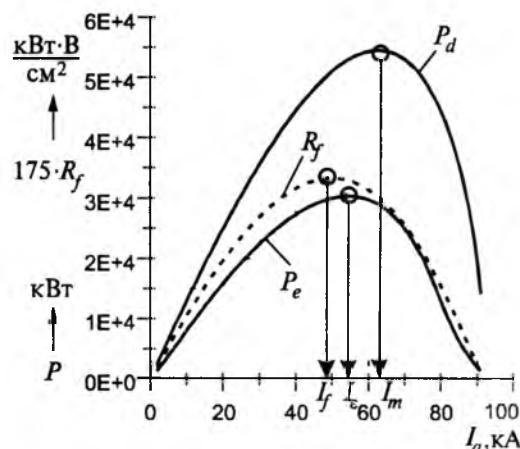
Рис.1. Показатель интенсивности дуг ДСП

$$K_q = \frac{U_{2l} I_z}{1000 Q} = \frac{U_{2l}^2}{1000 Q \sqrt{R^2 + X^2}} = \frac{U_{2l}^2}{1000 Q Z}, \quad (1)$$

здесь K_q в мегавольт-амперах на тонну; I_z — в килоамперах; U_{2l} — в вольтах; Q — вместимость печи, т; R, X, Z — в мегаомах.

На рис. 1 показана зависимость показателя интенсивности K_q от вместимости Q большинства известных из литературы действующих печей. Здесь также построено несколько граничных кривых, разделяющих области, которым соответствуют определенные мощности ДСП. На рис.1 применены степенные функции: a — печи нормальной мощности с показателем ниже границы $K_q = 1,55 Q^{-0,36}$ (МВ·А)/т; b — печи большой мощности с показателем ниже границы $K_q = 1,65 Q^{-0,26}$ (МВ·А)/т; c — печи ультрабольшой мощности с показателем ниже границы $K_q = 1,75 Q^{-0,2}$ (МВ·А)/т; d — печи суперультрабольшой мощности с показателем ниже границы $K_q = 1,88 Q^{-0,09}$ (МВ·А)/т. Указанный показатель позволяет связать возможности печи по интенсивности дуг с напряжением U_{2l} первой ступени трансформатора и сопротивлениями R, X — электрического контура печи. Он отличается от применяемых до сих пор соотношений установленной на данной печи мощности трансформатора S_{tr} к массе или объему ванны жидкого металла. Однако показатель K_q свидетельствует только о возможностях получения в данной печи некоторого максимального уровня мощности излучения. Чтобы получить этот уровень мощности, а следовательно, и максимальную плавящую способность дуг, необходимо найти рабочий ток печи $I_N = I_e$, обеспечивающий максимальный уровень мощности излучения дуг (см. рис.2).

Расчет мощности излучения дуг ДСП. Разработанные методы теории двухслойной дуги [4] позволяют рассчитать мощность излучения единицы длины дуги p_e как функцию тока I_a в каждой стадии плавления стали в ДСП: стадии $F1$ начала плавки; основной стадии $F2$ плавки твердой загрузки, когда дуги горят в колодцах; стадии $F3$

Рис.2. Характерные токи ДСП (P_d — полная мощность дуг; P_e — мощность излучения трех дуг; R_f — индекс износа футеровки)

конца расплавления шихты, когда дуги горят в области шлака; стадии $F4$ рафинирования металла с открытыми дугами. На рис.3 приведены рассчитанные функции $p_e(I_a)$ возможных типовых четырех стадий плавления стали в ДСП.

Если известна функция длины от тока дуги $l_a(I_a)$ и заданы электрические параметры трансформатора и печи, то может быть рассчитана мощность излучения дуги P_e . Расчет этой функции может быть выполнен совместным решением двух уравнений:

— уравнения цепи

$$U_a(I_a) = \sqrt{(U_{2f})^2 - (I_a X)^2} - I_a R, \quad (2)$$

где U_a — напряжение дуги; U_{2f} — фазное вторичное напряжение трансформатора;

— и уравнения длины дуги

$$l_a(I_a) = \frac{\sqrt{2}[U_a(I_a) - \alpha]}{\beta(I_a)}, \quad (3)$$

где α — сумма приэлектродных падений напряжения дуги;

с учетом известной функции градиента напря-

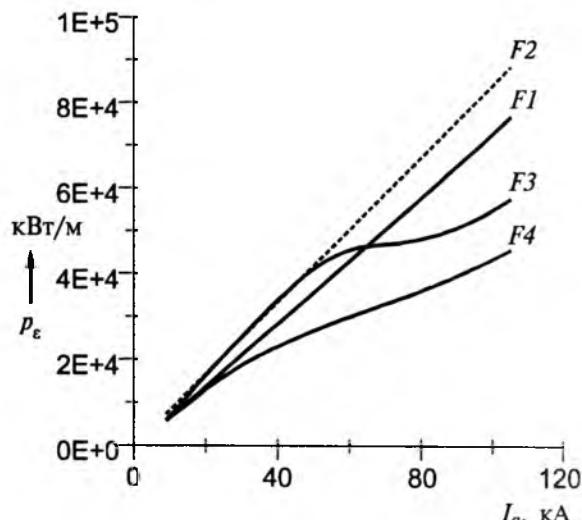


Рис.3. Функции излучения дуг ДСП

жения $\beta(I_a)$. Метод расчета этой функции в конкретной стадии плавления шихты изложен в [3].

Таким образом, мощность излучения трех дуг с равномерным распределением мощности по фазам можно рассчитать как:

$$P_e = 3p_e(I_a)I_a(I_a). \quad (4)$$

На рис.2 показаны рассчитанные зависимости полной мощности $P_d = 3P_a$, мощности излучения плазмы $P_e = 3P_e$ трех дуг и индекса износа футеровки В.Е. Швабе R_f печи ультрабольшой мощности (граница c) вместимостью 100 т. Она работает в стадии $F2$ и имеет: сопротивления электрического контура $R = 0,5$ мОм, $X = 4,6$ мОм; вторичное напряжение первой ступени трансформатора $U_{2l} = 747,4$ В; показатель интенсивности $K_q = 0,697$ (МВ·А)/т. Как показывают этот расчет и расчеты характеристик других печей нормальной, большой, ультрабольшой и суперультрабольшой мощности вид функции излучения $P_e(I_a)$ совпадает с функцией индекса износа футеровки $R_f(I_a)$:

$$R_f = \frac{P_a U_a}{a^2}, \quad (5)$$

где P_a — мощность одной дуги, кВт; a — расстояние между центром столба дуги и ближайшей точкой футеровки, см (печи вместимостью 100 т соответствует $a = 175$ см).

Обычно ток I_e , соответствующий максимуму функции излучения $P_e(I_a)$, лежит между током I_m , максимального значения мощности дуги и током I_f , при котором индекс износа футеровки достигает максимального значения. Однако в печах нормальной мощности (граница a) или в печах с низким напряжением U_{2l} ток I_e может быть меньше тока I_f , т.е. максимум излучения дуг находится в данном случае левее максимума индекса R_f . В общем случае взаимное расположение токов I_f , I_e , I_m зависит от напряжения U_{2l} трансформатора, сопротивлений R , X , Z электрического контура и показателя интенсивности K_q . В табл.1 приведены значения этих токов известных промышленных печей японских, итальянских и российских фирм вместимостью от 70 до 100 т, работающих в стадии $F2$. Они подтверждают этот вывод.

Выбор вторичных напряжения и тока первой ступени напряжения печного трансформатора. Данные, помещенные в табл.1, свидетельствуют о

работе большинства печей с токами меньшими, чем ток I_m . В зависимости от показателя K_q , напряжения трансформатора U_{2l} , приведенных сопротивлений R , X электрического контура рабочий ток I_N большинства действующих промышленных печей имеет тенденцию к сближению с током I_e , соответствующим максимальной мощности излучения P_e дуг. Эта тенденция была установлена фирмами на основе многолетнего опыта проектирования и наладки печей. Опыт ведущих печестроительных фирм обеспечил работу печей с энергетическими параметрами, близкими к оптимальным. Необходимо отметить, что он косвенно подтверждает теоретический вывод о первостепенном влиянии уровня излучения дуг на интенсивность нагрева и плавления твердой загрузки. В этой связи надо выбирать напряжение U_{2l} и ток I_N первой ступени трансформатора, обеспечивающие максимальную плавящую способность дуг в стадиях $F1$ и $F2$. Можно воспользоваться расчетным значением тока I_e , которому соответствует достижение максимального значения мощности излучения дуг с заданными сопротивлениями R , X электрического контура и выбранным напряжением U_{2l} печного трансформатора. Расчет же требуемого значения напряжения U_{2l} необходимо проводить по показателю интенсивности дуг K_q , задаваемому в соответствии с типом печи и технологией плавления. Тип печи следует устанавливать в соответствии с принятой классификацией уровня мощности по показателю интенсивности K_q . В этом случае напряжение первой ступени трансформатора можно рассчитать по формуле:

$$U_{2l} = \sqrt{1000 K_q Q \sqrt{3(R^2 + X^2)}}, \quad (6)$$

где U_{2l} — в вольтах; Q — в тоннах; R , X — в миллиомах.

В табл.2 помещены результаты расчета напряжения U_{2l} и тока I_N первой ступени трансформатора печей различного уровня мощности и приведенных сопротивлений R , X , Z электрического контура. Этот случай касается равномерного распределения мощности по фазам.

Следует отметить, что в табл.2 включена печь 5 итальянской фирмы “DANIELI” с реально существующим завышенным значением реактивного сопротивления X . Оно получено за счет вклю-

Таблица 2

Результаты расчета напряжения U_{2l} и тока I_N первой ступени трансформатора ДСП

K_q , (МВ·А)/т	R, X, Z, мОм											
	0,5; 2,85; 2,84			0,5; 4,0; 4,03			0,5; 4,6; 4,63			0,5; 7,7; 7,72		
	U_{2l} , В	$I_N = I_e$, кА	I_a , м	U_{2l} , В	$I_N = I_e$, кА	I_a , м	U_{2l} , В	$I_N = I_e$, кА	I_a , м	U_{2l} , В	$I_N = I_e$, кА	I_a , м
0,3 (a)	384,4	31,2	0,065	457,7	30,8	0,098	490,3	30,6	0,112	633,5	26,5	0,176
0,5 (b)	496,3	49,4	0,107	590,9	45,7	0,151	633	44,2	0,169	817,8	36,7	0,253
0,7 (c)	587,2	63,2	0,146	699,1	57,1	0,198	749	55,1	0,219	967,7	44,9	0,318
1,2 (d)	768,9	82,7	0,239	915,3	77,3	0,301	980,7	73,4	0,334	1267	61,6	0,449

чения в электрический контур дополнительных реакторов. Это решение приводит к лучшему симметрированию нагрузки печи по фазам и значительно улучшает стабильность горения дуг. Однако такое решение переводит печь в высокоимпедансный режим работы во всех категориях показателя K_q и требует выбора существенно больших значений напряжения U_{2l} трансформатора. Чем ближе к верхнему левому углу табл.2, тем печь имеет более низкий импеданс и короткие дуги. Эти величины возрастают, если увеличиваются значения показателя K_q и сопротивления R, X печи.

Выводы

1. Разработанная теория двухслойной дуги и ее методы позволяют найти физическое объяснение индексу износа футеровки Швабе, который соответствует характеру изменения уровня мощности излучения плазмы дуг ДСП. Предложенный метод расчета мощности излучения дуг в дуговых печах трехфазного тока решает проблему неопределенности выбора рационального тока печи в стадиях плавки твердой загрузки. Разработанный метод выбора тока $I_N = I_e$ соответствует результатам многолетнего опыта проектирования и наладки ДСП ведущих мировых фирм.

2. Решена проблема однозначного расчета требуемого напряжения U_{2l} первой ступени печного трансформатора, которое обеспечивает заданную интенсивность и плавящую способность дуги. Это получается в данном типе печи, работающей с заданной технологией плавления стали, определенной коэффициентом интенсивности дуг K_q .

Список литературы

1. Электрические промышленные печи. Дуговые печи и установки специального нагрева: Учебник для вузов/А.Д. Свенчанский, И.Т. Жердев, А.М. Кручинин и др. М.: Энергоиздат, 1981.
2. Смоляренко В.Д. Высокомощные дуговые сталеплавильные печи. М.: Энергия, 1976.
3. Sawicki A., Kruczynin A.M. Zagadnienie doboru optymalnych stanów pracy stalowniczych pieców łukowych prądu przemiennego//Przegląd Elektrotechniczny. 1998. № 1.
4. Sawicki A., Krouchinin A.M. Modelling the cylindrical part of the effective arc in steelmaking AC arc furnaces// Elektrowärme International Ed.B. 1998, Dezember B4.

Савицки Антони — заведующий кафедрой электротехнологии Ченстоховского политехнического института (ЧПИ, Польша). Окончил электрический факультет ЧПИ в 1977 г. В 1988 г. защитил кандидатскую диссертацию по теме "Анализ условий и разработка критериев возникновения хаотических процессов в электрических цепях применительно к задачам электротехники и электроэнергетики" в МЭИ.

Перспективы развития физико-химической диагностики маслонаполненного оборудования

АРАКЕЛЯН В.Г., доктор техн. наук, канд. хим. наук

ВЭИ

Применение методов физической химии в диагностических целях определено существом химических процессов, протекающих в изоляции электрооборудования. Рассматриваются три направления физико-химической диагностики: для кабелей, конденсаторов и для трансформаторов, реакторов и вводов. Предложена модель диагностики маслонаполненных кабелей. Расчеты на основе данных хроматографического анализа газов и воды значительно расширяют диагностические возможности физико-химического контроля. Результаты анализа по газам и воде могут быть выражены в виде ресурсных показателей оборудования.

Физико-химическая диагностика маслонаполненного электрооборудования (МНЭО) заняла прочное место в системе диагностического контроля состояния высоковольтной изоляции. Физико-химический контроль простирается от раннего обнаружения дефекта практически во всех видах оборудования для непрерывного наблюдения за работоспособностью дефектного оборудования на последней стадии эксплуатации — пе-

ред пробоем. Объектами физико-химической диагностики могут быть любые аппараты, содержащие жидкую изоляцию. Сущность физико-химической диагностики состоит в определении причин образования тех или иных химических соединений в жидкой изоляционной среде. Анализ содержания легких газов и воды в трансформаторном масле составляет основу диагностического заключения. Сегодня физико-химические

диагностические методы способны не только констатировать состояние изоляции высоковольтного МНЭО, но делают первые шаги на пути прогнозирования остаточного ресурса.

Если для какого-либо параметра установлены допустимые границы (от r_0 до r_1), то для этого параметра может быть установлен ресурс как местоположение текущего значения r этого параметра внутри установленных границ. Ресурс может быть выражен либо в виде значения использованного ресурса (в процентах) $R_{\text{исп}} = (r - r_0)/(r_1 - r_0) \cdot 100$, либо в виде значения оставшегося ресурса (в процентах) $R_{\text{ост}} = (r_1 - r)/(r_1 - r_0) \cdot 100$ или, если известна функция изменения этого параметра во времени $\Delta r/\Delta t$ (в единицах времени), $R_{\text{ост}} = (r_1 - r)/(\Delta r/\Delta t)$.

Электрические характеристики (тангенс угла диэлектрических потерь изоляции оборудования, сопротивление изоляции оборудования, пробивное напряжение масла, тангенс масла, проводимость масла) составляют существу требований, сформулированных конструкторской документацией. Они положены в основу конструирования и функционирования оборудования. Эти требования должны выполняться в течение всего срока эксплуатации. Можно подсчитывать ресурс по этим параметрам, принимая значение при заводских испытаниях за начальное и нормативное значение — за граничное. Значение определенного таким способом ресурса будет ориентировать ответственный персонал в ситуации с конкретным аппаратом. Но нарушение нормативного требования однозначно должно повлечь за собой вывод оборудования из эксплуатации.

В отличие от электрических характеристик физико-химические характеристики не являются такими же строгими для исполнения в процессе эксплуатации. Колебание характеристик масла допускается в широких пределах. Их отклонения не станут причиной отключения оборудования. При отключении оборудования по другим причинам (в частности, ставшими причиной изменения характеристик масла) несоответствие физико-химических характеристик масла послужит причиной замены масла или его регенерации.

Поэтому следует разграничить физико-химические характеристики на *определяющие качество масла и ресурсообразующие для оборудования в целом*.

Какие знания можно получить сегодня по данному физико-химического анализа?

1. Принципиальное давление газов и воды (расчет по концентрации в масле) во всем диапазоне рабочей температуры.

2. Тангенс угла потерь бумаги (расчет по воде) во всем диапазоне рабочей температуры.

3. Проводимость бумаги (расчет по воде) во всем диапазоне рабочей температуры.

4. Степень полимеризации бумаги (расчет по фурфуролу в масле).

5. Износ бумаги по воде (для абсолютно герметичного оборудования).

6. Износ бумаги по окислам углерода.

7. Температура горячей области бумаги (по окислам углерода).

8. Плотность масла.

9. Поверхностное натяжение масла.

10. Температура вспышки масла.

11. Кислотность масла.

12. Содержание антиоксиданта в масле.

13. Механические загрязнения в масле.

14. Вязкость масла.

15. Цветность масла и прочие.

Очевидно, что в качестве ресурсообразующего показателя для оборудования в целом надо принять показатель парциального давления: если расчетное значение парциального давления в проектном диапазоне рабочей температуры приближается к давлению в аппарате (оставшийся ресурс парциального давления — к нулю), аппарат следует вывести из эксплуатации для ремонтных работ. При этом аппарат еще может иметь некоторый ресурс по данному параметру, поскольку его рабочая зона температуры может быть уже проектной в данный момент. Таким путем может быть определен интервал времени для принятия решения.

Расчет электрических характеристик (тангенса угла потерь и проводимости бумаги) по результатам физико-химического анализа является чрезвычайно важным. Как и всякая электротехническая характеристика по предназначению, они требуют повышенного внимания. Эти характеристики также должны рассматриваться как ресурсообразующие для оборудования в целом.

Степень полимеризации бумаги или износ бумаги, рассчитываемые по физико-химическим показателям (фурфуролу, воде, окислам углерода), и все остальные показатели масла никогда не будут восприняты как параметры, по которым будет дана команда на отключение, и поэтому их не следует рассматривать как ресурсообразующие для оборудования в целом. Они могут быть приняты в расчет только при планировании ремонтных работ.

Таким образом, из комплекса физико-химических параметров в качестве ресурсообразующих можно принять два: **парциальное давление газов и воды и влажность твердой изоляции** (либо в виде влагосодержания, либо в виде тангенса, либо в виде проводимости).

Для решения конкретной задачи диагностики МНЭО в эксплуатации, т.е. для приложения имеющихся хроматографических возможностей к диагностике конкретных аппаратов, возникает необходимость разделить МНЭО на три группы в соответствии с тремя идеологическими направлениями диагностики. Первую идеологическую группу составляет диагностика кабелей, вторую

— диагностика конденсаторов и третья диагностическая группа объединяет силовые трансформаторы, реакторы, измерительные трансформаторы и вводы.

Диагностика маслонаполненных кабелей

Это направление диагностики только нашупывает свои возможности или, сказать другими словами, проходит период своего теоретического становления [1].

Главная идеологическая задача — определение местоположения дефекта и оставшегося ресурса. В том и состоит особенность диагностики маслонаполненного кабеля, что кроме решения обычной для МНЭО задачи раннего обнаружения дефекта и определения его опасности возникает еще более важная задача определения его местоположения.

Рассмотрим вариант работающего кабеля. Задача оказалась намного сложнее, чем мы предположили сначала [2]. При очень многих ограничениях уравнение, описывающее этот диффузионный процесс, для определения концентрации включает табличные значения функции ошибок. Решение по уравнению такого вида в обратную сторону если возможно, то затруднительно. Но если это решение и возможно, то ни принятые ограничения, ни точность решения не могут быть приемлемы.

При определении места повреждения отключенного кабеля (выведенного из эксплуатации в результате пробоя) уравнение диффузии, описывающее этот процесс, приобретает вид

$$C = \frac{Q}{2S(\pi D\tau)^{1/2}} \exp\left(-\frac{x^2}{4D\tau}\right), \quad (1)$$

где C — концентрация компонента i ; Q — объем компонента i , образовавшийся при пробое; S — площадь сечения кабеля по маслу; τ — время от момента пробоя (известное значение); x — расстояние от места измерения концентрации до места пробоя; D — коэффициент диффузии.

