



С Новым Годом!



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

№ 1 ЯНВАРЬ 1998

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)
НИИ «ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ»
(г. ЗАПОРОЖЬЕ)

СОВЕТ УЧРЕДИТЕЛЕЙ

ИВАНОВ В.Н., ЧИБИРКИН В.В., МАКАРЕВИЧ Л.В., МЕЩЕРЯКОВ В.М.,
ЩЕРБАКОВ В.Г., КОВАЛЕВ Ф.И. (председатель совета), ЮНЬКОВ М.Г., ПОДАРУЕВ А.И., ГЛОВАЦКИЙ А.В., АНДРИЕНКО П.Д.

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., РОЗАНОВ Ю.К.,
СЛЕЖАНОВСКИЙ О.В. (зам. главного
редактора), ТРУБАЧЕВ С.Г.,
ТУБИС Я.Б., УСОВ Н.Н., ФИНКЕЛЬ Э.Э.,
ФЛОРЕНЦЕВ С.Н., ХОТИН В.А.

Адрес редакции:

123242, Москва,
Зоологическая ул., 11, комн. 213

Факс/телефон: 254-11-52

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ

Розанов Ю.К., Акимов Е.Г., Пручин А.Н., Рябов М.Ю.

Эрозия контактов в условиях гибридной коммутации 1

Егоров Е.Г. Современное состояние испытаний низковольтных
аппаратов управления 6

Подольский Д.В., Капустин В.В., Мещеряков В.П., Кошелев Н.В. Изучение распределения электрического поля в
присутствии дуги 9

Дмитриев Д.О., Курбатов П.А. Методы анализа динамических
характеристик магнитоэлектрических линейных приводов 13

Никитенко А.Г., Некрасов С.А. Расчет параметров
коммутационной способности электромеханических аппаратов
автоматики 17

Майзельс Р.М. Герконы. Взгляд на перспективы развития
направления 20

Острейко В.Н. Ширина разделяющих пазы перешейков в электрических контактных сварных соединениях 26

Вихарев А.П., Голговских А.В. Экспериментальное исследование
воздействия электромагнитных полей на статические
реле 27

Филиппов Ю.А. Конструктивные принципы разработки экономичных токоведущих систем аппаратов 30

Свинцов Г.П. Экспериментальные динамические характеристики
срабатывания Ш-образных электромагнитов переменного
напряжения 31

Будовский А.И., Иванов В.П. Разработки и исследования вакуумных выключателей на напряжение 6—35 кВ 36

Соколик Л.И. Алгоритмы цифрового моделирования и коррекции
погрешности каскадных трансформаторов тока 39

Дегтярь В.Г. Жидкометаллические контакты для вакуумных
контакторов 41

Ахазов И.З., Мандравин В.Е., Свинцов Г.П. Современные подходы
к проектированию электромагнитных контакторов пускателей общепромышленного применения 46

Иванов И.П., Одинцова Д.А., Свинцов Г.П. К определению
срабатывания многоконтактного герконового реле 50

Чаронов В.Я., Егоров Е.Г., Генин В.С. Автоматизированный
контроль работы станка-качалки нефти 54

Зекцер Д.М. Некоторые технические вопросы замены серебряных
серебросодержащих контактов медными 60

Райхман А. Биполярные транзисторы с изолированным затвором
фирмы "International Rectifier" 63

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ

В 1995 г. редколлегия журнала приняла решение о целесообразности выпуска тематических номеров, посвященных основным областям электротехники. Практика выпуска таких номеров получила одобрение большинства наших читателей.

Одной из традиционных областей электротехники являются электрические аппараты, без которых не может функционировать ни одна электротехническая система. В этом смысле можно сказать, что уровень современной электротехники в значительной мере определяется технико-экономическими характеристиками используемых электрических аппаратов. Поэтому настоящий номер посвящен вопросам, связанным с созданием, совершенствованием и применением широкого класса электротехнических устройств, включающих различные виды электрических аппаратов. Последние существенно различаются по назначению, принципу действия и техническим характеристикам. Поэтому круг научных, технических и других вопросов, связанных с электрическими аппаратами, весьма широк.