Решение этого уравнения имеет ряд существенных ограничений. Место пробоя x определяется по результатам двух последовательных анализов (в моменты времени τ_1 и τ_2 — известные значения) из двух соединительных муфт (рисунок):

$$x = \frac{L}{[\ln(C_{2,\tau_1}^{1/2}/(C_{2,\tau_2}^{1/2}))/\ln(C_{1,\tau_1}^{1/2}/(C_{1,\tau_2}^{1/2}))]^{1/2} + 1}. \quad (2)$$

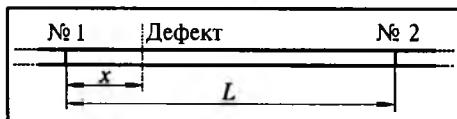


Схема кабеля с обозначениями (момент времени τ_1 : концентрация: C_{1,τ_1} (в точке отбора № 1); C_{2,τ_1} (в точке отбора № 2); момент времени τ_2 : концентрация: C_{1,τ_2} (в точке отбора № 1); C_{2,τ_2} (в точке отбора № 2))

Отключенный кабель испытывает меньшие воздействия температуры, так как на него воздействуют только циклические атмосферные колебания температуры. Это способствует большей точности расчета, но при этом возрастает время распространения компонентов.

Математический анализ показывает, что расчет места может быть выполнен с удовлетворительной точностью (до 5%). Можно предполагать также, что влияние действия этого дефекта до пробоя не окажется существенным.

Основная проблема в этом варианте состоит в правильном выборе интервалов времени для анализов с целью получения значимых результатов в точках отбора. Может оказаться, что необходимые для расчета интервалы времени не устраивают заказчика или диагностическая возможность уже упущена (кабель пробит давно и определить что-либо невозможно).

Диагностика конденсаторов

Силовые высоковольтные конденсаторы, как правило, являются изделиями неремонтопригодными. Их диагностический физико-химический контроль посредством отбора проб масла возможен, но, на наш взгляд, из-за невысокой цены нецелесообразен. Поэтому для силовых конденсаторов определился другой идеологический подход: состояние изоляции и ресурс важно определить не в эксплуатации, а до нее — при приемо-сдаточных испытаниях. Итак, главная идеологическая задача этой диагностической группы — определение ресурса оборудования перед пуском его в эксплуатацию.

Такой подход оказался эффективным для импульсных конденсаторов [3—5], когда проба масла отбиралась в ходе заводских приемо-сдаточных испытаний после двадцати циклов «заряд-разряд» при приложении испытательного напряжения, равного 1,1 номинального. При этом оказалось достаточным определение концентрации только одного газа — ацетилена для выявления потенциально ненадежных изделий. Ресурс конденсатора в виде среднего числа импульсов N устанавливается по содержанию ацетилена в конденсаторном масле

$$N = 6,2 \cdot 10^3 C_{\text{C}_2\text{H}_2}^{-0,64} \text{ для ИК-100-0,4.} \quad (3)$$

Простота методики объясняется спецификой старения указанных силовых импульсных конденсаторов: отсутствие тепловых процессов и старения под действием частичных разрядов низкой интенсивности. Интересно отметить, что в импульсных конденсаторах, как и в силовых трансформаторах, «задержка» распределения растворенных в масле газов отсутствует. Это происходит за счет электродинамических сил взаимодействия обкладок, определяемых высоким значением напряженности электрического поля в ди-

электрике (более 80 кВ/мм). При этом силы взаимодействия обкладок настолько велики, что жидкость, находящаяся между слоями диэлектрика, выталкивается, а затем втягивается с частотой, в два раза превышающей частоту приложенного электрического поля. Тем самым обеспечивается интенсивное перемешивание жидкости.

Выполнение анализа масла из конденсаторов на ацетилен в процессе заводских приемо-сдаточных испытаний позволило рассортировать конденсаторные изделия по ресурсу, определить целесообразность их использования в тех или иных объектах и цену.

Диагностика силовых, измерительных трансформаторов, реакторов и вводов

Существует много методик для оценки состояния силовых трансформаторов и реакторов по результатам хроматографического анализа. История развития метода насчитывает уже три десятилетия. Тем не менее, оценка состояния указанного оборудования проводится в основном по трем критериям:

- граничные концентрации газов;
- скорости нарастания концентраций;
- отношения концентрации характерных пар газов.

Граничные концентрации дифференцируют состояние изоляции оборудования на «нормальное» и «возможно дефектное». Граничные концентрации газов устанавливаются на основе статистической обработки результатов анализа растворенных в масле газов. При этом оценка граничных концентраций проводится с учетом градации по классу напряжения, срокам эксплуатации оборудования, марки залитого в трансформатор масла, типу защиты масла и т.д. Некоторые энергосистемы устанавливают граничные значения самостоятельно, хотя, конечно, при этом пользуются опытом, накопленным другими энергосистемами.

При оценке состояния оборудования по критерию скорости нарастания концентраций исходят из того, что она не должна превышать 10% в месяц по тем газам, концентрация которых превышает граничную.

Соотношения концентрации характерных пар газов позволяют идентифицировать причину дефекта, что обуславливает газообразование — тепловыделение или электрические процессы? Согласно рекомендациям МЭК 599, где обобщены основные существовавшие ранее методы интерпретации результатов газового анализа, для оценки характера дефекта используется система кодов, основанная на соотношениях трех характерных пар газов: CH_4/H_2 , $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$ и $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$. При этом указанные критерии применяются в том случае, когда концентрация хотя бы одного газа превышает граничную. Несмотря на то, что

данний метод получил наибольшее распространение в связи с признанием его международным сообществом, он обладает некоторыми недостатками. Например, не по всем сочетаниям кодов можно судить о характере повреждения. В итоге объективный диагноз можно вынести только в 60–65% случаев. Это побудило исследователей искать другие пути. Например, методика, применяемая в Hydro-Quebec [6], в определенной степени увеличивает возможности диагностического метода. Российская методика [7, 8] использует 8 соотношений. Кроме того, весьма привлекательными являются методики Laborelec (Бельгия) [9] и ECRA (Япония) [10]. Очевидно, что наиболее эффективным путем совершенствования диагностики МНЭО на основе анализа растворенных в масле газообразных продуктов разложения изоляции является использование компьютерной техники с привлечением различных математических методов для обработки, анализа и обобщения данных.

В последние годы сделан существенный скачок на пути расширения сферы приложения физико-химической диагностики. Диагностика высоковольтных вводов и измерительных трансформаторов тока и напряжения построена на тех же принципах, что и диагностика силовых трансформаторов. Существенным отличием является то обстоятельство, что в силовых трансформаторах имеет место принудительная циркуляция масла, и, следовательно, образующиеся и растворяющиеся в масле газы без задержки распределяются по всему объему трансформатора. В высоковольтных вводах и измерительных трансформаторах принудительная циркуляция масла отсутствует, и распространение газов по объему замедлено. Возможны три основных механизма, влияющих на распределение газов в указанных объектах: конвекция, диффузия и возникновение потоков в прослойках изоляции конденсаторного типа в результате вибрации обкладок. Эффективность указанных механизмов зависит от конструкции аппарата и условий эксплуатации. Однако во всех случаях наблюдается «отставание» по времени между событием и его оценкой. Поэтому в измерительных трансформаторах и вводах используются более низкие значения граничных концентраций газов, а это увеличивает требования к анализу по чувствительности и воспроизводимости анализа и требования к качеству пробоотбора.

Идеология и тактика физико-химического диагностического контроля оборудования этой диагностической группы предполагают решение основной задачи: **исключение аварийного выхода электрооборудования из строя**. Главными методами в достижении этой цели являются: 1) своевременный вывод оборудования из эксплуатации в соответствии с объективными диагностическими показаниями (а не в соответствии с планом)

для проведения предупредительного ремонта; 2) установление непрерывного контроля (электротехнического или физико-химического мониторинга) для потенциально ненадежного оборудования (эксплуатация которого, тем не менее, возможна неопределенное, продолжительное время) с целью своевременного его отключения по достижении установленных пределов контролируемых параметров.

Практическая диагностика трансформаторного оборудования и вводов выполняется однотипно и производится по единой схеме. Один раз в полгода отбирается проба масла из оборудования для раннего определения зарождения дефекта. Если все значения концентрации газов остаются ниже граничных значений, состояние оборудования оценивается как удовлетворительное (нормальная эксплуатация), и следующий отбор пробы будет произведен через полгода. При превышении граничной концентрации выполняется повторный анализ для подтверждения отклонения и расчета скорости развития возможного дефекта. Если отклонение не подтверждается или отсутствует динамика его развития, то может быть принято решение о нормальной эксплуатации, тем более, если дополнительные определения электрических, физических, физико-химических и химических характеристик масла не показывают существенных отклонений. При подтверждении проблем определяется предположительный вид дефекта — термический или электрический — и принимается решение о дальнейшем контроле посредством мониторинга или учащенного газохроматографического анализа, что в конечном счете заканчивается рекомендациями по объему восстановительного ремонта.

Обеспечение эффективности физико-химической диагностики

Для обеспечения максимальной эффективности физико-химической диагностики необходимо выполнение следующих обязательных условий:

- обеспечение минимальной потери компонентов, растворенных в масле, при отборе, транспортировке и хранении проб масла;
- использование высокочувствительных методов анализа;
- учет адсорбционных явлений в сложной системе изоляции электроаппарата;
- использование искусственного интеллекта для диагностической интерпретации результатов анализа, построенного на знаниях специалистов высокой квалификации.

В настоящее время наибольшее распространение в качестве пробоотборников трансформаторного масла получили стеклянные медицинские шприцы с трехходовым краном. Такие пробоотборники трансформаторного масла имеют, как правило, высокую газоплотность, т.е. обеспечива-

ют максимальную сохранность газов, растворенных в трансформаторном масле, за время транспортировки. Они чрезвычайно удобны при отборе пробы и позволяют свести до минимума как потери масла, так и риск попадания атмосферного воздуха в пробу масла.

Чувствительность хроматографических методов анализа для физико-химической диагностики маслонаполненного электрооборудования установлена документами МЭК 567 и 1181. Для обеспечения высокой надежности определения реальные значения минимально определяемых концентраций должны перекрываться по крайней мере вдвое. Следует использовать автоматические приборы анализа, конструкция которых исключает контакт пробы масла с воздухом.

Так как некоторые компоненты (CO , CO_2 , H_2O) способны абсорбироваться бумагой, расчет содержания их в бумаге и общего содержания этих компонентов в аппарате приобретает особое значение как для понимания полученных в анализе значений концентрации в масле, так и для расчета состояния самой твердой изоляции.

Что касается использования искусственного интеллекта, то диагностика МНЭО еще долгое время будет оставаться искусством экспертов, но, очевидно, уже сейчас основную часть рутинных работ должны выполнять компьютеры. Среди них и те расчеты физико-химического состояния изоляции, которые отражают ее ресурс.

Расчеты физико-химического состояния изоляции

Расчет содержания водорода в оборудовании. Если анализ отобранного образца масла выполняется не сразу, то встает вопрос о возможных диффузионных потерях газов из используемого пробоотборника. Теоретически изменение концентрации за счет диффузии потери должно выражаться ниспадающей экспоненциальной зависимостью [11]

$$C_t = C_0 \exp(-at), \quad (4)$$

где C_t и C_0 — текущая и начальная концентрации водорода; t — время от отбора пробы до анализа.

Как показала практика, в пересчете нуждается только концентрация водорода как самого подвижного газа. Рекомендованные МЭК полностью стеклянные шприцы с трехходовым краном можно использовать в пределах рабочей недели без пересчета результатов анализа. Для большего интервала времени от отбора пробы до выполнения анализа производится обратный пересчет по уравнению

$$C_0 = C_t \exp(10^{-4}t), \quad (5)$$

где t — время, ч.

Расчет ресурса оборудования по парциальному давлению. Выделение образующихся под действием энергетических стрессов газообразных продук-

тов разложения в виде газовой фазы — явление опасное для высоковольтного электротехнического аппарата. Обычно определяемое общее газосодержание как сумма значений концентрации растворенных газов не может решить вопроса о приближении системы «смесь газов — масло» к насыщению, за которым последует выделение газов в виде отдельной фазы (пузырьков). Так, для масла, насыщенного водородом, общее газосодержание составит 50000 мкл/л, а например, для углекислого газа — 1000000 мкл/л, т.е. в 20 раз больше. Очевидно, это связано с коэффициентом растворимости каждого из компонентов. Начало выделения газовой фазы в условиях равновесия соответствует достижению суммой парциального давления компонентов общего давления в системе. Поэтому вопрос о приближении системы к насыщению может быть решен только на основании определения суммы парциального давления растворенных газов. Это единственный способ определения потенциальной возможности жидкой изоляции по растворению образующихся газов!

Парциальное давление растворенного газа P_i [гПа(мбар)] может быть выражено через его концентрацию в жидкости и коэффициент распределения между жидкостью и газовой фазами или формализовано [2]

$$P_i = A C_i \exp(B/T), \quad (6)$$

где T — абсолютная температура; C_i — концентрация компонента i в масле; A и B — табличные данные (табл.1).

Таблица 1

Компонент	Масло	A	B
H ₂	ГК V-35	0,43·10 ⁻²	451,77
O ₂		0,45·10 ⁻²	102,65
N ₂		0,30·10 ⁻²	409,62
CH ₄		1,44·10 ⁻²	-438,78
		2,00·10 ⁻²	-631,13
CO		0,50·10 ⁻²	214,81
CO ₂	ГК V-35	3,08·10 ⁻²	-985,39
C ₂ H ₄		3,09·10 ⁻²	-1155,85
C ₂ H ₆		5,82·10 ⁻²	-1467,56
C ₂ H ₂		4,63·10 ⁻²	-1504,79
		2,02·10 ⁻²	-927,82
C ₃ H ₆		9,68·10 ⁻²	-1940,91
C ₃ H ₈		14,04·10 ⁻²	-2164,74
n-C ₄ H ₁₀		48,61·10 ⁻²	-3087,02
n-C ₄ H ₈ -1		34,38·10 ⁻²	-2885,60

Парциальное давление воды над трансформаторным маслом может быть определено [2] по уравнению

$$P_{H_2O} = C_{H_2O} 38,34 \exp[-1041,436/(t+233,856)], \quad (7)$$

где C_{H_2O} — концентрация воды в масле, г/т; t — температура, °C.

Сумма парциального давления газообразных компонентов и воды должна быть меньше общего давления в объекте во всем диапазоне рабочей температуры. При этом необходимо учитывать явление адсорбции твердыми материалами окислов углерода и воды. Определив адсорбцию окислов углерода как функцию концентрации и температуры [2]

$$a_{CO} = C_{CO} \cdot 1,66 \cdot 10^{-9} \exp(4133/T); \quad (8)$$

$$a_{CO_2} = C_{CO_2} \cdot 1,04 \cdot 10^{-13} \exp(7773/T), \quad (9)$$

где a — адсорбция на бумаге, мл/кг; C — концентрация в масле, мкл/л; T — абсолютная температура, можно вычислить общее количество CO и CO₂ в оборудовании как сумму:

— количества газа в масле, л

$$V_m \cdot C \cdot 10^{-6}, \text{ где } V_m \text{ — объем масла, л;}$$

— количества газа в бумаге, л

$$Q_6 a, \text{ где } Q_6 \text{ — количество бумаги, т;}$$

— количества газа в газовой фазе, л

$$V_r \cdot 10^{-6} C/K, \text{ где } V_r \text{ — объем газовой фазы, л, } K \text{ — коэффициент распределения между жидкостью и газом.}$$

Количество CO и CO₂ в аппарате (л)

$$Q_{CO} = V_m C_{CO} 10^{-6} + Q_6 a_{CO} + 10^{-6} V_r C_{CO}/K_{CO} \quad (10)$$

$$Q_{CO_2} = V_m C_{CO_2} 10^{-6} + Q_6 a_{CO_2} + 10^{-6} V_r C_{CO_2}/K_{CO_2}, \quad (11)$$

где K_{CO} и K_{CO_2} рассчитываются по уравнению

$$K = A' \exp(B'/T); \quad (12)$$

A' и B' приведены в табл. 2.

Таблица 2

Компоненты	A'	B'
CO	0,560	-515,8
CO ₂	0,084	700,0

Исходя из общего количества окислов углерода в аппарате, итеративным путем определяют их концентрацию в масле и парциальное давление при любой температуре в диапазоне рабочей температуры.

Аналогичный подход при решении задачи по воде. Влажность твердых изоляционных материалов находится в состоянии динамического равновесия с влажностью масла при данной температуре. Основными видами твердой изоляции в маслонаполненных электроаппаратах являются бумага и картон, т.е. материалы целлюлозного происхождения. Влажность целлюлозной изоляции W (%) к сухой массе) в формализованном виде [2] определяется выражением

$$W = A e^{-Bt} (C_{H_2O} 28,76 \cdot 10^{-452,29/(t+233,856)})^{k+b t}, \quad (13)$$

где t — температура, °C; C_{H_2O} — концентрация воды в трансформаторном масле, г/т; A , B , k , b — табличные данные (табл.3).

Таблица 3

Целлюлозный материал	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>k</i>	$10^3 b$
Кабельная бумага К-120	6,1	0,04	0,33	3,3
Конденсаторная бумага КОН-2-10	4,5	0,033	0,495	0,5
Конденсаторная бумага Силкон	5,6	0,032	0,48	0
Конденсаторная бумага Терокс С-1	9,4	0,044	0,48	0
Конденсаторная бумага Терокс С-0,8	8,2	0,04	0,4	1,1
Электротехнический картон ЭМЦ	5,55	0,034	0,49	-0,7
Электротехнический картон А	4,02	0,032	0,55	-1,0
Электротехнический картон В	3,74	0,032	0,63	-1,7

Общее количество воды в герметичном объекте складывается из количества воды в твердой изоляции G_6 , трансформаторном масле G_m и газовом пространстве G_r :

$$G = G_m + G_6 + G_r = 10^{-3} C_{H_2O} Q_m + 10 W Q_6 + 10^{-3} \alpha V_r, \quad (14)$$

где C_{H_2O} — влагосодержание масла, г/т, определяется в результате анализа; W — влажность твердой изоляции, %, рассчитывается по (13); Q_m — масса трансформаторного масла, т; Q_6 — масса твердой изоляции, т; V_r — объем газового пространства, м³; α — влагосодержание газа над маслом, г/м³, определяется по рассчитанному в соответствии с (7) парциальному давлению (гПА) над трансформаторным маслом,

$$\alpha = 0,7402 P_{H_2O}. \quad (15)$$

Исходя из рассчитанного общего количества воды в аппарате, итеративным путем определяют влагосодержание газовой фазы и ее парциальное давление при любой температуре в диапазоне рабочей температуры.

Современное электротехническое оборудование создается конструктивно герметичным, т.е. изолированным от атмосферного воздуха. Именно для него чрезвычайно важно выполнять расчет суммы парциального давления в диапазоне рабочей температуры как фактор ресурса жидкой изоляции по растворению образующихся газов — ресурс парциального давления.

Расчет предполагаемого оставшегося ресурса оборудования по парциальному давлению (т.е. срок до полного насыщения масла газами) выполняется в диапазоне рабочей температуры масла и с учетом возможного ускорения процесса газообразования, определяемого по данным трех последних анализов.

Обеспечение безопасности следующего отбора пробы. Когда дефект в электрооборудовании идентифицирован, в соответствии с тактикой диаг-

ностического контроля для обеспечения безаварийной эксплуатации требуется установить либо более частый физико-химический контроль, либо систему мониторинга. При продолжении контроля с помощью газохроматографического анализа интервалы времени до следующего анализа должны быть согласованы с оставшимся ресурсом для обеспечения безопасности персонала, т.е. рассчитанный оставшийся ресурс парциального давления (в единицах времени) должен быть больше интервала времени до отбора новой пробы масла.

Расчет состояния бумаги по количеству CO и CO₂. Известно [12], что количество образовавшихся окислов углерода при деполимеризации бумаги от $DP=1200$ до $DP=500$ равно 1 л на 1 кг бумаги. Если это принять в качестве критерия, то критериальное выражение приобретает вид:

$$(Q_{CO} + Q_{CO_2}) / (10^3 Q_6) \leq 1, \quad (16)$$

где Q_{CO} , Q_{CO_2} — количество окислов углерода в аппарате, уравнения (10) и (11), л; Q_6 — количество бумаги, т.

По соотношению CO₂/CO согласно [3] можно выполнить расчет температуры горячей точки по двум последовательным анализам с интервалом 2—4 недели (Δt). Температура горячей точки (°C).

$$t = 2204 / (\ln Z + 3,44) - 273 \text{ для } Z > 1; \quad (17)$$

$$t = 3316,6 / (\ln Z + 5,09) - 273 \text{ для } Z < 1, \quad (18)$$

где

$$Z = \frac{Q_{CO_2(2)} - Q_{CO_2(1)}}{Q_{CO(2)} - Q_{CO(1)}},$$

под индексами (1) и (2) понимают данные в предыдущем и последующем анализах; $Z=1$ соответствует ~370°C, $Z=10$ соответствует ~110°C.

Расчет ресурса оборудования по влажности твердой изоляции. Тангенс угла диэлектрических потерь бумаги при установленном уровне влажности бумаги W (уравнение (13)) рассчитывается [14] по уравнению:

$$\operatorname{tg}\delta = (p + q \cdot W') \cdot \exp(-2700/T), \quad (19)$$

где $\operatorname{tg}\delta$ в абсолютных единицах, W — в %, T — в К, p , q , r — табличные данные (табл. 4).

Удельное объемное сопротивление бумаги при установленном уровне влажности бумаги W (уравнение (13)) рассчитывается [14] по уравнению:

$$\rho_V = s \exp[h/T - n(W-m)^d], \quad (20)$$

где ρ_V — Ом·м; W — %; T — К; s , h , n , m , d — табличные данные (табл. 4).

В качестве критерия допустимого значения влажности бумаги, например, в конденсаторах, приняты значения напряженности возникновения критических ЧР [15]. По технологии сушки бумаги (120°C, остаточное давление 1 гПа) остаточная влажность бумаги в конденсаторе со-

Таблица 4

Коэффициент	Целлюлозный материал	
	Кабельная бумага К-120	Конденсаторная бумага КОН-2-10
<i>p</i>	2,68	3,8
<i>q</i>	6	7
<i>r</i>	1,85	2,3
<i>s</i>	$2,7 \cdot 10^5$	$1,4 \cdot 10^6$
<i>h</i>	5800	5600
<i>n</i>	2,8	2,3
<i>m</i>	0,1	0,03
<i>d</i>	0,8	1

ставляет тысячные доли процента. В диапазоне $W < 0,5\%$ напряженность возникновения критических разрядов E_{kp} снижается на 10%, до 3% влажности E_{kp} уменьшается вдвое, но еще вдвое превышает напряженность начальных частичных разрядов. Зону выше 3% влажности твердой изоляции надо принять как недопустимую.

Для трансформаторов тока, как и для прочего маслонаполненного оборудования, предельное значение влажности бумаги следует ограничить значением 4%.

Допустимое значение тангенса потерь бумаги — не более 1,6%.

Допустимое значение удельного объемного сопротивления — $2 \cdot 10^9 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Нормирование влажности в масле не имеет смысла, так как с изменением температуры изменяется состояние равновесия и одному и тому же значению влажности масла может соответствовать и удовлетворительное, и неудовлетворительное состояние бумаги.

Анализ распределения воды в изоляции электроаппарата показывает, что подавляющая ее часть находится в твердой изоляции и изменение температуры, приводящее к перераспределению воды, может сильно влиять на электротехнические характеристики бумаги. Поэтому по полученному в анализе результату влагосодержания в масле необходимо не только сосчитать текущие значения влагосодержания бумаги, ее тангенса и проводимости, но и определить нижнюю границу допустимой температуры масла и безопасные условия для пуска в эксплуатацию остановленного оборудования.

Расчет предполагаемого оставшегося ресурса оборудования по влажности твердой изоляции (т.е. срок до достижения одного из нормируемых параметров: влагосодержания твердой изоляции, ее тангенса или проводимости) выполняется в диапазоне рабочей температуры масла и с учетом возможного ускорения процесса увлажнения, определяемого по данным трех последних анализов.

Расчет допустимых границ температуры масла. Понятие допустимого интервала температуры

масла возникает в связи с перераспределением газов и воды под действием температуры между двумя или тремя фазами изоляционной системы электроаппарата: газовой, жидкой и твердой. Изменение температуры масла из-за изменения нагрузки или температуры окружающей среды может привести к неблагоприятному перераспределению газов и воды либо в части приближения к состоянию насыщения по газообразным составляющим, либо в части достижения предельно допустимых значений влажности твердой изоляции. Это случай, когда сумма парциального давления, влажность бумаги, тангенс бумаги или сопротивление бумаги в одной из границ температурного интервала не соответствуют норме.

Расчет по уравнениям (6)–(15) и данным табл. 1 и 2 позволяет разрешить эту проблему по газам и водянику пару в части парциального давления. Остальные параметры, связанные с влажностью, определяются на основе уравнений (13), (19) и (20) и данных табл. 3, 4, как описано выше.

Оценка допустимой границы температуры масла особенно важна при повторном пуске в эксплуатацию остановленного оборудования: перед включением под напряжение аппарат должен быть надежно прогрет до температуры, выше рассчитанной допустимой нижней границы.

Расширение методической базы физико-химической диагностики

Нет предела расширения возможностей физико-химических методов для диагностики МНЭО. Традиционно выполняемые анализы изоляционных масел (плотность, кислотность, вязкость, температура вспышки, поверхностное напряжение и др.) могут стать полезными при решении вопросов диагностики дефектов: ведь отклонения этих показателей от нормы связаны, помимо естественного старения, с возникшими дефектами в изоляции. Тем не менее, можно ожидать применения новых методов физико-химического анализа масла, которые будут характеризовать состояние оборудования в целом.

Приборное обеспечение физико-химической диагностики

Для обеспечения физико-химической диагностики необходимо создание специализированного прибора. Этот прибор должен объединить в себе то лучшее, что существует в части газохроматографического анализа и в части практической диагностики: четыре вида анализа (газы, вода, антиоксидант, фурановые) с базой хроматографических данных, базу электротехнических данных, программы пересчета хроматографических данных и совокупность программ диагностики. Для решения этой проблемы необходимо объединение двух областей знания: хроматографического приборостроения и физической

химии электрических аппаратов.

Первым успешным шагом на этом пути можно считать создание автоматического интеллектуального комплекса ЭЛХРОМ [16] как одного из элементов «нервной системы» электроэнергетики.

Список литературы

1. Couderc D., Bourassa P., Muiras J.M. Gas-in-oil Criteria for the monitoring of self-contained oil-filled Power Cables//CEIDP. 1996. Vol. 1. P. 283—286.
2. Аракелян В.Г., Дарьян Л.А. Problem and achievement a physico-chemical diagnostics of oil-filled electrotechnical equipment//CWIEME 98. Berlin.
3. Аракелян В.Г., Дарьян Л.А., Лоханин А.К. Хроматографический метод диагностики высоковольтных импульсных конденсаторов при их производстве//Электроэнергетика. 1992. № 1. С. 54—57.
4. А.с. 1681682 РФ. Способ контроля качества высоковольтных импульсных конденсаторов, пропитанных минеральным маслом/В.Г.Аракелян, Л.А.Дарьян, А.К.-Лоханин//Открытия. Изобретения. 1991. № 36.
5. Darian L.A., Arakelian V.G., Lokhanin A.K. Diagnostics of High-Voltage impuls capacitors during the production on the basis of chromatographic analysis of gaseous insulation decom-position products//7-th International symposium on High-Voltage Engineering. Dresden, 1991. Vol. 2. P. 337—339.
6. Duval M. Dissolved-gas analysis: New challenges and applications//Electra. 1990. № 133. P. 39—45.
7. Аракелян В.Г., Сенкевич Е.Д. Ранняя диагностика повреждения изоляции высоковольтного маслонаполненного оборудования//Электротехническая промышленность. Сер. АВН. 1986. № 3/7.
8. Аракелян В.Г., Сенкевич Е.Д. Ранняя диагностика маслонаполненного высоковольтного оборудования//Электрические станции. 1985. № 6. С. 50.
9. Wilpute R., Randoix M. Lesson drawn from the routine testing of insulating used in power transformer on the Belgian network. SIGRE. Paper 12—07. 1986.
10. Conservation and Control of oil-insulated Components by Diagnosis of Gas in Oil//Electrical Cooperative Research Association. 1980. Publication № 36. № 1.
11. Аракелян В.Г., Демина В.Н. Исследование газоплотности медицинских шприцов, применяемых в качестве пробоотборников для трансформаторного масла//Электротехника. 1994. № 5—6. С. 52—54.
12. Тамура и др. Diagnostics of ageing of insulating paper in a result forming the gases. Денки гаккай ромбунси, 1982-1, А, 101, 30.
13. Hisao Kan, Teruo Miyamoto. Proposals for an Improvement in Transformer Diagnosis Using Dissolved Gas Analysis (DGA)//IEEE Electrical Insulation Magazine. 1995. Vol. 11, № 6. P. 15.
14. Кущ П.С., Пикус И.Ф. Термофизические и технологические основы сушки высоковольтной изоляции. Минск: Наука и техника, 1979.
15. Кучинский Г.С., Назаров Н.И. Силовые электрические конденсаторы. М.: Энергоатомиздат, 1992. С. 111.
16. Arakelian V.G., Darian L.A. Physico-Chemical Diagnostics for Oil-Filled Electrical Equipment on the Basis of an Automated Intellectual Complex//Proceedings of Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing and Coil Winding Conference. Chicago. Sept. 22—25. 1997. P. 542—547.

Аракелян Вадим Гарегинович в 1961 г. закончил Московский институт тонкой химической технологии им. М.В.Ломоносова. В 1969 г. защитил кандидатскую диссертацию по теории и практическому использованию газовой хроматографии в области производства капролактама. В 1995 г. защитил диссертацию «Физическая химия электротехнических аппаратов» на соискание ученой степени доктора технических наук.

Удельные энергетические характеристики медленно движущейся среды¹

МАЛИНИН Л.И., МАЛИНИН В.И., МАКЕЛЬСКИЙ В.Д., ТЮКОВ В.А.

На основании уравнений электродинамики медленно движущихся сред получены соотношения для объемной плотности энергии электромагнитного поля, удельной электромагнитной силы и подтверждена зависимость силы от интенсивности движения.

В [1—3], методами теории электрических цепей обоснованы два принципиально новых положения для движущихся цепей:

- соотношения для электромагнитной энергии отличаются от квадратичной формы, присущей неподвижным цепям;
- электромагнитная сила зависит от интенсивности движения (скорости и производных токов по координате перемещения).

Анализ электрических цепей (схем замещения) дает приближенные (грубые) результаты. Поэтому новые положения, ввиду их принципиального характера, должны быть рассмотрены на основании уравнений электромагнитного поля.

Энергетический баланс электромагнитного поля движущейся среды

Рассмотрим энергетический баланс для элементарного объема электромагнитного поля в медленно (по сравнению со скоростью света) движущейся среде. Полная система приближен-

¹ Печатается в порядке обсуждения.

ных уравнений электродинамики (система уравнений Максвелла-Миньковского [4]) с точки зрения неподвижного наблюдателя имеет вид:

$$\frac{1}{\mu_a} \operatorname{rot} \vec{B} = \bar{\delta} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} - K_\Phi \varepsilon_a \operatorname{rot}[\bar{v} \vec{E}]; \quad (1)$$

$$\frac{1}{\varepsilon_a} \operatorname{rot} \vec{D} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + K_\Phi \operatorname{rot}[\bar{v} \vec{B}]; \quad (2)$$

$$\bar{\delta} = \gamma \bar{E} + \gamma [\bar{v} \vec{B}]; \quad (3)$$

$$\vec{B} = \mu_a \vec{H} - K_\Phi \varepsilon_a \mu_a [\bar{v} \vec{E}]; \quad (4)$$

$$\vec{D} = \varepsilon_a \vec{E} + K_\Phi \varepsilon_a [\bar{v} \vec{B}]; \quad (5)$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0; \quad (6)$$

$$\operatorname{div} \vec{D} = 0. \quad (7)$$

В системе (1)–(7) $K_\Phi = 1 - 1/(\mu\varepsilon)$ — коэффициент увлечения Френеля [4]; ε_a , μ_a , γ приняты постоянными, объемный свободный заряд и напряженность поля сторонних сил равна нулю.

После умножения (1) на \vec{D}/ε_a , а (2) — на \vec{B}/μ_a и сложения результатов получаем

$$\begin{aligned} & \frac{\vec{D}}{\varepsilon_a} \frac{1}{\mu_a} \operatorname{rot} \vec{B} - \frac{\vec{B}}{\mu_a} \frac{1}{\varepsilon_a} \operatorname{rot} \vec{D} = \bar{\delta} \frac{\vec{D}}{\varepsilon_a} + \frac{\vec{D}}{\varepsilon_a} \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \\ & + \frac{\vec{B}}{\mu_a} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} - K_\Phi \vec{D} \operatorname{rot}[\bar{v} \vec{E}] - \frac{K_\Phi}{\mu_a} \vec{B} \operatorname{rot}[\bar{v} \vec{B}]. \end{aligned} \quad (8)$$

Левая часть (8) с учетом соотношений векторного анализа преобразуется к виду

$$\frac{1}{\mu_a \varepsilon_a} (\vec{D} \operatorname{rot} \vec{B} - \vec{B} \operatorname{rot} \vec{D}) = -\frac{1}{\mu_a \varepsilon_a} \operatorname{div}[\vec{D} \vec{B}].$$

В правой части первое слагаемое с учетом (3) и (5) обуславливает два слагаемых

$$K_\Phi \frac{\bar{\delta}^2}{\gamma} + (1 - K_\Phi) \bar{\delta} \bar{E}.$$

Два последних слагаемых правой части выражения (8) с учетом известных соотношений векторного анализа и уравнений (6), (7) при постоянной скорости движения (последнее условие

дает: $\operatorname{div} \bar{v} = 0$, $\frac{\partial \bar{D}}{\partial \bar{v}} = 0$; $\frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{D}} = 0$)

преобразуем к виду

$$-K_\Phi \vec{D} \operatorname{rot}[\bar{v} \vec{E}] = K_\Phi \nu \frac{\vec{D}}{\varepsilon_a} \frac{\partial \vec{D}}{\partial g} - K_\Phi^2 \nu^2 \vec{D} \operatorname{rot} \vec{B}; \quad (9)$$

$$-K_\Phi \frac{\vec{D}}{\varepsilon_a} \frac{\partial \vec{D}}{\partial g} = K_\Phi \nu \frac{\vec{B}}{\mu_a} \frac{\partial \vec{B}}{\partial g}, \quad (10)$$

где g — обобщенная координата движения, совпадающая по направлению с вектором скорости.

В результате уравнение (8) приобретает форму:

$$\begin{aligned} & -\frac{1}{\mu_a \varepsilon_a} \operatorname{div}[\vec{D} \vec{B}] = K_\Phi \frac{\bar{\delta}^2}{\gamma} + (1 - K_\Phi) \bar{\delta} \bar{E} + \frac{\vec{D}}{\varepsilon_a} \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \\ & + \frac{\vec{B}}{\mu_a} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + K_\Phi \nu \left(\frac{\vec{D}}{\varepsilon_a} \frac{\partial \vec{D}}{\partial g} + \frac{\vec{B}}{\mu_a} \frac{\partial \vec{B}}{\partial g} \right) - K_\Phi^2 \nu^2 \vec{D} \operatorname{rot} \vec{B}. \end{aligned} \quad (11)$$

После многократной последовательной подстановки уравнения (1) в последнее слагаемое выражения (11) получается:

$$\begin{aligned} & -\frac{1}{\mu_a \varepsilon_a} \operatorname{div}[\vec{D} \vec{B}] = \frac{\vec{B}}{\mu_a} \left(\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + K_\Phi \nu \frac{\partial \vec{B}}{\partial g} \right) + \\ & + \left[K_\Phi \frac{\bar{\delta}^2}{\gamma} + (1 - K_\Phi) \bar{\delta} \bar{E} + \frac{\vec{D}}{\varepsilon_a} \left(\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + K_\Phi \nu \frac{\partial \vec{D}}{\partial g} \right) \right] \times \\ & \times \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n (\mu_a \varepsilon_a K_\Phi^2 \nu^2)^n - (-1)^n (\mu_a \varepsilon_a)^n (K_\Phi \nu)^{2n+2} \vec{D} \operatorname{rot} \vec{B}, \end{aligned}$$

из которого в результате имеем

$$\begin{aligned} & -\frac{1}{\mu_a \varepsilon_a} \operatorname{div}[\vec{D} \vec{B}] = K_\Phi \frac{\bar{\delta}^2}{\gamma} + (1 - K_\Phi) \bar{\delta} \bar{E} + \\ & + \left(\frac{\vec{D}}{\varepsilon_a} \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \frac{\vec{B}}{\mu_a} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right) + K_\Phi \nu \left(\frac{\vec{D}}{\varepsilon_a} \frac{\partial \vec{D}}{\partial g} + \frac{\vec{B}}{\mu_a} \frac{\partial \vec{B}}{\partial g} \right) = \\ & = K_\Phi \frac{\bar{\delta}^2}{\gamma} + (1 - K_\Phi) \bar{\delta} \bar{E} + \frac{\partial W_{\text{эм}}}{\partial t} + K_\Phi \nu \frac{\partial W_{\text{эм}}}{\partial g}, \end{aligned} \quad (12)$$

где

$$W_{\text{эм}} = \frac{\vec{D}^2}{2\varepsilon_a} + \frac{\vec{B}^2}{2\mu_a} \quad (13)$$

— объемная плотность электромагнитной энергии движущейся среды для неподвижного наблюдателя.

Выражение (12) дает соотношение, вытекающее из закона сохранения энергии: мощность электромагнитной энергии, поступающей в объем, равна мощности тепловых потерь в нем плюс мощность электромагнитного поля.

Таким образом, энергетический баланс элементарного объема движущейся среды имеет вид

$$\frac{dW_{\text{эм.вх}}}{dt} = \frac{dW_{\text{т}}}{dt} + \frac{\partial W_{\text{эм}}}{\partial t} + K_\Phi \nu \frac{\partial W_{\text{эм}}}{\partial g}, \quad (14)$$

где

$$W_{\text{эм.вх}} = -\frac{1}{\mu_a \varepsilon_a} \int \operatorname{div}[\vec{D} \vec{B}] dt$$

— объемная плотность входной электромагнитной энергии;

$$W_{\text{т}} = \int \left(K_\Phi \frac{\bar{\delta}^2}{\gamma} + (1 - K_\Phi) \bar{\delta} \bar{E} \right) dt$$

— объемная плотность тепловой энергии.

Последние два слагаемых в выражении (12) представляют электромагнитную мощность элементарного объема, которая в соответствии с законом сохранения энергии равна сумме обменной и механической мощности, т.е.

$$\frac{\partial W_{\text{эм}}}{\partial t} + K_\Phi \nu \frac{\partial W_{\text{эм}}}{\partial g} = P_{\text{обм}} + \nu \frac{\partial W_{\text{мех}}}{\partial g}. \quad (15)$$

Из выражения (15) при механической мощности

$$P_{\text{мех}} = \nu \frac{\partial W_{\text{мех}}}{\partial g} = K_{\Phi} \nu \frac{\partial W_{\text{эм}}}{\partial g} \quad (16)$$

следует выражение для обменной мощности

$$P_{\text{обм}} = \frac{\partial W_{\text{эм}}}{\partial t}. \quad (17)$$

Мощность объемной плотности электромагнитной энергии среды, движущейся с постоянной скоростью, состоит из двух составляющих: активной мощности, преобразуемой в механическую (16), и обменной мощности (17).