В этом номере рассматриваются проблемы создания гибридных и других типов коммутационных аппаратов низкого напряжения, вакуумных выключателей на напряжение 6-35 кВ, вопросы проектирования контакторов, пускателей и др. Разработчиков электрических аппаратов, наверняка, заинтересуют результаты исследований отдельных видов аппаратов и их компонентов. Актуальными как для разработчиков, так и для потребителей являются вопросы испытаний на соответствие техническим требованиям, влияния ЭМИ, оценки состояния и перспективы развития отдельных видов аппаратов. Большинство авторов публикуемых статей являются известными специалистами в области электрических аппаратов. Количество предложенных статей для публикации в тематическом номере несколько превышает принятый объем журнала. Поэтому часть статей по этой тематике будет опубликована в следующем номере.

Ю.К.Розанов, акад. АЭН, доктор техн. наук, проф.,
член редколлегии журнала
(ответственный за подготовку номера)

Эрозия контактов в условиях гибридной коммутации

**Ю.К.РОЗАНОВ, доктор техн.наук, Е.Г.АКИМОВ, А.Н.ПРУЧКИН, кандидаты техн. наук,
М.Ю.РЯБОВ, инж.**

МЭИ

Одним из возможных путей повышения технико-экономических показателей коммутационных аппаратов является ограничение дугообразования на силовых контактах с использованием гибридного принципа коммутации [1].

Применение силовых полупроводниковых приборов (СПП) в сочетании с электрическим контактом (контактным ключом) позволяет использовать положительные свойства СПП и контактных аппаратов и значительно расширяет функциональные возможности аппарата в целом.

Одним из преимуществ гибридных аппаратов считается снижение длительности горения дуги на контактах, а следовательно, повышение их эрозионной стойкости и коммутационной износостойкости.

В начальной стадии размыкания контактов уменьшается сила контактного нажатия, что приводит к росту переходного сопротивления контактов. Температура нагрева точки контактирования возрастает, и при достижении температуры плавления материала контактов плавится, образуя жидкometаллический мостик [2].

Длительность существования мостика и напряжение на нем малы, что недостаточно для открытия СПП. Однако на мостиковой стадии существования дуги износ контактов может быть преобладающим и существенно влиять на эрозионную стойкость аппарата в целом.

После взрыва мостика на контактах появляется так называемая короткая дуга, обусловленная падением напряжения в приэлектродных областях. Напряжение на контактах аппарата зависит от материала контактов и лежит в пределах 6–12 В. Этого достаточно, чтобы включить СПП. Длительность перехода из мостиковой стадии в стадию существования короткой дуги не превышает 10–20 нс. Длительность короткой дуги, когда влияние столба дуги еще невелико, не превышает 20–50 мкс, что достаточно для включения СПП, но может быть недостаточно для полного перевода тока с контактов в цепь СПП.

Переходный процесс можно считать закончившимся, когда ток полностью перейдет в СПП. Поэтому на износ контактов в той или иной степени оказывают влияние как мостиковая стадия, так и стадия существования короткой и плазменной дуги.

Аналогичный характер явлений на контактах имеет место и при включении аппарата. Существенную роль при этом играет вибрация контактов.

В гибридных аппаратах (ГА), построенных на принципе параллельного включения контакта и СПП, длительность существования дуговой стадии в процессе коммутации контактов определяется характером переходного процесса из цепи главных контактов в цепь СПП [1]. Характер переходного процесса аналогичен явлениям в контактной паре (главные и дугогасительные контакты) и широко проиллюстрирован в литературе по силноводным коммутационным аппаратам.

Отличительная особенность переходного процесса в системе контакт-СПП — начальное закрытое состояние СПП, когда главные контакты еще замкнуты. Этим обусловлено некоторое запаздывание начала перехода тока с контактов в СПП, а следовательно, увеличение длительности переходного процесса в целом.

На рис.1 приведена схема замещения контактно-полупроводникового узла ГА, построенного на параллельном принципе. Здесь R_1 и L_1 — соответственно, активное сопротивление и индуктивность цепи главных контактов, включая то-коведущие контактные детали и переходное сопротивление контактов и контактных соединений; R_2 и L_2 — соответственно, активное сопротивление и индуктивность соединительных проводов, связывающих СПП и главные контакты (ГК), а также переходное сопротивление контактных соединений.

Во включенном соединении ГА весь ток проходит по цепи ГК, так как СПП закрыт, а токи утечки через СПП не превышают 10–20 мА и в дальнейшем не учитываются.

При отключении цепи с током в момент начала размыкания ГК происходит нарастание напряжения на контактах до момента открытия СПП (например, тиристора). С этого момента и начинается перетекание тока из цепи ГК в цепь СПП. Процесс отключения СПП в случае с естественной системой коммутации закончится в первый же нуль тока.