Объемная плотность электромагнитной энергии движущейся среды

Преобразуем выражение (13) для объемной плотности электромагнитной энергии движущейся среды, используя (4) и (5), к виду

$$\begin{aligned} W_{\text{эм}} = & \frac{\varepsilon_a \bar{E}^2}{2} + \frac{\mu_a \bar{H}^2}{2} + K_{\Phi} \frac{\varepsilon_a^2}{2} [\bar{v} \bar{B}]^2 + K_{\Phi}^2 \frac{\mu_a \varepsilon_a^2}{2} [\bar{v} \bar{E}]^2 + \\ & + K_{\Phi} \varepsilon_a \bar{v} \bar{B} \bar{E} - K_{\Phi} \mu_a \varepsilon_a \bar{B} \bar{H}. \end{aligned} \quad (18)$$

Из (18) следует, что при $\bar{v} = 0$ плотность электромагнитной энергии можно разделить на плотность энергии электрического и магнитного полей. Кроме того, плотность энергии является квадратичной функцией напряженности электрического и магнитного полей. Соответственно, в электрических схемах замещения неподвижных систем электромагнитная энергия является квадратичной функцией токов и напряжений. При движении объемная плотность электромагнитной энергии не может быть разделена на электрическую и магнитную из-за двух последних слагаемых выражения (18) и не является квадратичной функцией напряженности электрического и магнитного полей. Соответственно, электромагнитная энергия движущейся электрической цепи не является квадратичной функцией токов и напряжений, и этот факт был установлен исследованиями в [2].

Совместимость электромагнитного и механического балансов энергии движущейся среды

В общем случае сила сопротивления движению в явной форме зависит от времени, скорости движения и положения. Механический баланс в этом случае будет иметь вид

$$\frac{dW_{\text{мех}}}{dt} = \frac{\partial W_{\text{мех}}}{\partial t} + \nu \frac{\partial W_{\text{мех}}}{\partial g}. \quad (19)$$

При объединении механического баланса с электромагнитным необходимо учитывать появление обменной мощности (уравнения (15)–(17)), т.е.

$$\frac{\partial W_{\text{эм}}}{\partial t} + K_{\Phi} \nu \frac{\partial W_{\text{эм}}}{\partial g} = \frac{\partial W_{\text{мех}}}{\partial t} + \nu \frac{\partial W_{\text{мех}}}{\partial g} + P_{\text{обм}}. \quad (20)$$

Из (20) следует, что в механическую мощность преобразуется часть мощности электромагнитного поля

$$K_{\Phi} \frac{\partial W_{\text{эм}}}{\partial t} + \nu K_{\Phi} \frac{\partial W_{\text{эм}}}{\partial g} = K_{\Phi} \frac{dW_{\text{эм}}}{dt}. \quad (21)$$

Другая часть оказывается не востребованной механическим процессом движения и приобретает характер обменной мощности

$$P_{\text{обм}} = (1 - K_{\Phi}) \frac{\partial W_{\text{эм}}}{\partial t}. \quad (22)$$

В случае $\partial W_{\text{мех}}/\partial t = 0$ справедливы уравнения (15)–(17). Здесь уместно напомнить одно из важнейших свойств электромагнитной энергии: при неограниченной мощности источника электроэнергии потребление и скорость преобразования ее в другие виды энергии определяются в основном свойствами потребителя. На корректность объединения балансов электромагнитного поля и механики следует обращать особое внимание.

Объемная плотность электромагнитной силы движения

В общем случае (19) механическим процессом движения востребуется мощность (21), и объемная плотность электромагнитной силы движения определяется в виде

$$f_{\text{эм}} = \frac{K_{\Phi}}{\nu} \frac{dW_{\text{эм}}}{dt}. \quad (23)$$

Однако в практике электромеханических систем обычно $\partial W_{\text{мех}}/\partial t = 0$.

В этом случае

$$f_{\text{эм}} = K_{\Phi} \frac{\partial W_{\text{эм}}}{\partial g}. \quad (24)$$

Направление силы совпадает с направлением скорости движения (и направлением обобщенной координаты движения). В практике электромеханические системы обычно проектируются на использование силового взаимодействия магнитного поля и проводников с токами (в этом случае легко обеспечить большую удельную объемную плотность электромагнитной энергии), причем векторы напряженности магнитного поля, скорости и плотности тока образуют смешанное произведение векторов — левую или правую тройку. Тогда из уравнений (3)–(5) при $\bar{v} = \text{const}$ получаем объемную плотность электромагнитной энергии

$$\begin{aligned} W_{\text{эм}} = & \frac{\varepsilon_a}{2\gamma^2} \delta^2 + \frac{\mu_a H^2}{2} - \\ & - \nu \left[\mu_a \varepsilon_a K_{\Phi} H \frac{\delta}{\gamma} + \varepsilon_a (1 - K_{\Phi}) B \frac{\delta}{\gamma} \right] + \\ & + \nu^2 \left[\frac{\mu_a \varepsilon_a^2}{2\gamma^2} K_{\Phi}^2 \delta^2 + \frac{\varepsilon_a (1 - K_{\Phi})^2}{2} B^2 \right], \end{aligned} \quad (25)$$

и, соответственно, выражение удельной электромагнитной силы движения в виде

$$\begin{aligned}
 f_{\text{ЭМ}} = & \frac{K_{\Phi} \epsilon_a}{\gamma} \delta \frac{\partial \delta}{\partial g} + K_{\Phi} \mu_a H \frac{\partial H}{\partial g} - v \frac{\mu_a \epsilon_a}{\gamma} \times \\
 & \times K_{\Phi} \frac{\partial}{\partial g} (\delta H) - v K_{\Phi} (1 - K_{\Phi}) \frac{\epsilon_a}{\gamma} \frac{\partial}{\partial g} (B \delta) + \\
 & + v^2 \frac{\mu_a \epsilon_a^2}{\gamma^2} K_{\Phi}^3 \delta \frac{\partial \delta}{\partial g} + v^2 K_{\Phi} (1 - K_{\Phi}) \epsilon_a B \frac{\partial B}{\partial g}. \quad (26)
 \end{aligned}$$

Таким образом, значение электромагнитной силы движения зависит от интенсивности движения (скорости v и производной вектора плотности тока по координате перемещения). Этот факт был установлен методами теории электрических цепей [2, 3].

Список литературы

1. Малинин Л.И., Малинин В.И., Макельский В.Д., Тюков В.А. К определению статических и динамических усилий электромагнитного двигателя//Электротехника. 1997. № 9. С. 28–31.
2. Малинин Л.И., Малинин В.И., Макельский В.Д., Тюков В.А. Электромагнитные силы в динамических процессах электромеханических систем//Электротехника. 1998. № 12. С. 18–22.
3. Малинин Л.И., Малинин В.И., Макельский В.Д., Тюков В.А. Статические и динамические усилия индукционных двигателей//Электротехника. 1999. № 2. С. 43–49.
4. Меерович Э.А. Методы релятивистской электродинамики в электротехнике. М.: Энергия, 1966.

Малинин Леонид Иванович — профессор кафедры «Теоретические основы электротехники» НГТУ. Окончил электромеханический факультет Новосибирского электротехнического института (НЭТИ) в 1967 г. В 1993 г. защитил докторскую диссертацию по теме «Энергетика сервоприводов постоянного тока» в Новосибирском государственном техническом университете (НГТУ).

Малинин Валерий Иванович — доцент кафедры «Электромеханика» НГТУ. Окончил ЭМФ НЭТИ в 1968 г. В 1979 г. защитил кандидатскую диссертацию по теме «Исследование звуна «импульсный преобразователь постоянного тока — двигатель комбинированного возбуждения» электропривода промышленных роботов» в НЭТИ.

Макельский Валерий Дмитриевич — доцент кафедры «Теоретические основы электротехники» НГТУ. Окончил ЭМФ НЭТИ в 1963 г. В 1971 г. защитил кандидатскую диссертацию по теме «Исследование максимальной напряженности поля в высоковольтных конструкциях с кромками» в Томском политехническом институте.

Тюков Валентин Андреевич — заведующий кафедрой «Электромеханика», декан электромеханического факультета НГТУ. Окончил ЭМФ НЭТИ в 1965 г. В 1974 г. защитил кандидатскую диссертацию по теме «Исследование тепловых процессов в асинхронных двигателях с беспазовым статором в установившемся режиме» в НЭТИ.

Процессы электротермофотодинамики и их исследование¹

ЛОБУНЕЦ О.Д., канд. техн. наук, доц.

Уральский ГППУ

Показана необходимость изучения электротермофотодинамических процессов. Получены основные уравнения электротермофотодинамики и изложены некоторые результаты их исследований.

Необходимость изучения электротермофотодинамических систем обусловлена существенными экономическими и социальными потерями в стране и мировом сообществе, где они оценены суммой, превышающей 10 млрд. дол. в год. Социальные потери определяются более сложно, но они могут быть значительнее. Процессы, протекающие при сварочных работах, в электрометаллургии, а также в таких чрезвычайно распространенных электротехнических устройствах, как лампы накаливания, являются электродинамическими.

Изучение этих процессов, например, в лампах накаливания, связано с требованием увеличения срока службы ламп для повышения эко-

номической эффективности их эксплуатации, уменьшения негативных последствий, вызванных влиянием динамичных изменений световых потоков на органы зрения человека, и предотвращения загрязнения окружающей среды, происходящего из-за отсутствия системы утилизации перегоревших ламп. Экономическая эффективность эксплуатации ламп накаливания снижается из-за затрат на изготовление и замену часто перегорающих ламп, из-за потерь десятков тонн в год ценных материалов (вольфрама, меди, цинка, олова, свинца, рения) по России и сотен тонн — в мировом сообществе. Изучение электродинамических процессов актуально несмотря на достижения в области техники газоразрядных источников света из-за относительно высокой их стоимости и запрета применения при работах,

¹ Печатается в порядке обсуждения.

связанных с возможностью возникновения стробоскопического эффекта, с использованием компьютеров и т.д.

Другими причинами, дополнительно повышающими актуальность исследований, являются более высокая токсичность ртути, применяемой для наполнения баллонов ламп дневного света, по сравнению со свинцом, используемым для изготовления ламп накаливания, и сложность схем включения ламп дневного света.

Пониженный КПД ламп накаливания (до 12%) возможно рассматривать не как недостаток, а как их особенность, которую необходимо учитывать при проектировании систем освещения, так как при использовании ламп накаливания в производственных и бытовых помещениях летом в позднее время они дают некоторое количество тепла, повышающего температуру помещений до нормальной, а зимой являются, пусть небольшим, но полезным источником тепловой энергии в большем интервале времени. Вместе с тем необходимо провести более широкие сравнительные исследования по определению влияния на организм человека хорошо знакомых человечеству спектров излучения ламп накаливания (аналогичны спектрам излучения костров, очагов, каминов, источников излучения, используемых для лечения больных различными заболеваниями) и спектров излучения газоразрядных ламп, которые изучены в меньшей степени.

Уравнение электротермофотодинамики для ламп накаливания получено на основе закона сохранения энергии, законов Джоуля-Ленца, Стефана-Больцмана:

$$u^2/(R_0 - \alpha_p T_0 R_0 + \alpha_p T R_0) = \epsilon c_0 T^4 F + c_1 m dT/dt,$$

где u — мгновенное напряжение на лампе накаливания; R_0 — сопротивление нити накала при начальной температуре; T_0 — начальная температура нити накала; α_p — температурный коэффициент сопротивления; c_0 — коэффициент излучения абсолютно черного тела; ϵ — приведенная степень черноты нити накала; T — температура нити накала; F — площадь поверхности нити накала; c_1 — удельная теплоемкость материала нити накала; m — масса нити накала.

В результате преобразований получено нелинейное дифференциальное уравнение Лобунца в первой форме записи:

$$T(K_1 T + K_2) + K_3 T^5 + K_4 T^4 = u^2,$$

где $K_1 = R_0(1 - \alpha_p T_0)c_1 m$; $K_2 = \alpha_p R_0 c_1 m$;

$$K_3 = \epsilon \alpha_p R_0 F 2\pi^5 k^4 / (15 h^3 c^2);$$

$K_4 = \epsilon R_0 (1 - \alpha_p T_0) F 2\pi^5 k^4 / (15 h^3 c^2)$; k — постоянная Больцмана; h — постоянная Планка; c — скорость света.

Уравнение Лобунца во второй форме записи получено аналогично:

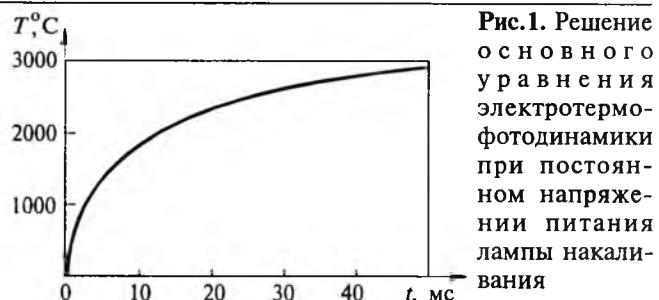


Рис.1. Решение основного уравнения электротермофотодинамики при постоянном напряжении питания лампы накаливания

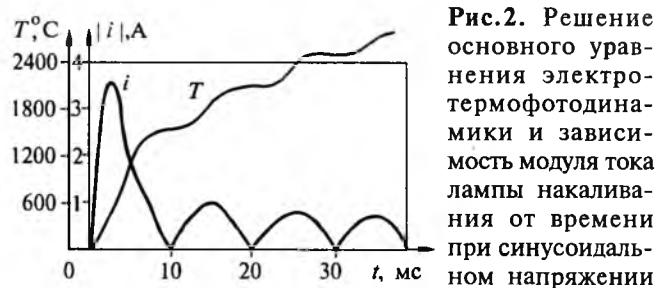


Рис.2. Решение основного уравнения электротермофотодинамики и зависимость модуля тока лампы накаливания от времени при синусоидальном напряжении питания

$$T L_1 / (L_3 + T L_4) + L_2 T^4 / (L_3 + T L_4) = i^2,$$

где i — мгновенный ток лампы накаливания; $L_1 = c_1 m$; $L_2 = \epsilon F 2\pi^5 k^4 / (15 h^3 C^2)$; $L_3 = R_0 - \alpha_p T_0 R_0$; $L_4 = \alpha_p R_0$.

Начальную задачу Коши для данных нелинейных дифференциальных уравнений решают методом Рунге-Кутта четвертого порядка или, используя стандартные программы MAPLE, MATLAB и др. При этом на основании справочных данных, с учетом того, что нити ламп накаливания изготавливают из вольфрама, сначала определяют постоянные коэффициенты, а затем вводят уравнение в соответствующую программу ЭВМ.

Решение уравнения электротермофотодинамики при постоянном и синусоидальном напряжении питания для лампы накаливания типа B220-230-100 изображено на рис.1 и 2, соответственно.

После определения искомой функции (температуры нити накала) находят зависимость тока цепи от времени по формуле

$$i_i = u_i / \{R_0 [1 + \alpha_p (T_i - T_0)]\},$$

где T_i — решение уравнения для i -го момента времени; u_i — напряжение на лампе для i -го момента времени.

Последняя зависимость необходима в том числе для расчета технических средств ограничения тока включения лампы накаливания [2]. Зависимость модуля тока данной лампы накаливания от времени при начальной фазе напряжения на лампе, равной нулю, приведена на рис.2.

Для решения задачи повышения срока службы ламп накаливания определены скорости изменения температуры нити включенной лампы в зависимости от фазы питающего напряжения, соответствующей моменту включения лампы (рис.3). Из рис.3 видно, что скорость изменения

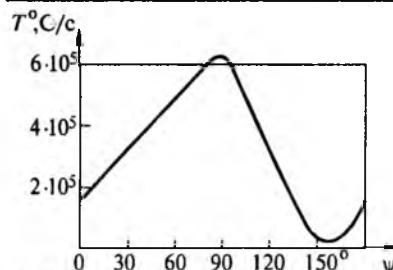


Рис.3. Зависимость производной температуры нити накала лампы от фазы включения напряжения питания

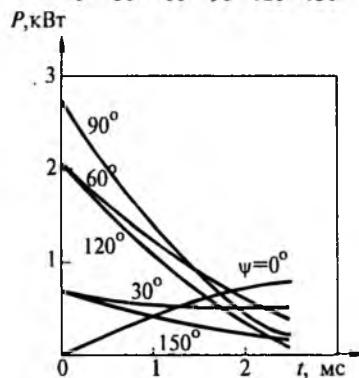


Рис.4. Семейство зависимостей мгновенных значений мощности лампы от времени и фазы включения напряжения питания

температуры нити существенно зависит от фазы напряжения.

Семейства зависимостей мгновенных значений тока и мощности лампы от времени для различных значений начальной фазы напряжения на лампе также необходимы для разработки теории конструирования источников вторичного питания ламп накаливания. Последняя из этих зависимостей приведена на рис.4 и показывает, что наиболее благоприятная фаза напряжения, соответствующая моменту включения лампы, имеет значения, принадлежащие интервалу 150° — 180° . Кратность тока включения по отношению к номинальному току лампы может достигать 18.

Фазовые портреты данной электротермофотодинамической системы, которые определены путем решения нелинейного дифференциального уравнения, записанного в первой форме, также позволили принять необходимые решения при разработке источников вторичного питания ламп накаливания.

На основании изложенного, с учетом существенной нелинейности описанных процессов, применения универсального математического аппарата для их моделирования, а также достаточно точного математического описания этих процессов этот материал введен в разделы программы подготовки кадров соответствующих специальностей электроэнергетического факультета УГППУ, которые предусматривают изучение как установившихся, так и переходных процессов в нелинейных электрических цепях. Необходимость проведения широкомасштабных исследований электротермофотодинамических систем и значительного распространения культуры эксплуатации электротехнических устройств данного типа предполагает развитие международного сотрудничества в данном направлении [1].

Выводы

1. Электротермофотодинамические процессы возможно описать с помощью нелинейных дифференциальных уравнений.

2. Исследование уравнений электротермофотодинамических систем позволяет получить исходные данные для разработки эффективных источников вторичного питания этих систем.

Список литературы

1. Лобунец О.Д. О развитии программ подготовки кадров в области теоретической электротехники//Тез. докл. Международной конференции «Международное университетское сотрудничество в области образования, науки и культуры в Уральском регионе». Екатеринбург: УГППУ, 1998. С. 150—151.

2. Пат. 2080175 РФ, МКИ⁶ Н 01 Р 33/22. Патрон/ О.Д.Лобунец.

Лобунец Олег Дементьевич — доцент Уральского государственного профессионально-педагогического университета. Закончил горноэлектромеханический факультет Карагандинского политехнического института в 1970 г. В 1975 г. защитил кандидатскую диссертацию по автоматизации производства строительных материалов.

Статистические показатели электропотребления и методы облегчения работы цехового электротехнического оборудования (на примере электропечей)

МИНЕЕВ А.Р., («Промэнерго»), РУБЦОВ В.П., доктор техн. наук, проф., акад. РАЭН (МЭИ)

В практике проектирования, моделирования, пусконаладочных работ, в том числе после капитального ремонта, цехового обслуживания, ревизии и поддержания эффективной работоспособности электротехнического оборудования цехов, в первую очередь, питающих трансформаторов, кабельных линий, высоковольтной аппар

аратуры, фильтросимметрирующих и компенсирующих систем необходимо знание фактического электропотребления.

Дуговые сталеплавильные печи (ДСП) имеют непрерывно-циклический характер электропотребления. Законы изменения нагрузки этих мощных электротехнических устройств задаются в

процессе проектирования и моделирования директивно. Однако в реальных цеховых условиях из-за изменения таких значащих факторов, как разгар футеровки ДСП, вид поступающей в цех шихты (металлом, стружка, чушковая обрезь, танко-лодковая разделка и пр.), степень старения основного электротехнического оборудования, марка выплавляемой стали, количество и состав применяемых легирующих, смена технологических приемов, например, кислородное выжигание углерода из металла, электропотребление отличается от директивного, и каждая плавка является реализацией случайного процесса. При совместном питании группы ДСП от цехового трансформатора и упомянутого цехового электротехнического оборудования суммарное электропотребление, формируясь из отдельных случайных процессов, также представляет собой случайный процесс.

Наиболее тяжелым периодом работы для электротехнического оборудования является период расплавления. С увеличением числа ДСП, одновременно работающих в период расплавления, отрицательное воздействие и по общему уровню мощностей P, Q, S , и по силе толчков электронагрузки увеличивается. Так как совпадение периодов расплавления печей является случайным событием, то тяжесть воздействия одновременно работающих печей на цеховое электротехническое оборудование определяется вероятностью p возникновения этого события и длительностью отдельных моментов наложения режимов расплавления Σt_p за исследуемый период T , т.е. $p =$

$= \Sigma t_p / T$. Приемлемая точность расчетов обеспечивалась при $T = 10$ сут или 14400 мин. В электросталеплавильных цехах (ЭСПЦ) наблюдалась работа ДСП от двух до восьми в группе. На основе общей теоремы о совпадении опытов вероятность совпадения периодов расплавления m ДСП из n печей в цехе определяется как коэффициент при Y^m в разложении производящей функции [1]

$$\psi_n(Y) = \prod_{i=1}^n (q_i + p_i Y) = a_0 + a_1 Y + a_2 Y^2 + \dots + a_m Y^m + \dots + a_n Y^n, \quad (1)$$

где p_i — вероятность работы i -й печи в режиме расплавления; q_i — вероятность противоположного события; Y — произвольный параметр.

В группе из n одинаковых ДСП усредненная вероятность равна

$$\bar{p} = \frac{\sum_{i=1}^n p_i}{n}, \quad (2)$$

и можно перейти от общей теоремы (1) к частной, на основании которой вероятность $p_{m,n}$ определяется по более простой формуле

$$p_{m,n} = C_n^m p^m q^{n-m} = \frac{n!}{m!(n-m)!} p^m q^{n-m}, \quad (3)$$

где C_n^m — число сочетаний из n ДСП в цехе по m ДСП, составляющих любую часть ДСП этого цеха; $p = \bar{p}$, $q = 1 - \bar{p}$ (последние значения, полученные для основного ряда ДСП, встречающихся в ЭСПЦ, рассчитаны в табл.1).

Таблица 1

ЭСПЦ	Тип ДСП	№ ДСП в ЭСПЦ	Σt_p , мин	$p = \Sigma t_p / T$	$q = 1 - p$	\bar{p}	$\bar{q} = 1 - \bar{p}$
<i>A</i>	ДСП-5	1	4895	0,340	0,660	0,319	0,681
		2	4710	0,327	0,673		
		3	4390	0,305	0,695		
		4	4825	0,335	0,665		
		5	4505	0,313	0,687		
		6	4235	0,294	0,706		
<i>B</i>	ДСП-10	1	6205	0,431	0,569	0,404	0,596
		2	6270	0,435	0,565		
		3	6230	0,453	0,567		
		5	5760	0,400	0,600		
		6	4590	0,319	0,681		
		7	5660	0,393	0,607		
		8	5340	0,371	0,629		
<i>V</i>	ДСП-20	9	5865	0,407	0,593	0,390	0,610
		7	2705	0,188	0,812		
		8	3065	0,213	0,783		
<i>Г</i>	ДСП-20	9	3210	0,223	0,777	0,209	0,791
		10	3025	0,210	0,790		
		6	4975	0,346	0,654		
<i>Д</i>	ДСП-100	7	4470	0,310	0,590	0,306	0,694
		8	4265	0,296	0,704		
		9	3565	0,248	0,752		
		10	4185	0,290	0,710		
		11	4985	0,346	0,654		
<i>E</i>	ДСП-100	1	5065	0,352	0,648	0,361	0,639
		2	5015	0,348	0,652		
		3	5525	0,384	0,616		

Таблица 2

ДСП, т	n	P _{m,n}	ΣΔt _i , мин	Эксперимент	По теореме	
					общей	частной
20	2	p _{2,2}	750	0,052	0,047	0,044
100	2	p _{2,2}	1925	0,152	0,133	0,133
5	3	p _{2,3}	3095	0,215	0,213	0,213
		p _{3,3}	350	0,024	0,034	0,034
100	3	p _{2,3}	3870	0,269	0,246	0,249
		p _{3,3}	415	0,028	0,046	0,018
20	4	p _{2,4}	2530	0,176	0,163	0,164
		p _{3,4}	155	0,011	0,027	0,029
		p _{4,4}	0	0,000	0,002	0,002
5	5	p _{2,5}	5220	0,363	0,321	0,321
		p _{3,5}	2135	0,148	0,156	0,151
		p _{4,5}	365	0,026	0,037	0,035
		p _{5,5}	5	0,000	0,004	0,003
		p _{2,6}	4925	0,342	0,321	0,326
100	6	p _{3,6}	2745	0,191	0,194	0,192
		p _{4,6}	880	0,061	0,065	0,064
		p _{5,6}	130	0,009	0,011	0,011
		p _{6,6}	25	0,002	0,001	0,001
		p _{2,8}	3205	0,223	0,208	0,210
10	8	p _{3,8}	4425	0,307	0,232	0,230
		p _{4,8}	3295	0,229	0,227	0,231
		p _{5,8}	1650	0,114	0,125	0,123
		p _{6,8}	570	0,039	0,038	0,039
		p _{7,8}	10	0,001	0,008	0,008
		p _{8,8}	5	0,000	0,001	0,001

Таблица 3

ДСП, т	20 n	100 2	5 3	20 3	100 4	20 4	100 5	10 5	50 5	100 5	5 6	100 6	10 8
ΣS _{tp} , МВ·А	18	50	6	27	75	36	130	18,1	50	129	12	154	41
S _{ЭСПЦ} , МВ·А	40,5	63	40,6	40,5	63	40,5	120	60	31,5	120	40,5	120	60
̄P , МВт	4,93	19,8	2,98	7,90	30,8	10,2	41,9	9,38	22,6	42,1	5,64	53,4	17,4
̄Q , Мвар	2,81	17,3	1,73	4,63	27,9	6,32	35	5,32	15	38,9	3,15	48,9	10,3
̄S , МВ·А	5,68	26,3	3,45	9,16	41,5	12,0	54,6	10,8	27,1	57,4	6,46	72,4	20,3
̄β	0,16	0,45	0,1	0,25	0,69	0,31	0,45	0,18	0,86	0,49	0,16	0,62	0,34
P _{ck} , МВт	6,34	22,7	3,17	9,34	33,8	11,6	45,2	9,54	24,6	48,8	5,92	57,6	18,4
Q _{ck} , Мвар	4,03	19,6	2,2	5,9	30,5	7,55	38,1	5,57	15,9	43,9	3,41	52,9	11,2
S _{ck} , МВ·А	7,51	30	3,86	11,1	45,5	13,8	59,1	11,1	29,3	65,7	6,83	78,2	21,5
P _M , МВт	16,1	38,8	7,8	22,7	57,9	25,2	83,3	14,9	37,7	107	10,6	118	29,6
Q _M , Мвар	11,5	35,3	4,22	17,3	52,3	17,4	79,9	9,3	24,4	97,2	6,98	100	20,1
S _M , МВ·А	19,7	52,4	8,87	28,5	78	30,6	115	17,6	44,9	145	12,7	155	35,8
P _{M(30)} , МВт	12,4	35,3	5,5	17,9	41,4	19,7	64	13,5	32,6	81,6	9,49	105	28,3
Q _{M(30)} , Мвар	9,03	26,9	3,32	13,3	40	12,2	54,2	8,06	22,2	76,3	5,45	91,1	15,5
S _{M(30)} , МВ·А	15,3	44,4	6,42	22,3	57,6	23,2	83,9	15,7	39,4	112	11	139	32,3
K _{ФР}	1,29	1,15	1,06	1,18	1,1	1,13	1,08	1,02	1,1	1,16	1,05	1,08	1,05
K _{ФQ}	1,43	1,14	1,27	1,28	1,1	1,2	1,09	1,05	1,06	1,13	1,08	1,08	1,08
K _{ФS}	1,32	1,14	1,12	1,21	1,1	1,15	1,08	1,03	1,08	1,15	1,06	1,08	1,06
K _{МР}	3,25	1,96	2,62	2,87	1,88	2,47	1,99	1,59	1,67	2,55	1,89	2,21	1,7
K _{МQ}	4,09	2,04	2,44	3,74	1,88	2,75	2,28	1,75	1,62	2,5	2,22	2,05	1,95
K _{МS}	3,47	2,01	2,57	3,12	1,88	2,55	2,12	1,63	1,67	2,52	1,97	2,14	1,77
K _{вкл}	0,86	0,92	1,0	0,92	0,96	0,97	1,0	1,0	1,0	0,98	1,0	0,98	1,0
K _{М(30)Р}	2,51	1,86	1,85	2,24	1,34	1,93	1,53	1,45	1,44	1,94	1,68	1,98	1,72
K _{М(30)Q}	3,21	1,56	1,92	2,87	1,44	1,93	1,55	1,52	1,48	1,96	1,73	1,86	1,39
K _{М(30)S}	2,7	1,69	1,86	2,44	1,39	1,93	1,54	1,46	1,46	1,95	1,70	1,93	1,59
σP, МВт	3,98	11,1	1,1	4,98	13,8	5,43	17,1	1,74	9,74	21,9	1,78	28,6	5,81
σQ, Мвар	2,87	9,33	1,36	3,70	12,5	4,12	15,1	1,65	5,25	20,3	1,31	20,4	4,3
σS, МВ·А	4,91	14,5	1,73	6,2	18,6	6,8	22,8	2,43	11,1	32,0	2,22	29,7	7,17

В качестве примера с учетом данных табл.1, где для ЭСПЦ (Д) с шестью ДСП-100 $\bar{p} = 0,306$, а $\bar{q} = 0,694$ рассчитаем по (3) вероятности при различном числе печей, нагруженных на цеховой трансформатор и другое электротехническое

оборудование ЭСПЦ: $p_{2,6}=0,326$; $p_{3,6}=0,192$; $p_{4,6}=0,064$; $p_{5,6}=0,011$; $p_{6,6}=0,001$.

В табл.2 приведены данные экспериментальных исследований $P_{m,n}$ в различных ЭСПЦ по формуле

$$p_{m,n} = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta t(m,n)_i}{T}, \quad (4)$$

где $\sum_{i=1}^N \Delta t(m,n)_i$ — суммарная длительность совпадения режимов расплавления m ДСП из n в цехе за период $T = 10$ сут = 14400 мин; $\Delta t(m,n)_i$ — длительность совпадения на отдельном участке; N — число участков совпадения.

Измерения проводились в общем комплексе пусконаладочных работ по облегчению условий эксплуатации электротехнического оборудования ЭСПЦ (рис.1) на заводах. Результаты определения статистических показателей электропотребления в ЭСПЦ заводов при работе различных групп ДСП даны в табл.3. Приведенные данные обсчитывались по массивам $N = 1440$ фактических нагрузок P_i, Q_i в цехах для периодов исследования $T = 14400$ мин по обычным формулам. Средние мощности:

$$\bar{P} = \frac{\sum P_i}{N}; \quad \bar{Q} = \frac{\sum Q_i}{N}; \quad \bar{S} = \sqrt{\bar{P}^2 + \bar{Q}^2}. \quad (4)$$

Коэффициент загрузки электротехнического оборудования ЭСПЦ, прежде всего цеховых трансформаторов

$$\bar{B} = \frac{K_{\text{вкл}}}{K_{\text{вкл}} S_h} = \frac{\bar{S}}{K_{\text{вкл}} S_h}, \quad (5)$$

где коэффициент включения

$$K_{\text{вкл}} = \frac{T_p}{T} = \frac{N_p}{N}. \quad (6)$$

При увеличении числа печей в цехе коэффициент включения возрастает, так как уменьшается вероятность одновременного их отключения. При числе ДСП в цехе, равном пяти и более, групповой коэффициент включения $K_{\text{вкл}}$ может быть принят равным единице.

Среднеквадратичные мощности

$$P_{\text{ск}} = \sqrt{\bar{P}^2 + D_P}; \quad Q_{\text{ск}} = \sqrt{\bar{Q}^2 + D_Q};$$

$$S_{\text{ск}} = \sqrt{P_{\text{ск}} + Q_{\text{ск}}}, \quad (7)$$

где оценки дисперсий мощностей

$$D_P = \frac{\sum (P_i - \bar{P})^2}{N-1}; \quad D_Q = \frac{\sum (Q_i - \bar{Q})^2}{N-1};$$

$$D_S = \frac{\sum (S_i - \bar{S})^2}{N-1}. \quad (8)$$

Далее в табл.3 приведены данные **максимальных значений** P_m, Q_m, S_m , определение которых не требует пояснений. Следует отметить, что максимумы активной и реактивной нагрузок не всегда совпадали по времени, вследствие чего иногда наблюдалось неравенство

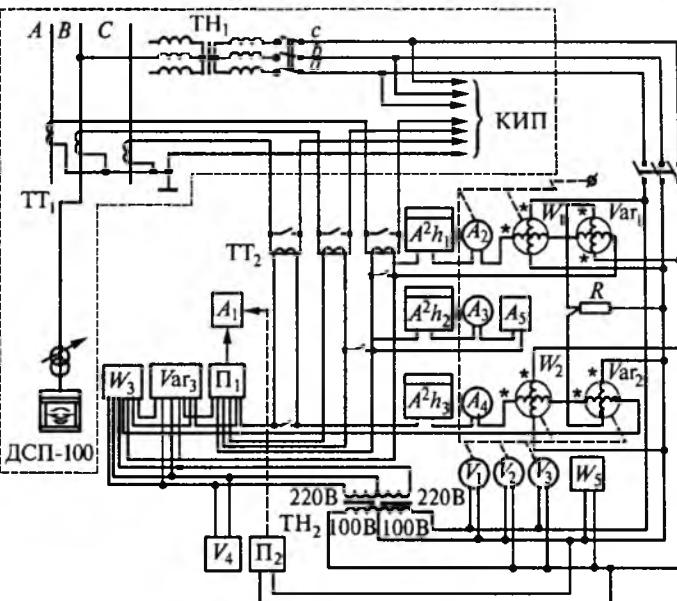


Рис.1. Комплексная схема электрических измерений на ДСП в ЭСПЦ:

A_1 — быстропишущий трехканальный амперметр; $\Pi_{1,2}$ — преобразовательная приставка; $A_{2,3,4}$ — стрелочные амперметры; $W_{1,2}$ — стрелочные ваттметры; R — магазин сопротивлений; $V_{1,2,3}$ — стрелочные вольтметры; A_5 — самопишущий амперметр; W_3, Var_3 — самопишущие ваттметры и варметр; $TT_{1,2}, TH_{1,2}$ — трансформаторы V ; $V_{4,5}$ — самопишущие вольтметры; Φ — система фиксации показателей приборов по единой команде; $A^2h_{1,2,3}$ — счетчики среднеквадратичного тока

$$S_m < \sqrt{P_m^2 + Q_m^2}.$$

Для практических цеховых и заводских целей полезно знать определявшиеся по методу скользящей средней максимумы заданной продолжительности t , особенно для $t = l \Delta t_k = 30$ мин

$$P_{m(30)} = \left(\frac{\sum l_i P_i}{l} \right)_{\max};$$

$$Q_{m(30)} = \left(\frac{\sum l_i Q_i}{l} \right)_{\max};$$

$$S_{m(30)} = \left(\frac{\sum l_i S_i}{l} \right)_{\max}, \quad (9)$$

где $l = t/\Delta t_k$; $\Delta t_k = T/N$; $N = 1440$.

Коэффициенты формы загрузки цехового электротехнического оборудования

$$K_{\Phi P} = \frac{P_{\text{ск}}}{P}; \quad K_{\Phi Q} = \frac{Q_{\text{ск}}}{Q}; \quad K_{\Phi S} = \frac{S_{\text{ск}}}{S}. \quad (10)$$

По данным табл.3 $K_{\Phi P} = 1,16 \div 1,59$; $K_{\Phi Q} = 1,18 \div 1,86$; $K_{\Phi S} = 1,16 \div 1,64$.

Заводчанам желательно иметь поменьше соотношение между максимальным и минимальным потреблением мощности в цехе. С увеличением числа печей в ЭСПЦ коэффициент формы суммарного электропотребления уменьшается, стремясь в пределе к единице. Закон убывания является экспоненциальным (рис.2):

$$K_{\Phi} = f(n) = 1 + Be^{-\gamma n}, \quad (11)$$

где B , γ — параметры, отражающие влияние на коэффициент формы конструктивных, технологических и организационных факторов, приведены в табл.4.

Таблица 4

K_{Φ}	Верхняя граница		Нижняя граница	
	B	γ	B	γ
$K_{\Phi P}$	1	0,5	0,3	0,5
$K_{\Phi Q}$	1	0,4	0,3	0,4
$K_{\Phi S}$	1	0,45	0,3	0,45

В проектной практике коэффициент формы токовой нагрузки обычно принимается равным коэффициенту форм полной мощности $K_{\Phi I} = K_{\Phi S}$, при этом для определения потерь электроэнергии в цеховых кабелях, шинопроводах, трансформаторах и ФКСУ используется **коэффициент формы за период включения**

$$K_{\Phi I \text{ вкл}} = \frac{K_{\Phi S}}{K_{\text{вкл}}}, \quad (12)$$

где $K_{\text{вкл}}$ — коэффициент включения группы ДСП.

Коэффициент максимума активной, реактивной и полной загрузки электротехнического оборудования ЭСПЦ

$$K_{M P} = \frac{P_m}{P}; \quad K_{M Q} = \frac{Q_m}{Q}; \quad K_{M S} = \frac{S_m}{S}. \quad (13)$$

Коэффициенты 30-минутного максимума определялись аналогично:

$$K_{M P(30)} = \frac{P_{m(30)}}{P}; \quad K_{M Q(30)} = \frac{Q_{m(30)}}{Q}; \quad K_{M S(30)} = \frac{S_{m(30)}}{S}. \quad (14)$$

Из рис.3 видно, что верхнюю и нижнюю границы области изменения коэффициентов максимума можно аппроксимировать

$$K_{m, \text{верх}} = 1 + 4e^{-0,2n}; \quad K_{m, \text{ниж}} = 1 + (4/3)e^{-0,2n}. \quad (15)$$

Соответственно для коэффициентов 30-минутного максимума верхняя и нижняя границы области изменения описываются уравнениями

$$K_{M(30), \text{верх}} = 1 + 3e^{-0,2n}; \quad K_{M(30), \text{ниж}} = 1 + e^{-0,2n}. \quad (16)$$

Коэффициент включения

$$K_{\text{вкл}} = T_p / T = N_p / N, \quad (17)$$

где T_p — время работы цехового трансформатора и другого электротехнического оборудования под



Рис.2. Области изменений коэффициентов формы электропотребления в зависимости от числа электропечей

током; $T_p = N_p \Delta t_k$.

Определение числа массивов N_p работы под током производится из следующих соображений:

если $S_i \neq 0$, то $N_{pi} = N_{p(i-1)} + 1$;

если $S_i = 0$, то $N_{pi} = N_{p(i-1)} + 0$.

И последние значения табл.3 — это оценки среднеквадратичных отклонений мощностей

$$\sigma_P = \sqrt{D_P}; \quad \sigma_Q = \sqrt{D_Q}; \quad \sigma_S = \sqrt{D_S}, \quad (19)$$

где D_P , D_Q , D_S — оценки дисперсий из (8).