Если известны параметры схемы замещения (R_1 , R_2 , L_1 , L_2) и они постоянны, известен закон изменения напряжения на контактах — $U_k(t)$ и ВАХ силового полупроводникового прибора, то переходный процесс в схеме на рис.1 может быть описан следующей системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} U &= L_1 \frac{di_1}{dt} + R_1 i_1 + U_k(t) + M_{1-2} \frac{di_2}{dt}; \\ U &= L_2 \frac{di_2}{dt} + R_2 i_2 + U_{\text{СПП}}(i_2) + M_{1-2} \frac{di_1}{dt}; \\ i &= i_1 + i_2, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где U — напряжение источника питания; $U_{\text{СПП}}$ — падение напряжения на СПП; M_{1-2} — взаимная индуктивность контура контакт-СПП.

Аналитическое решение системы уравнений (1) затруднено в связи в нелинейными параметрами в схеме замещения: $U_k(t)$ и $U_{\text{СПП}}(i_2)$. В первом приближении система уравнений (1) может быть решена при условии постоянства напряжения на контактах $U_k = \text{const}$ и напряжения на СПП $U_{\text{СПП}} = \text{const}$, значение которого достаточно для открытия СПП и поддержания его в открытом состоянии.

Более точное решение (1) возможно с применением современных средств вычислительной техники, например, пакета прикладных программ PSpice [7].

В настоящей работе рассматривается модель контакт-СПП, включенных по параллельной схеме. В основу такой модели положено допущение, что на тиристор, зашунтированный контактным ключом, предварительно подан сигнал управ-

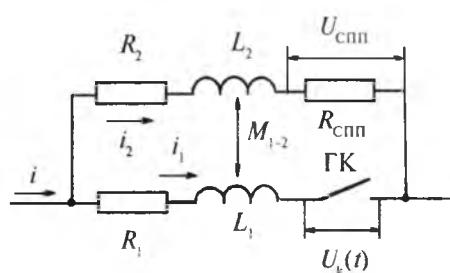


Рис.1. Схема замещения контактно-полупроводникового узла ГА

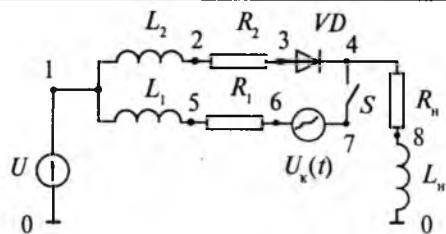


Рис.2. Модель контактно-полупроводникового узла на базе диода

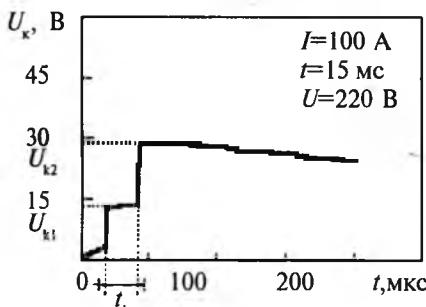


Рис.3. Осциллограмма отключения цепи постоянного тока малогабаритным контактором серии КНЕ 230

ления и его включение производится путем повышения напряжения анод-катод. Поэтому процесс включения тиристора аналогичен процессу включения диода, а для его моделирования используется известная модель диода, применяемая в PSpice [7].

В качестве СПП был выбран силовой диод фирмы "MOTOROLA" DIN3495. При использовании других диодов переходные процессы в них будут отличаться незначительно, так как рост тока в полупроводнике, в основном, определяется параметрами его выводов.

Упрощенная схема замещения для моделирования переходного процесса в контактно-полупроводниковом узле представлена на рис.2.

Напряжение на дуге $U_k = U_k(t)$ определяется, например для мостиковых контактов (двухразрывной контактной системы), экспериментально. Типичная осциллограмма отключения цепи контактным аппаратом приведена на рис.3. Скачок напряжения до уровня U_{k2} обусловлен размыканием первого контакта мостика. Уровень напряжения U_{k1} определяется материалом контактов и для контактных накладок на основе СОК-15 составляет около 12 В.

Скачок напряжения до уровня U_{k2} (размыкание второго контакта мостика) в среднем происходит через 10–25 мкс. При этом уровень напряжения на контактах повышается до 24 В.