При групповой работе ДСП следует упомянуть также коэффициенты использования силового электротехнического оборудования в цехах. С увеличением числа n ДСП в ЭСПЦ коэффициент использования по своему значению приближается к коэффициенту загрузки β (табл.3). Анализ полученных на заводах данных показал, что при

$$\sum_1^n S_{h(\text{ДСП})} > 1,2 S_{h(\text{ЭСПЦ})}; \quad \bar{\beta} > 0,5$$

наблюдалась перегрузка цехового электротехнического оборудования 30-минутным максимумом $S_{m(30)} > S_{h(\text{ЭСПЦ})}$, а при

$$\sum_1^n S_{h(\text{ДСП})} > 1,1 S_{h(\text{ЭСПЦ})};$$

$$\bar{\beta} < 0,5$$

таких перегрузок не было. Для облегчения условий работы электротехнического оборудования в ЭСПЦ предложены способ реализации и струк-

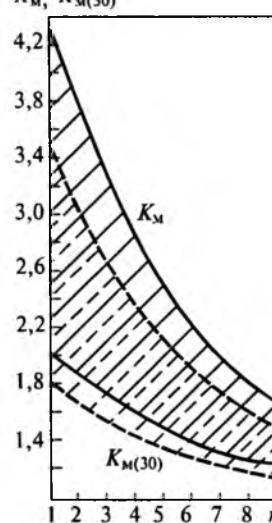


Рис.3. Область изменения коэффициентов максимума K_M и коэффициентов 30-минутного максимума $K_{M(30)}$ электропотребления в зависимости от числа ДСП в цехе

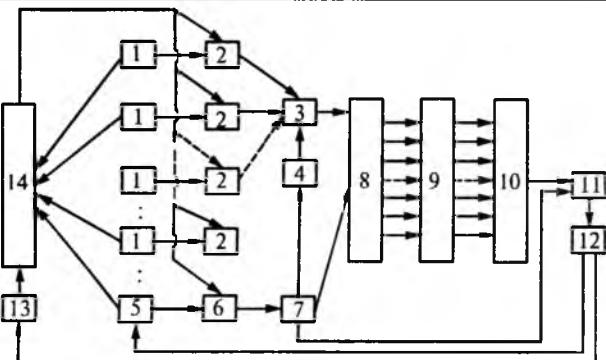


Рис.4. Структурная схема управления электропотреблением в цехе при групповой работе ДСП

тура (рис.4), логически вытекающие из условий экспериментов, в частности, из использования упоминавшегося метода скользящей средней. Управление электрическим режимом ДСП при групповой работе в часы максимума ведется следующим образом. Электрические сигналы, пропорциональные заданным в зависимости от выплавляемых марок сталей значениям мощностей включенных в работу группы электропечей 1, от задатчиков — программаторов 2 поступают в регистр — сумматор 3, который формирует электрические сигналы, пропорциональные сумме заданных значений мощностей электропечей, включенных в работу, для дискретных моментов времени, например, через 1 мин, длительности прогнозируемого периода управления, например 60 мин, задаваемой времененным задатчиком 4.

Электрические сигналы, пропорциональные заданным значениям мощностей цикла плавки печи 5, подлежащей очередному включению, поступают от задатчика — программатора 6 через блок 7 задания и кодирования сдвига времени сложения на регистр 8 блоков сложения заданных значений мощностей электропечей 1 с заданными значениями мощностей цикла плавки печи 5 с учетом времени сдвига этого цикла. На второй вход регистра блоков 8 поступает электрический сигнал с регистра—сумматора 3. Результаты суммирования с регистра 8 поступают в виде набора электрических сигналов, пропорциональных просуммированным мощностям печей 1 и печи 5, подлежащей включению, для различных моментов времени включения (например, $\tau = 1, 2, 3, \dots, 60$ мин) печи 5, задаваемых блоком 7 кодирования и задания сдвигов времени в пределах прогнозируемого времени управления, например, 60 мин, задаваемого задатчиком 6. На входы регистра 9 блоков формирования электрических сигналов, пропорциональных величинам максимумов заданной продолжительности, поступают наборы сигналов, пропорциональные просуммированным мощностям.

С выхода регистра 9 блоков определения мак-

Вологодская областная универс

сумма заданной продолжительности электрические сигналы поступают на регистр 10 блока последовательных сравнений и определения минимального значения мощности максимума заданной продолжительности, который вырабатывает сигнал, поступающий на блок 11 декодирования и измерения времени включения очередной печи, при котором значения суммарного максимума мощности заданной продолжительности на прогнозируемом участке периода управления групповой работой печей минимальны. С выхода блока 11 декодирования и измерения времени электрический сигнал поступает на исполнительный блок 12, который включает печь 5 в момент времени, пропорциональный электрическому сигналу, поступившему с блока 11.

После включения печи 5 цикл операций в описанной выше последовательности начинается вновь с суммирования заданных значений мощностей в зависимости от выплавляемых марок сталей. Для распознавания печей, включенных в работу и готовящихся к очередному включению, служит подключаемое инициативным блоком 13 простейшее устройство дискриминатор 14, блокированный с ключом—маркой операторов или стальваров печей, с выхода которого сигналы — команды поступают на блоки 2, 6.

Применение предложенного способа повышало эффективность работы электротехнического оборудования при условии сохранения плановой производительности цеха и позволяло на 20% снизить тридцатиминутный максимум в часы максимума нагрузки энергосистемы, что в расчете на группу из четырех печей типа ДСП-100 с трансформаторами мощностью 60 МВ·А позволяло получить 4,4 млн. руб. годовой экономии.

После рассмотрения частного случая оптимизации работы группы ДСП в ЭСПЦ с целью снижения вероятности совпадения максимумов электропотребления печами остановимся на общей концепции компромиссного сочетания интересов администрации, энергетиков и технологов при решении вопросов совершенствования электропотребления. Действительно, администрация заинтересована в выпуске необходимого количества готовой продукции в заданное время, энергетики — в экономии электроэнергии и создании щадящих режимов для электротехнического оборудования, а технологии — в получении заданной марки электростали высокого качества. Чтобы прийти к компромиссу, нами предложено строить алгоритм управления АСУ «Энергия» [2] в ЭСПЦ с недельной и месячной вариацией ΔZ_p МВ·А заданий активной мощности автоматическим регуляторам. Далее, путем анализа потребления активной и реактивной электроэнергии за указанные периоды проводили вариации загрузки шихты ΔM_t , при i -м цикле реализации алгоритма по сравнению с $(i-1)$ циклом. Если в

результате выполнения комплекса этих мероприятий, направленных на экономию электроэнергии, облегчение условий работы электротехнического оборудования, с одной стороны, и максимизацию выпуска электростали, с другой, ухудшалось качество или увеличивался угар металла в ущерб технологии производства, то алгоритмы АСУ реализовывали мероприятия к устранению возникшей ситуации путем изменения ΔZ_p или ΔM_t на 3–5%, а также корректировали электропотребление отдельных ДСП в общей цеховой электронагрузке путем смещения начала цикла электроплавок.

Эффективность алгоритмов дозирования элек-

троэнергии цеху на смену, месяц или другой значащий период эксплуатации повышалась путем учета изменения материальных потоков и степени (вероятности) участия производственного процесса в суточных и сезонных пиках электронагрузки.

Список литературы

- Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения. М.: Мир, 1976.
- Минеев А.Р. Построение алгоритмов управления АСУ «Энергия» с поэтапным расширением функций в заводских условиях//Промышленная энергетика. 1996. № 1. С.7–11.

К выбору расчетных соотношений параметров озоногенерирующих установок

КОСТЮКОВА Т.П., канд. техн. наук, РОГИНСКАЯ Л.Э., доктор техн. наук

Уфимский ГАТУ

Совместная работа комплекса высоковольтный трансформатор — озонатор (ТОЗ) с тиристорным регулятором существенно отличается от режимов работы ТОЗ, непосредственно подключенного к сети. Проанализируем работу устройства в обоих случаях, заменив трансформатор упрощенной схемой замещения, считая, что активное и индуктивное сопротивления рассеяния обмоток трансформатора много меньше номинального сопротивления нагрузки, а озонатор, в свою очередь, заменив схемой замещения согласно [1].

Как электрическая нагрузка генератор озона представляет собой существенно нелинейный элемент, причем при напряжении на озонаторе, меньшем напряжения пробоя ($|U_{oz}| < U_{np}$), его схема замещения представляет собой последовательное соединение двух емкостей: газового промежутка C_n и диэлектрического барьера C_b , причем $C_n \ll C_b$. При $|U_{oz}| > U_{np}$ схема замещения представляет последовательно включенную ЭДС, равную $\pm U_{np}$ и емкость C_b .

Тогда при непосредственном подключении ТОЗ к источнику синусоидального напряжения начало разряда всегда соответствует углу

$$2\pi k < \beta < \frac{\pi}{2}(1+4k) \quad \text{и} \quad \pi(1+2k) < \beta < \frac{3\pi}{2}(1+4k),$$

где $k = \overline{0, \infty}$. При этом начальные значения тока озонатора и скорости его нарастания равны нулю.

Процессы в ТОЗ определяются в основном значениями пробивного напряжения U_{np} и емкостью диэлектрического барьера. Длительность

протекания тока разряда соизмерима с полупериодом синусоиды. При наличии регулятора следует различать два случая: угол отпирания $\alpha < \beta$ — процессы в системе практически не отличаются от процессов при отсутствии регулятора; $\alpha > \beta$ — процессы соответствуют режимам в RLC -цепи с колебательным характером заряда конденсатора. В этом случае ток в нагрузке протекает достаточно короткое время, равное полупериоду частоты свободных колебаний $\omega_1 = \sqrt{1/(L_s C_b)} - \delta^2$, где $\delta = R/2L_s$. Напряжение на озонаторе может значительно превышать напряжение источника питания

$$U_{oz} \cong \frac{(U_m \sin \alpha - U_{np})[1 + \exp(-\delta\pi/\omega_1)]}{1 - \exp(-\delta\pi/\omega_1)}. \quad (1)$$

Согласно (1) процессы в таком устройстве определяются добротностью, т.е. отношением $\sqrt{L_s/C} = p/R$. В отличие от непосредственного подключения трансформатора с озонатором к сети при использовании регулятора угол β может превышать значения, приведенные ранее, и напряжение U_{oz} будет одинаковым для α_1 и $\alpha_2 = \pi - \alpha_1$, а зависимость $U_{oz} = f(\alpha)$ будет неоднозначной.

Для увеличения длительности импульса тока рационально увеличить индуктивность рассеяния трансформатора L_s . В этом случае пренебречь какими-либо параметрами схемы замещения высоковольтного трансформатора невозможно и расчет провести рационально численным методом.

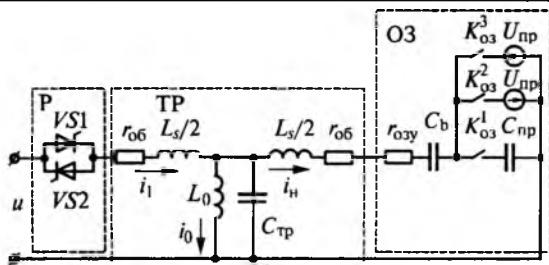


Рис.1.

На рис.1 представлена обобщенная схема замещения озоногенерирующей установки с фазовым управлением. Здесь блок P — тиристорный регулятор; TP — высоковольтный трансформатор и $O3$ — озонатор, в которых L_o , L_s — индуктивности намагничивания и рассеяния трансформатора; r_{o6} , r_{tp} — активные сопротивления диэлектрического барьера озонатора и обмоток трансформатора; C_b , C_{tp} — емкости диэлектрического барьера и разрядного промежутка $O3$; $C_{\text{тр}}$ — собственная емкость трансформатора; $U_{\text{пр}}$ — приведенная величина напряжения пробоя разрядного промежутка $O3$; $VS1$ и $VS2$ — вентили регулятора; K_{o3}^1 , K_{o3}^2 , K_{o3}^3 — ключи, состояния которых характеризуют физико-химические процессы в разрядном промежутке $O3$; u — напряжение питания.

Анализ электромагнитных процессов в системе осуществлялся методом переменных состояний на обобщенной математической модели, разрешенной относительно токов, протекающих через индуктивности, i_i (ток первичной обмотки), i_h (ток нагрузки), i_o (ток намагничивающего контура), и напряжений на емкостях u_{cb} (напряжение на емкости, характеризующей диэлектрический барьер), $u_{C_{\text{пр}}}$ (напряжение на разрядном промежутке) и $u_{C_{\text{тр}}}$ (напряжение на емкости, замещающей собственную емкость трансформатора). Расчет производился при нулевых начальных условиях:

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{AX} + \mathbf{B}, \quad (2)$$

где \mathbf{X} — вектор выходных параметров; $\mathbf{X}^t = [i_1 \ i_h \ i_o \ u_{cb} \ u_{C_{\text{пр}}} \ u_{C_{\text{тр}}}]; \mathbf{A}$ — гибридная нестационарная матрица коэффициентов;

$$\mathbf{A} = \begin{vmatrix} \frac{r_{o6}}{L_s/2} \frac{K_1 + K_2}{1 + K_1 K_2} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_s/2} \frac{K_1 + K_2}{1 + K_1 K_2} \\ 0 & \frac{r_{o6} + r_{o3y}}{L_s/2} & 0 & \frac{1}{L_s/2} \frac{K_{o3}^1}{L_o/2} & \frac{1}{L_s/2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_o} & 0 & 0 & \frac{1}{L_o} \\ 0 & \frac{1}{C_b} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{(1 - K_{o3}^2)(1 - K_{o3}^3)}{C_{\text{пр}}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_{\text{тр}}} & \frac{1}{C_{\text{тр}}} & \frac{1}{C_{\text{тр}}} & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix};$$

\mathbf{B} — нестационарный вектор возмущений;

$$\mathbf{B}^T = \begin{vmatrix} U_m \sin \omega_0 t & \frac{K_1 + K_2}{1 + K_1 K_2} & \frac{K_{o3}^3 U_{\text{пр}} - K_{o3}^2 U_{\text{пр}}}{L_s/2} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{U_m \sin \omega_0 t}{L_s/2} & 1 + K_1 K_2 & \frac{K_{o3}^3 U_{\text{пр}} - K_{o3}^2 U_{\text{пр}}}{L_s/2} & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}.$$

Математическая модель (2) учитывает все возможные состояния схемы при помощи изменения значений переключающих функций $K_{1(2)}$, $K_{o3}^{1(2,3)}$ (табл.1).

Исходными параметрами при анализе процессов в системе являются индуктивность намагничивания и емкость барьера озонатора, определяемые исходя из требуемой производительности озона [2]. В качестве варьируемых переменных взяты индуктивность рассеяния, активное сопротивление обмоток и собственная емкость трансформатора.

При варьировании параметров трансформатора наблюдаются как автоколебательные, так и квазистационарные режимы. Период квазистационарного колебательного процесса на озонаторе, равный периоду изменения напряжения сети, соответствует диапазону изменения распределения реактивных элементов устройства $k_1 = L_o/L_s$ и $k_C = C_b/C_{\text{тр}}$, представленному на рис.2. Дальнейший выбор коэффициентов k_1 и k_C удобнее всего производить исходя из двух критериев: коэффициента использования трансформатора $K_{\text{и.т}}$ (табл.2) и вида регулировочной характеристики $P_{o3} = f(\alpha)$.

Коэффициент использования трансформатора предлагается определять следующим образом:

$$K_{\text{и.т}} = \frac{P_{o3}}{S_{\text{тр}} I_{\text{тр}}} = \frac{EI_{o3 \text{ср}}}{U_{\text{тр}} I_{\text{тр}}},$$

где $I_{o3 \text{ср}}$ — среднее значение тока озонатора; $U_{\text{тр}}$, $I_{\text{тр}}$ — действующие значения напряжения и тока на первичной стороне трансформатора.

При изменении значений коэффициента k_1 от 20 до 3 коэффициент использования трансформатора весьма низок и составляет примерно 0,3; это объясняется малыми углами проводимости λ тиристоров (рис.3).

При уменьшении коэффициента k_1 растет длительность импульса тока (рис.4) и увеличивается использование трансформатора. При больших значениях k_1 и малых углах отсечки вначале мощность, выделяемая в озонаторе, возрастает, затем при дальнейшем увеличении k_1 мощность P_{o3} монотонно падает с увеличением угла α отсечки (рис.5), что дает возможность работать с малыми углами отпирания вентилей.

Проведенный анализ показывает, что для повышения эффективности необходимо увеличивать L_s , т.е. подключать последовательно с трансформатором дроссель или использовать трансформаторы с повышенным значением рассеяния, что предпочтительнее, так как снижаются массогабаритные показатели по сравнению с первым вариантом. При этом могут быть получены задан-

Наименование режима	Условия наступления	Условия окончания	Значения переключающих функций				
			K_1	K_2	K'_{03}	K^2_{03}	K^3_{03}
Рабочий режим тиристорной пары	1) $i_1 > 0$ VS1 открыт 2) $i_2 < 0$ VS2 открыт	$i_1 = 0$	1 0	0 1	—	—	—
Тиристоры закрыты	$U_B = 0$ напряжение на тиристорной паре	$U_B > 0$	0	0	—	—	—
Разрядный промежуток пробит	1) $U_{Cnp} > U_{np}$ 2) $U_{Cnp} < -U_{np}$	$i_H = 0$	—	—	0	1	0
Разрядный промежуток не активен	$ U_{Cnp} < U_{np}$	$ U_{Cnp} \geq U_{np}$	—	—	1	0	0

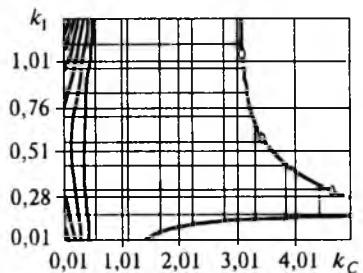


Рис.2.

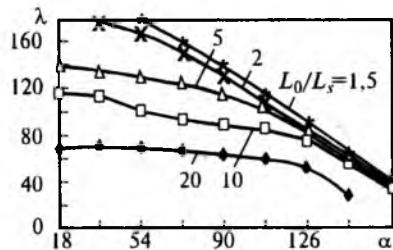


Рис.3.

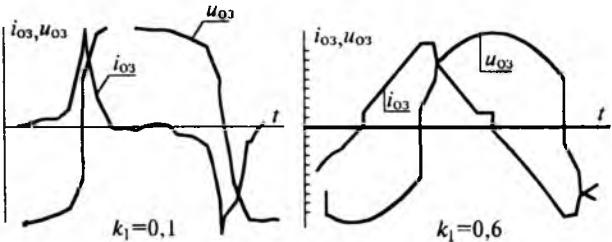


Рис.4.

ная регулировочная характеристика и достаточно высокие энергетические показатели всей установки.

Как показали расчеты, для повышения индуктивности рассеяния целесообразно первичную

Вологодская областная универсальная научная библиотека

Таблица 2

k_1	1,5	2	2,5	5	10	20
$K_{H,T}$	1,1	1,01	0,6	0,5	0,29	0,28

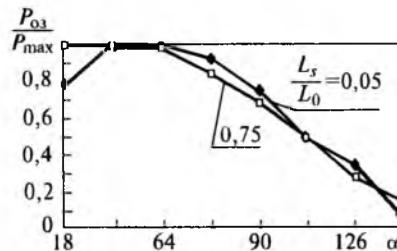


Рис.5.

и высоковольтную обмотки выполнять разнесенными. Выполняя магнитопровод с зазором, дополнительно добиваемся уменьшения индуктивности намагничивания и увеличения реактивной составляющей тока холостого хода.

Выполнение данных рекомендаций позволило снизить расчетную мощность трансформатора в 2–2,5 раза. Например, для питания озонатора производительностью 200 г/ч разнесение обмоток и введение суммарного немагнитного зазора 4 мм позволили уменьшить полную мощность трансформатора с 5 до 2,2 кВ·А, потребляемый ток — с 25 до 10 А и повысить $\cos \phi$ с 0,4 до 0,9.

Список литературы

1. Вигдорович В.Н., Исправников Ю.А., Нижаде-Гавгани Э.А. Проблемы озонопроизводства, озона обработка и создание озоногенераторов второго поколения. М., С.-Пб., 1994.

2. Шапиро С.В. Основные направления в проектировании современных озонаторов//Башкирский химический журнал. 1994. Т.1. Вып.3. С.43–45.

ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ НЕФТЕДОБЫЧИ

Восстановление электроцентробежных нефтенасосов

МЕСЕНЖНИК Я.З., доктор техн.наук., проф. (НПО «ВНИИКП»),
ПРУТ Л.Я., канд. техн. наук (Сургутский ГУ), ПИРОГОВСКИЙ Р.А., инж. (ВНИИЭМ)

Исследуется оптимизация замены элементов установок электроцентробежных нефтенасосов (УЭЦН) как при полном, так и минимальном восстановлении. Проведен расчет оптимального периода восстановления элементов УЭЦН, эксплуатирующихся в Западно-Сибирском нефтяном регионе. Рассмотрено определение оптимального периода восстановления на основе как экономических критерий, так и прогнозирующих параметров.

Оптимизация замены технических систем как в целом, так и их элементов рассматривается в теории восстановления [1]. Эта теория может быть использована для описания стабильного функционирования установок электроцентробежных нефтенасосов (УЭЦН), которыми добывается до 70% нефти России. УЭЦН можно представить как систему, состоящую из таких последовательно соединенных элементов как кабель основной — кабель соединительный (удлинитель) — погружной электродвигатель (ПЭД) — нефтенасос. При исследовании оптимизации замены УЭЦН используется модель как полного, так и минимального восстановления. Интенсивность отказов элементов системы после полного восстановления (аварийного или профилактического) такая же, как в начале эксплуатации у новых элементов, в то время как после минимального восстановления она такая, как перед повреждением, приводящим к необходимости минимального восстановления. При этом предполагается, что после каждого отказа система переводится в исправное состояние за время, пренебрежимое по сравнению с ее наработкой. Эта модель реально отражает ситуацию при эксплуатации УЭЦН на нефтяных месторождениях России. Действительно, замена отказавших УЭЦН на имеющиеся резервные (как новые, так и после ремонта) происходит в течение не более трех суток при наработке УЭЦН до отказа 300—350 сут. Отличие в наработке ПЭД-32 (новых и послеаварийного и профилактического ремонта в АО «Сургутнефтегаз») незначимо на уровне значимости 0,05. Случай замены УЭЦН за промежутки времени, сравнимые с наработкой УЭЦН, например, в связи с отсутствием резервных УЭЦН и рядом других причин, описываются более сложной альтернирующей моделью восстановления. Эти случаи замены УЭЦН нами рассматриваться не будут, хотя они могут составлять до 10% общего числа замен.

К числу оптимизационных задач применительно к УЭЦН, рассмотренных в [2], можно отнести задачу по определению сроков проведения полных профилактических восстановлений элементов УЭЦН. Поведение этих восстановлений в определенные моменты времени, например, в начале каждого месяца, года и т.д. экономически нецелесообразно, так как связано со спуско-подъемными операциями, стоимость которых сравнима со стоимостью элементов УЭЦН.

При проведении полных профилактических восстановлений элементов УЭЦН может использоваться стратегия восстановления, известная под названием «восстановление в зависимости от возраста».

В этом случае при аварийном отказе одного из элементов поднимают из скважины УЭЦН и восстанавливают отказавший элемент. Если оказывается, что кроме отказавшего элемента УЭЦН еще какой-либо элемент проработал в скважине больше, чем заданный интервал времени τ^* , то производится профилактическое восстановление этого элемента. При этом τ^* определяется решением следующего уравнения:

$$\lambda(\tau) \int_0^{\tau} \bar{F}(t) dt - F(\tau) = C/1 - C, \quad (1)$$

где $\lambda(\tau)$ — интенсивность отказов; $\bar{F}(t) = 1 - F(t)$ — вероятность безотказной работы; $F(t)$ — функция распределения отказов; $C = C_n/C_a$; C_n — средние затраты на профилактическое восстановление; C_a — средние затраты на аварийное восстановление.

Уравнение (1) представляет собой интегральное уравнение Вольтерра 2-го рода. Это уравнение имеет однозначно определенное конечное решение, если $\lambda(\tau)$ выражается возрастающей функцией интенсивности (ВФИ) отказов. В противном случае (1) не выражается явно.

Анализировались законы распределения отказов УЭЦН, эксплуатирующихся в различных НГДУ АО «Сургутнефтегаз». Для УЭЦН-50, экс-

плотицирующихся в НГДУ «Быстринскнефть», $F(t)$ имеет логнормальный закон распределения:

$$F(t) = \Phi(\ln t - \mu)/\sigma, \quad (2)$$

где математическое ожидание $\mu = 349$, среднее квадратичное отклонение $\sigma = 320$; $\Phi(t)$ — функция Лапласа.

Для УЭЦН-50, эксплуатирующихся в НГДУ «Лянторнефть», $F(t)$ имеет распределение Эрланга:

$$F(t) = 1 - e^{-\alpha t} \sum_{k=0}^{n-1} \frac{(\alpha t)^k}{k!}, \quad (3)$$

где $n = 3$; $\alpha = 0,08$.

Это распределение представляет распределение суммы n независимых экспоненциально распределенных (с параметром α) случайных величин. Для УЭЦН-50, эксплуатирующихся на предприятии «Черногорнефть», $F(t)$ имеет распределение Вейбулла:

$$F(t) = 1 - e^{-(t/\theta)^\beta}, \quad (4)$$

где масштабный параметр $\theta = 316,6$; параметр формы $\beta = 1,57$.

Логнормальное распределение отказов характеризуется немонотонным изменением интенсивности отказов; распределению Эрланга соответствует возрастающая функция интенсивности (ВФИ), распределению Вейбулла — также возрастающая функция интенсивности (ВФИ) при $\beta > 1$ и убывающая функция интенсивности (УФИ) при $\beta < 1$. Немонотонная функция интенсивности отказов свидетельствует о том, что старение изоляции в случае, если $F(t)$ имеет логнормальное распределение отказов, не является основной причиной отказов УЭЦН. При отказах УЭЦН, связанных в основном со старением изоляции, $F(t)$ должна иметь ВФИ отказов. Можно предположить, что среди причин, вызывающих отказы УЭЦН, в ряде случаев превалирует потеря герметичности ПЭД. Герметичность на определенном этапе эксплуатации может возрастать в результате приработки деталей гидрозащиты, приводя к УФИ отказов.

В общем случае решение уравнения (1) не выражается явно. Это приводит к необходимости использовать таблицы, полученные при приближенном решении уравнения (1), позволяющие рассчитать τ^* для различных законов распределения отказов в зависимости от параметров функции распределения отказов и от C . Соответствующие таблицы для отказов, имеющих распределение Вейбулла и Эрланга, приведены в [3]. Расчет τ^* для ПЭД-32, эксплуатирующихся в АО «Нижневартовскнефтегаз», когда функция распределения отказов подчиняется закону Вейбулла с параметрами $\theta = 327$; $\beta = 1,74$ при $C = 0,25$ дает $\tau^* = 210$ сут. Об устойчивости τ к изменению параметров функции распределения отказов УЭЦН, например, когда она имеет распределение Вейбулла, можно судить по следующим дан-

ным: при $\beta = 1,5$; $C = 0,25$; если $\Delta\beta\% = \pm 10$, то $\Delta\tau\% = \pm 15$.

При эксплуатации УЭЦН в нефтяных скважинах АО «Сургутнефтегаз» в течение 1989—1995 гг. установлено [4], что законы распределения отказов элементов УЭЦН не изменились. В то же время за рассмотренный период времени произошли некоторые изменения конструкций, качества элементов УЭЦН, соблюдения технологии их эксплуатации. Изменились также такие свойства скважинной жидкости, как обводненность, концентрация механических примесей, газосодержание и т.д. Это привело к изменению параметров функции распределения отказов элементов УЭЦН на 15—20%, что не вызывает значительного изменения τ^* .

В настоящее время на нефтяных месторождениях России, в частности Западной Сибири, вводятся в эксплуатацию новые конструкции УЭЦН производства как российских, так и западных фирм. Для этих УЭЦН вид функции $F(t)$ неизвестен из-за незначительного их количества, а также времени эксплуатации, и для определения оптимального интервала восстановления τ^* нельзя применять формулу (1).

В этом случае можно решать задачу восстановления методом анализа сетей, рассматривая задачу о кратчайшей цепи [5], применяя алгоритм Дейкстры для поиска кратчайшей цепи. Алгоритм основан на приписывании узлам временных меток, соответствующих кратчайшей длине пути, ведущей из источника в данный узел. Этой длине ставятся в соответствие эксплуатационные расходы C_{ij} . Параметр дуги C_{ij} вычисляется по формуле

$$C_{ij} = P_i + \sum_{k=1}^{j-1} M_k - S_j, \quad (5)$$

где P_i — стоимость элемента УЭЦН в начале i -го периода эксплуатации; M_k — эксплуатационные расходы в течение k -го периода; S_j — остаточная стоимость элемента в начале j -го периода.

Так как итеративная процедура поиска кратчайшей цепи по алгоритму Дейкстры достаточно трудоемка, то может использоваться программа на ЭВМ, реализующая этот алгоритм. Такая программа входит в пакет сетевой оптимизации.

При эксплуатации УЭЦН на месторождениях с повышенным содержанием парафина в нефти происходит отложение парафина внутри насосно-компрессорных труб и на рабочих органах нефтенасосов. Это приводит к уменьшению откачиваемой скважинной жидкости, срыву ее подачи и отказам УЭЦН. Технологическую операцию, связанную с удалением парафина в процессе эксплуатации УЭЦН, можно рассматривать как минимальное восстановление. Приведем анализ стратегии минимального восстановления, когда полное восстановление происходит в про-

извольные моменты времени при аварийных отказах УЭЦН. При минимальном восстановлении предполагается, что интенсивность отказов остается неизменной в промежутках между аварийным или профилактическим восстановлением элементов УЭЦН. При этом τ^* определяется решением уравнения

$$\left[\Lambda(\tau) - \frac{C_n}{C_m} - 1 \right] r(\tau) = \tau, \quad (6)$$

где $r(\tau) = \int_0^\infty \frac{F(\tau+x)}{F(\tau)} dx$ — остаточная наработка

системы, достигшей возраста τ ; C_n, C_m — затраты на полное профилактическое восстановление и

минимальное восстановление; $\Lambda(\tau) = \int_0^\infty \lambda(\tau) d\tau$ — накопленная интенсивность отказов; $\lambda(\tau)$ — интенсивность отказов.

Если $\lambda(\tau)$ строго возрастает, то (6) имеет единственное решение. В случае, если $F(\tau)$ имеет распределение Вейбулла при $\beta > 1$, оптимальное значение τ^* определяется по формуле

$$\tau^* = \left[\frac{C_n}{\theta(\beta-1)C_m} \right]^{1/\beta}. \quad (7)$$

Теорию восстановления наряду с динамическим программированием можно использовать для планирования потребностей в запасных элементах УЭЦН. При этом число восстановлений $N(\tau)$ равно числу запасных элементов. Математическое ожидание $E[N(\tau)] = H(\tau)$ представляет функцию восстановления:

$$H(\tau) = F(\tau) + \int_0^\tau H(\tau-x) dF(x), \quad (8)$$

где $H(\tau)$ — среднее число восстановлений в интервале $[0, \tau]$.

Уравнение (8) — интегральное уравнение, которое для большинства видов функций распределения решается приближенно. В случае, если функция распределения отказов подчиняется закону Эрланга, то, например:

$$H(\tau) = \lambda(\tau) \text{ при } k=1; \quad (9)$$

$$H(\tau) = 1/2 (\alpha\tau - 1/2 + 1/2e^{-2\alpha\tau}) \text{ при } k=2. \quad (10)$$

Температура статорной обмотки ПЭД при эксплуатации УЭЦН в нефтяных скважинах Западной Сибири обычно не превышает 80—90°C. В то же время, полиамидно-фторопластовая изоляция статорной обмотки рассчитана на длительное воздействие температуры до 180°C, и вклад старения в отказы этой изоляции можно считать незначительным. Отказы ПЭД в основном происходят из-за потери герметичности и попадания пластовой жидкости в электроизоляционное масло. При этом происходит пробой электрической изоляции в месте соединения статорной обмот-

ки с выводными концами. Такой механизм отказов ПЭД достаточно хорошо укладывается в представление о внезапных отказах. Это позволяет использовать для расчета оптимального интервала полного восстановления ПЭД формулу (1), определяющую τ^* при внезапных отказах.

Кабели марок КПБП, КПБК с изоляцией из полиэтилена высокой плотности длительно эксплуатируются на нефтяных месторождениях Западной Сибири при температуре 80—90°C. При этой температуре происходит старение изоляции и отказы кабелей можно рассматривать как постепенные.

При эксплуатации нефтенасосов в нефтяных скважинах происходит износ втулок, вала, рабочих органов. Такой механизм также позволяет отнести отказы нефтенасосов к постепенным. Оптимальный период профилактического восстановления τ^* при постепенных отказах определяется на основе анализа как экономических критериев, так и дрейфа прогнозирующих параметров, под которыми понимается их отклонение от номинального значения. На основе экономического критерия τ^* определяется из решения уравнения

$$\frac{1}{\tau} [C + A(\tau)] = a(\tau), \quad (11)$$

где $A(\tau)$ — средние затраты за период $[0, \tau]$; $a = dA/dt$; C — затраты на восстановление.

Уравнение (11) можно использовать для определения τ^* кабелей и нефтенасосов по экономическим критериям, так как отказы этих элементов относятся к постепенным. На основании дрейфа прогнозирующих параметров также можно определить τ^* кабелей и нефтенасосов. Для нефтенасосов в качестве прогнозирующего параметра может использоваться значение износа их рабочих органов, которое обычно достаточно хорошо описывается нормальным законом распределения отказов. При этом

$$\tau^* = |W_n - W_0|/\sigma U_{1-\alpha} - |\mu|, \quad (12)$$

где W_n — нижний предел геометрических размеров рабочих органов, при котором они подлежат замене согласно технической документации на ремонтные работы; W_0 — начальные геометрические размеры рабочих органов; $U_{1-\alpha}$ — квантиль стандартного нормального распределения; α — уровень значимости; σ — среднее квадратичное отклонение прогнозирующего параметра; μ — математическое ожидание этого параметра.

Для характеристики старения электрической изоляции в качестве прогнозирующего параметра могут использоваться такие электрофизические свойства изоляции, как сквозной ток проводимости (I), электрическая прочность ($E_{\text{пр}}$), тангенс угла диэлектрических потерь ($\tan \delta$), интенсивность частичных разрядов и т.д. На ремонтных предприятиях нефтяников в качестве про-

гнозирующего параметра, характеризующего старение изоляции кабелей марок КПБП, КПБК, используется I . При этом рассматривается одностороннее отклонение I , и допустимая область его изменения ограничена только сверху (I_b). Для электрической изоляции из полиэтилена высокой плотности кабелей марок КПБК, КПБП $I_b = 10 \text{ мА}$ на 1 км.

Отказы изоляции ПЭД по своему механизму не связаны со старением. Так, длительная эксплуатация (до 1000 сут.) ПЭД-32 на нефтяных месторождениях АО «Сургутнефтегаз» не приводит к значительному изменению кратковременной электрической прочности изоляции обмоточных проводов марки ППИ-У, что затрудняет выбор прогнозирующего параметра.

В России эксплуатация УЭЦН продолжается уже более 30 лет. Только в Западной Сибири имеется более 20 тыс. нефтяных скважин, где эксплуатируются УЭЦН. В то же время, несмотря на столь массовую эксплуатацию УЭЦН, выбор прогнозирующих параметров для определения τ элементов УЭЦН, связанный с физическим механизмом отказов, не всегда ясен и однозначен, что приводит к различным значениям τ . Например, в зависимости от того I , $\operatorname{tg}\delta$, $E_{\text{пп}}$ или интенсивность частичных разрядов будет использоваться в качестве прогнозирующего параметра, характеризующего термобарическое старение электрической изоляции кабелей для нефтенасосов, можно получить различное значение τ .

Оптимизация восстановления элементов УЭЦН может повысить их надежность и снизить затраты на ремонт. Последнее приобретает большую актуальность, особенно в Западной Сибири, где стоимость капитального ремонта элементов УЭЦН в ряде случаев превышает стоимость новых элементов. Нерентабельность ремонта некоторых элементов УЭЦН при пресыщенности рынка нефтедобывающего оборудования УЭЦН производства как российских заводов, так и западных фирм [6] приводит к необходимости ремонтных предприятий нефтяников вообще отказываться от проведения капитального ремонта элементов УЭЦН или проводить восстановление на специальных ремонтных заводах, что снижает затраты. Следует также иметь в виду, что УЭЦН российских заводов стоят 10–12 тыс. дол., в то время как УЭЦН западных фирм — 40–120 тыс. дол. Это приводит к тому, что для УЭЦН западных фирм («Reda», «Odi», «Centrilift»), в отличие от УЭЦН производства российских заводов,

ремонт элементов всегда экономически целесообразен. При этом в результате более высокой надежности элементов УЭЦН производства западных фирм и культуры их эксплуатации по сравнению с УЭЦН российских заводов восстановление этих элементов происходит реже, чем элементов УЭЦН российских заводов.

В целом в новых экономических условиях необходимо как определение оптимальных периодов, так и уточнение стратегии восстановления элементов УЭЦН. Так, стратегия восстановления насосов определяется степенью износа их рабочих органов, ПЭД-электрическим сопротивлением изоляции стартовой обмотки, а также износом трущихся деталей. В то же время, влияние на надежность изоляции кабелей для нефтедобывающих термобарического старения в условиях эксплуатации, а также спускоперебросочных операций и ремонта недостаточно изучено, что затрудняет определение стратегии их восстановления.

Список литературы

1. Байхельт Ф., Франкен П. Надежность и техническое обслуживание. Математический подход. М.: Радио и связь, 1988.
2. Месенжник Я.З., Прут Л.Я. Решение оптимизационных задач применительно к электроцентробежным насосам//Электротехника. 1997. №12.
3. Tieddige I., Wogatzki E. Zur optimalen Instandhaltung von Verschleißteilen, Wiss. Z. d. TH, Magdeburg, 1991, 25, 4, 7–13.
4. Месенжник Я.З., Тареев Б.М., Прут Л.Я. О достоверности оценки надежности электрической изоляции установок центробежных насосов//Электричество. 1996. № 5.
5. Филлипс Д., Гарсиа-Диас А. Методы анализа сетей. М.: Мир, 1984.
6. Месенжник Я.З., Прут Л.Я. Синица в руках//Нефть России. 1998. № 2.

Месенжник Яков Захарович — заведующий лабораторией кабелей для погружных электросистем ВНИИКП, доктор техн. наук, профессор, действительный член Академии горных наук (Россия), Всемирной экологической Академии и Международных Академий, член Евро-Азиатского геофизического Общества.

Прут Леонид Яковлевич — кандидат технических наук, доцент Сургутского Государственного университета, член-корр. МАИНБ.

Пироговский Роберт Александрович — инженер ВНИИЭМ.

ХРОНИКА

В Академии электротехнических наук Российской Федерации

АЭН была организована 25 февраля 1993 г. Учредительным собранием в г. Сузdalь. Инициаторами ее создания были члены РАН (академики К.С.Демирчян, И.А.Глебов и др.), ученые вузов (профессора В.А.Альтов, В.Г.Герасимов, Г.Е.Иванченко, Б.И.Петленко), президенты и директора крупнейших акционерных обществ и электротехнических институтов (А.Ф.Дьяков, В.Б.Козлов, И.Б.Пешков, А.Н.Попов, Ю.М.Фельдман и др.).

16 июня 1993 г. Министерство юстиции РФ зарегистрировало АЭН как высшую в своей области научно-техническую организацию с общероссийским статусом. К этому времени было создано более 50 региональных отделений, разработаны Устав, структура Академии и положения, регламентирующие деятельность ее подразделений. АЭН является преемницей традиций созданного в конце прошлого века сообщества Российских электротехников.

1 октября 1993 г. состоялось первое собрание АЭН РФ, на котором были утверждены указанные положения и структура Академии.

Основными подразделениями АЭН РФ в соответствии с утвержденной структурой являются научно-отраслевые и региональные отделения, Научно-промышленный (председатель проф. И.Б.Пешков), редакционный (председатель проф. В.А.Лабунцов, а с 1997 г. проф. В.А.Строев) и экспертный (председатель А.В.Нетушил, а с 1998 г. проф. В.В.Сычев) советы, совет учредителей — председатель проф. В.А.Альтов. В 1993 г. было создано 10 научно-отраслевых отделений Академии:

1 отделение «Теоретическая электротехника», академик-секретарь — академик РАН К.С.Демирчян.

2 отделение «Электроэнергетика», академик-секретарь — президент РАО «ЕЭС России» А.Ф.Дьяков.

3 отделение «Электромеханика и силовая преобразовательная техника в промышленности», академик-секретарь — зав. кафедрой МЭИ И.Н.Орлов, а с сентября 1997 г. проректор МЭИ И.Н.Попов.

4 отделение «Электротехнические системы и устройства общего и специального назначения», академик-секретарь — зав. кафедрой МГСУ, главный научный секретарь АЭН РФ Г.Е.Иванченко.

5 отделение «Электротехнические системы транспорта и космической техники», академик-секретарь — зав. кафедрой МГТУ «МАМИ», первый вице-президент АЭН РФ Б.И.Петленко.

6 отделение «Электротехнология», академик-секретарь — зав. кафедрой СПбГЭТУ А.С.Васильев.

7 отделение «Средства и системы контроля, управления и автоматизации», академик-секретарь —

зав. кафедрой МЭИ, президент АЭН РФ В.Г.Герасимов.

8 отделение «Электротехнические материалы и изделия», академик-секретарь — зам. генерального директора АО «ВНИИКП» Г.Г.Свалов.

9 отделение «Электрофизические и сверхпроводящие устройства», академик-секретарь — профессор МЭИ, вице-президент АЭН РФ В.А.Альтов.

10 отделение «Электромагнитная совместимость и экология», академик-секретарь — зам. министра науки и технологий РФ И.М.Бортник.

24 мая 1995 г. на общем собрании АЭН РФ были созданы еще 3 научно-отраслевых отделения:

11 отделение «Электроника и вычислительная техника», академик-секретарь — председатель Госстандарта РФ Г.П.Воронин.

12 отделение «Телекоммуникационные и информационные сети и системы», академик-секретарь — председатель Госкоминформа РФ А.С.Голубков.

13 отделение «Стандартизация и сертификация в электротехнике», академик-секретарь — вице-президент АО «Концерн точного машиностроения» С.И.Аверин.

На этом же собрании было утверждено новое название **10 отделения** «Высоковольтная электротехническая и электронная аппаратура. Электромагнитные излучения, совместимость и экология».

24 апреля 1997 г. на общем собрании АЭН РФ было создано:

14 отделение «Электротехника и электроника в медицине», академик-секретарь — генеральный директор НПО «Физиопульмонология» А.А.Приймак.

В 1999 г. создано еще одно научно-отраслевое отделение:

15 отделение «Высшее электротехническое образование», академик-секретарь — профессор МЭИ В.Ф.Взятышев.

В 1999 г. в соответствии с Федеральным законом «Об общественных объединениях» Академия прошла перерегистрацию в Минюсте РФ и ее Устав в новой редакции был зарегистрирован 16 апреля 1999 г.

В Уставе практически полностью сохранены статьи прежнего Устава и основных положений, регламентирующих деятельность Академии.

Основные изменения:

1. Официальное название Академии — Общероссийская общественная организация «Академия электротехнических наук Российской Федерации».

2. Срок полномочий академика-секретаря продлен с 3 до 5 лет.

3. В соответствии с требованиями Федерального закона «Об общественных объединениях» Совет уч-

редителей переименован в Наблюдательный совет.

8 декабря 1999 г. состоялось общее (перевыборное) собрание Академии электротехнических наук Российской Федерации (АЭН РФ) совместно с научной сессией Отделения физико-технических проблем энергетики (ФТПЭ) РАН.

С отчетным докладом выступил президент АЭН РФ В.Г.Герасимов. Он охарактеризовал деятельность научно-отраслевых отделений за годы их существования. С учетом прошедших 8 декабря 1999 г. выборов в Академии электротехнических наук РФ стало 542 индивидуальных члена, в том числе 44 почетных академика, 252 действительных члена и 246 членов-корреспондентов. Среди почетных и действительных членов АЭН РФ более 30 членов РАН. Кроме того, в составе АЭН РФ в настоящее время состоят около 200 коллективных членов — филиалов АЭН РФ.

Научно-отраслевые и региональные отделения Академии выполнили большую работу по подготовке и проведению многих Международных и Всероссийских научно-технических конгрессов, конференций, симпозиумов, участвовали в организации Международных и Российских электротехнических выставок. Важнейшим событием в жизни Академии электротехнических наук РФ было проведение в Москве с 28 июня по 3 июля 1999 г. Всероссийского электротехнического конгресса с международным участием (ВЭЛК-99). Конгресс проходил под девизом «На рубеже веков: итоги и перспективы». В программу конгресса было включено 650 докладов, представленных учеными и специалистами России, СНГ и стран дальнего зарубежья. С пленарными докладами выступили академики РАН И.А.Глебов, К.С.Демирчян, В.Н.Михайлов, члены-корреспонденты РАН А.Ф.Дьяков, Н.А.Черноплеков и Б.Е.Черток, председатель Госстандарта России Г.П.Воронин, заместитель генерального директора ЮНЕСКО Г.З.Юшкевич, генеральный директор АО «Мосэнэrgo» Н.И.Серебряников и др. В рамках конгресса работало 14 секций, многие из них работали как самостоятельные научно-технические конференции. Изданы 4 тома тезисов докладов ВЭЛК-99, тексты пленарных докладов опубликованы в журнале «Промышленность России».

Одновременно с конгрессом в Выставочном центре на Красной Пресне проходила Международная электротехническая выставка «ВЭЛК-ЭЛЕКТРО-99», на которой демонстрировались новейшие достижения электротехнической промышленности. В этой выставке участвовало более 300 экспонентов, из них 180 российских и более 120 иностранных из 16 стран-участниц.

Научно-отраслевые и региональные отделения, многие коллективные члены АЭН РФ принимали активное участие в подготовке и проведении ВЭЛК-99 и международной выставки «ВЭЛК-ЭЛЕКТРО-99».

Академия электротехнических наук РФ тесно взаимодействовала с отделениями РАН, особенно с отделением Физико-технических проблем энергетики (академик-секретарь О.Н.Фаворский, заместители академика-секретаря К.С.Демирчян и А.Н.Диденко). Со-

вместно с этим отделение АЭН РФ провело 6 общих собраний членов АЭН РФ (научных сессий) по следующим актуальным научным проблемам:

1. Состояние электротехнической промышленности и электроэнергетики.

2. Проблемы приборостроения для электроэнергетики.

3. Электромагнитная совместимость и экология в электротехнике и электроэнергетике.

4. Электрофизические проблемы создания эффективных электротехнических устройств.

5. Проблемы энергосбережения в промышленности, на транспорте и в быту.

6. Проблемы использования высокотемпературной сверхпроводимости в электротехнике и электроэнергетике.

Одно из общих собраний АЭН РФ было проведено совместно с научной сессией Отделения информатики, вычислительной техники и автоматизации РАН (академик-секретарь РАН С.В.Емельянов).

Одним из важных видов деятельности членов АЭН РФ была литературно-издательская и научная деятельность. Ученые всех без исключения научно-отраслевых отделений активно участвовали в подготовке и издании монографий, учебников и учебных пособий и научных статей, в получении российских и международных патентов на изобретения.

Большая работа проведена Президиумом АЭН РФ по подготовке пятитомной Электротехнической энциклопедии под редакцией академика РАН и АЭН РФ И.А.Глебова. В сентябре 1999 г. вышел первый том этой энциклопедии «История электротехники». Большинство статей этой книги написано членами АЭН РФ. В последней главе книги «Персоналии» приведены статьи о крупнейших электротехниках мира, а также краткие сведения о всех членах Академии электротехнических наук РФ. В настоящее время начата работа по подготовке еще четырех томов «Электротехнический энциклопедии», статьи в которых будут размещены в алфавитном порядке.

Были выполнены научно-технические программы, проведены экспертизы проектов. В докладе была освещена деятельность региональных отделений, коллективных членов-филиалов АЭН РФ, международная деятельность и др.

Деятельность Президиума АЭН РФ была оценена как вполне удовлетворительная.

Далее на собрании были рассмотрены организационные вопросы.

В связи с истечением срока полномочий президента АЭН РФ В.Г.Герасимова было предложено членами Наблюдательного совета и Президиума АЭН РФ избрать В.Г.Герасимова Почетным Президентом Академии электротехнических наук РФ. Это предложение было принято единогласно.

Общее собрание Академии утвердило избрание академиков-секретарей научно-отраслевых отделений, являющихся по Уставу АЭН РФ членами Президиума Академии:

1 отделение — В.Г.Миронов, доктор техн. наук, профессор МЭИ.

2 отделение — А.Ф.Дьяков, член-кор. РАН, президент Корпорации «ЕЭК».

3 отделение — А.И.Попов, доктор техн.наук, профессор МЭИ.

4 отделение — Г.Е.Иванченко, доктор техн.наук, профессор МГСУ.

5 отделение — Б.И.Петленко, доктор техн. наук, зав. кафедрой МГТУ «МАМИ».

6 отделение — А.С.Васильев, доктор техн. наук, профессор СПбГЭТУ.

7 отделение — В.Г.Герасимов, доктор техн.наук, профессор МЭИ.

8 отделение — Г.Г.Свалов, доктор техн. наук, зам. генерального директора АО «ВНИИКП».

9 отделение — В.А.Альтов, доктор техн. наук, профессор МЭИ.

10 отделение — И.М.Бортник, доктор техн. наук, президент Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере.

11 отделение — Г.П.Воронин, доктор эконом. наук, председатель Госстандарта РФ.

12 отделение — А.С.Голубков, доктор техн. наук, профессор.

13 отделение — С.И.Аверин, вице-президент АО «Концерн точного машиностроения».

14 отделение — А.А.Приймак, доктор мед. наук, зав. кафедрой ММА им. И.М.Сеченова.

15 отделение — В.Ф.Взятышев, доктор техн.наук, профессор МЭИ.

В состав Президиума АЭН РФ наряду с академиками-секретарями научно-отраслевых отделений были также избраны выдвинутые на собраниях отделений следующие члены Академии:

1. Бутырин П.А. — доктор техн. наук, зав. кафедрой МЭИ.

2. Вершинин Ю.Н. — член-кор. РАН, зав. лабораторией Института электрофизики РАН.

3. Викторов В.А. — доктор техн.наук, генеральный директор ЗАО «ВНИИМП-ВИТА».

4. Демирчян К.С. — академик РАН, профессор МЭИ.

5. Диценко А.Н. — член-кор., зам. академика секретаря РАН.

6. Емельянов С.В. — доктор техн.наук, академик-секретарь РАН.

7. Иньков Ю.М. — доктор техн.наук, профессор МИИТ.

8. Ковалев В.Д. — доктор техн.наук, зам. генерального директора ГНЦ РФ «ВЭИ».

9. Козлов В.Б. — генеральный директор ГНЦ РФ «ВЭИ».

10. Леонов Б.И. — доктор техн.наук, генеральный директор НПО «Экран».

11. Максимов Б.К. — доктор техн.наук, директор Института электроэнергетики МЭИ.

12. Пешков И.Б. — доктор техн.наук, генеральный директор ОАО «ВНИИКП».

13. Попов А.Н. —доктор техн.наук, президент АО «ВНИИЭТО».

14. Сарапулов Ф.Н. — доктор техн.наук, зав. кафедрой Уральского ГТУ.

15. Строев В.А. — доктор техн.наук, зав. кафедрой МЭИ.

16. Сычев В.В. — доктор техн.наук, главный научный сотрудник ОИВТ РАН.

17. Фаворский О.Н. — доктор техн.наук, академик-секретарь РАН.

Президентом АЭН РФ по предложению Наблюдательного совета и Президиума Академии на пятилетний срок единогласно избран Заслуженный деятель науки РФ, доктор техн. наук, профессор Б.И.Петленко, первыми вице-президентами — В.А.Альтов и И.Б.Пешков.

Вице-президентами АЭН РФ избраны Ю.Н.Вершинин, В.Б.Козлов, В.В.Сычев.

Собрание сочло целесообразным образовать Северо-Западный научный центр АЭН РФ и поручить руководство этим центром доктору техн. наук, зав. кафедрой СПбГТУ В.Н.Боронину на правах вице-президента АЭН РФ. Общее собрание утвердило решение Наблюдательного совета о доизбрании в его состав академиков РАН и АЭН РФ И.А.Глебова и К.С.Демирчяна взамен выбывших членов. Были подтверждены полномочия Наблюдательного совета АЭН РФ в новом составе:

Альтов В.А. — первый вице-президент АЭН РФ, президент МАЭН.

Винокуров В.А. — действительный член АЭН РФ.

Герасимов В.Г. — почетный президент АЭН РФ.

Глебов И.А. — академик РАН и АЭН РФ.

Демирчян К.С. — академик РАН и АЭН РФ.

Иванченко Г.Е. — академик-секретарь АЭН РФ.

Петленко Б.И. — президент АЭН РФ.

Сарапулов Ф.Н. — член президиума АЭН РФ.

Сычев В.В. — вице-президент АЭН РФ.

Трещев И.И. — действительный член АЭН РФ.

Почетными членами АЭН РФ избраны:

Кац М.А. — 1 отделение.

Казанский В.М. — 3 отделение.

Кожевников В.А. — 2 отделение.

Матвеев А.Б. — 10 отделение.

Первачев С.В. — 7 отделение.

Покровский Г.П. — 5 отделение.

Прозоров В.А. — 3 отделение.

Хуторецкий Г.М. — 2 отделение.

В соответствии с объявленными в печати вакансиями тайным голосованием были избраны:

действительными членами АЭН РФ

по отделению 1 — Инкин А.И., Шакиров М.А.;

по отделению 2 — Кушнарев Ф.А., Левченко И.И., Тарасов В.И.;

по отделению 3 — Ахунов Т.А., Брянцев А.М., Гуревич Э.И., Ефименко Е.И., Тарасов В.Н.;

по отделению 4 — Колыниченко Г.И., Кондаков В.И., Трегубов И.А., Чиндыаскин В.И.;

по отделению 5 — Амелин В.М., Кустарев Ю.С., Феоктистов В.П.;
по отделению 6 — Каллистров В.А., Кувалдин А.Б., Лебедев А.В.;
по отделению 7 — Ковалев В.Д., Муслимов Р.А., Передельский Г.И., Пронин В.П., Федосенко Ю.К.;
по отделению 8 — Сытников В.Е.;
по отделению 9 — Алиевский Б.Л., Мурин Б.П., Шиков А.К.;
по отделению 10 — Фоминич Э.Н., Халилов Ф.Х., Шахпарунянц Г.Р.;
по отделению 11 — Флоренцев С.Н.; Шунаев Н.А.;
по отделению 12 — Братухин П.И., Лакаев А.С., Сербин В.И.;
по отделению 13 — Певзнер В.В., Смазнов П.П.;
по отделению 14 — Григорьев Ю.Г., Егоров Е.А., Китаев В.М.;
по отделению 15 — Долженко О.В., Колин К.К., Краснопольский А.Е., Тягунов М.Г.

членами-корреспондентами АЭН РФ:
по отделению 1 — Алпатов М.Е., Казанцев Ю.А., Коровкин Н.В.;
по отделению 2 — Воротницкий В.Э., Жуков В.В., Кочкин В.И., Степанов В.М.;
по отделению 3 — Беляев Е.Ф., Жуловян В.В., Костиков В.Г., Новиков В.К., Русаковский А.М.;
по отделению 4 — Алиев И.И., Бабокин Г.И., Большаков В.П., Кибизов К.В., Югай А.Г.;
по отделению 5 — Абрамов Г.С., Агафонов В.И., Бурганский А.И., Галка В.Л., Марсов В.И., Розенберг Е.Н., Рубцов А.А., Старостин А.К., Федоренко В.П., Чернодаров В.А.;
по отделению 6 — Блинов Ю.И., Мамхегов М.А., Роговой М.Д., Цыбин А.В.;

по отделению 7 — Долгополов А.Г., Ковалев А.В., Соснин Ф.Р., Стеблев Ю.И., Филинов В.Н., Шкатов П.Н.;
по отделению 8 — Куимов И.Е.;

по отделению 9 — Зейгарник В.А., Ковалев Л.К., Коваленко Ю.А., Медин С.А.;

по отделению 10 — Добрусин Л.А., Ефимов Б.В., Зильberman М.М., Лисицын В.М., Лурье А.И., Шапиро А.Л.;

по отделению 11 — Ганеев Э.А., Клячко Л.М., Новиков Е.С.;

по отделению 12 — Конявский В.А., Нейман В.М., Нечаев В.В.;
по отделению 13 — Белоглазов В.В., Вельт И.Д., Звенигородский Э.Г.;
по отделению 14 — Жук Н.А., Чуркин А.А., Яковлев А.И.;
по отделению 15 — Воронков Э.Н., Дзегеленок И.И., Кадель В.И., Саликов Л.М., Шатуновский В.Л.

В конце собрания слово было представлено Президенту Международной Академии электротехнических наук Альтову В.А., который от имени президиумов Международной и Российской академий электротехнических наук вручил Диплом действительного члена МАЭН профессору Донецкого Государственного университета Рогозину Г.Г. (Украина).

В.А.Альтов проинформировал присутствующих, что за истекший период с момента проведения последнего Общего собрания АЭН РФ (02.12.98) почетными и действительными членами МАЭН избраны:

1. Александр Божков — вице-премьер Болгарии.
2. Румен Атанасов — председатель Ассоциации электротехнической промышленности Болгарии, а сама Ассоциация вошла в состав МАЭН на правах Национального отделения Болгарии.
3. Чан Динь Лонг — вице-президент Ассоциации электротехников Вьетнама, профессор.
4. Уваров Е.И. — председатель Совета уполномоченных МО «Интерэлектро».
5. Прохаев А.А. — заведующий секретариатом МО «Интерэлектро».
6. Зотов В.Б. — префект Юго-Восточного Административного округа Москвы, член Правительства г. Москвы, профессор.
7. Кожаспаев Н.К. — профессор Казахского Национального технического университета.
8. Алымкулов К. — директор научно-технического центра «Электротехника», профессор (Кыргызская Республика).
9. Мустафаев Р.И. — заместитель директора Азербайджанского научно-исследовательского института энергетики, профессор.
10. Взятышев В.Ф. — профессор МЭИ.

Редактор отдела О.В. Кунавина
Научный редактор Л.А. Романова
Литературный редактор А.М. Мескина

Сдано в набор 06.03.2000. Подписано в печать 25.04.2000. Формат 60×88 1/8

Бумага офсетная № 1. Печать офсетная. Печ. л. 8. Заказ 56

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

БУХГАЛТЕРСКИЙ БАЛАНС
ОАО "Электропривод" за 1999 год

тыс.руб.

Актив	На начало 1999 г.	На конец 1999 г.	Пассив	На начало 1999 г.	На конец 1999 г.
I. Внеоборотные активы	10614	12297	IV. Капитал	9789	10810
II. Оборотные активы	11244	77185	V. Долгосрочные пассивы	—	—
III. Убытки	—	—	VI. Краткосрочные пассивы	12069	78672
Баланс	21858	89482	Баланс	21858	89482

АУДИТОРСКОЕ ЗАКЛЮЧЕНИЕ
фирмы ООО "Финэкоцентр"
(лицензия № 000738 от 22.07.99 Минфина РФ)

"... бухгалтерская отчетность достоверна, т.е. подготовлена таким образом, чтобы обеспечить во всех существенных аспектах отражение активов и пассивов ОАО «Электропривод» по состоянию на 01 января 2000 года и финансовых результатов его деятельности за 1999 год."

Юридический адрес ОАО "Электропривод": 107078, г. Москва, Садовая Спасская улица, д. 1/2, строение 5.

Тел. **208-21-60**, факс **208-26-23**.

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.

Справки по тел.: 203-35-33.

Внимание !

На журнал "Электротехника" ещё не поздно подписаться в редакции или в любом почтовом отделении по Объединённому каталогу Департамента почтовой связи РФ (зелёный) — Индекс 71111.

Подписавшись в редакции, вы избежите высоких почтовых расходов.

В редакции можно купить журналы за предыдущие годы со значительной скидкой.

Ежемесячный научно-технический журнал "Электротехника" 70 лет активно способствует развитию электротехнической промышленности.

Публикуя теоретические статьи, освещдающие существующие проблемы, и статьи по результатам исследований новых типов электротехнического оборудования, журнал дает возможность специалистам, занятим 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.

В современных условиях журнал приобретает все большее значение в сохранении старых и налаживании новых научно-технических и практических связей между производителями и потребителями электротехнического оборудования.

Публикуемая на страницах журнала реклама продукции, информация об условиях и сроках ее поставки, выпуск специальных номеров журнала по тематике и материалам (в том числе рекламным) заказчика, помогут Вам найти надежных партнеров как у нас в стране, так и за рубежом.

Журнал "Электротехника" распространяется по подписке — через АРЗИ (г.Москва) по объединенному каталогу Департамента почтовой связи Министерства связи Российской Федерации. Подписной индекс — 71111 (подписка на полугодие).

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.

**ПРИГЛАШАЕМ ВАС К АКТИВНОМУ СОТРУДНИЧЕСТВУ,
БУДЕМ РАДЫ ВИДЕТЬ ВАС СРЕДИ АВТОРОВ И
ПОДПИСЧИКОВ ЖУРНАЛА.**

Главный редактор

Виктор Дмитриевич Кочетков.