Ключ S в цепи контактов (рис.2) служит для контроля окончания дуговой стадии на контактах. При достижении током значения минимального тока дугообразования i_m (для контактов на основе серебра это 0,25 А) дуговая стадия разряда переходит в стадию тлеющего и Таунсендовского разряда, вследствие чего можно считать переходный процесс в контуре завершенным.

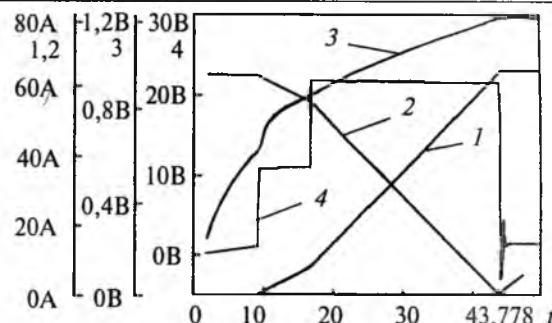


Рис.4. Пример моделирования процесса отключения гибридного аппарата с номинальным током 63 А:

1 — ток в цепи СПП; 2 — ток в цепи контактов; 3 — напряжение на СПП; 4 — напряжение на контактах

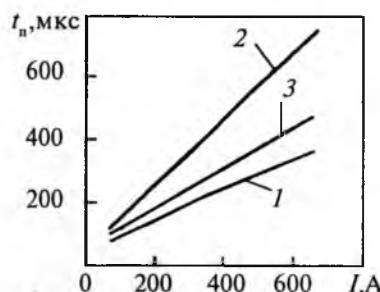


Рис.5. Зависимость времени t_n перехода тока с контактов в цепь СПП от значения коммутируемого тока I :

двуразрывная модель контактов — 1 — $L_2 = 10$ мкГн; 2 — $L_2 = 100$ мкГн; одноразрывная модель контактов: — 3 — $L_2 = 10$ мкГн

Пример полученного результата моделирования на PSpice переходного процесса отключения ГА номинального тока 63 А дан на рис.4. Процесс перетекания тока из цепи контактов в СПП закончится, когда ток дуги снизится до минимального тока дугообразования. В номинальном режиме это наступит через 43,7 мкс.

На время t_n перехода тока с контактов в цепь СПП существенное влияние оказывает коммутируемый ток I . На рис.5 приведены зависимости $t_n = f(I)$ для одно- и двухразрывных контактов при различных индуктивностях в цепи СПП.

Время перехода тока с контактов в СПП существенно возрастает при росте индуктивности цепи СПП, что напрямую вытекает из решения системы уравнений (1) и подтверждается экспериментальными данными [3,4].

Применение двухразрывных контактов (мостиковых) способствует быстрому вытеснению тока из цепи контактов в цепь СПП за счет роста напряжения короткой дуги. Однако надо стремиться к сокращению разброса по времени срабатывания двух контактных разрывов за счет дополнительных конструктивных решений.

Другие параметры схемы замещения (рис.2) оказывают различное влияние на время t_n и также должны быть учтены при разработке физической модели kontakt-СПП [5,6].

Оценив таким образом время перехода тока с контактов в СПП и, тем самым, время су-

ществования дуги (включая мостиковую стадию) на контактах, можно говорить об эрозионной стойкости контактов в условиях гибридной коммутации.

Наиболее наглядно можно оценить эрозию контактов в ГА на примере коммутации постоянного тока [5].

В общем случае массовая эрозия катодного контакта — следствие процессов трех типов: мостикового, короткой дуги и плазменного:

$$G = G_m + G_s - G_p, \quad (2)$$

где G — интегральная эрозия; G_m — мостиковая эрозия; G_s — эрозия короткой дуги; G_p — эрозия плазменной дуги.

В соответствии с (2) при возникновении плазменной дуги может измениться направление переноса массы металла. В случае существования мостиковой и короткой стадий дуги на катоде контакта идет формирование выступов (металлических "игл"), а на аноде — углублений ("кратеров"). Наличие выступов на одном из контактов может привести к выходу аппарата из строя из-за пробоя межконтактного промежутка. В то же время согласно уравнению (2) минимум интегральной эрозии наблюдается в случае, когда $(G_m + G_s) = G_p$, т.е. имеет место ярко выраженный экстремум.

Для оценки срока службы аппарата удобно использовать понятие объемной эрозии V_o контактов за одну коммутацию. Тогда

$$N = 2\pi R^2 h_{k,n} / 9 V_o, \quad (3)$$

где R — радиус контактной накладки; $h_{k,n}$ — высота контактной накладки или межконтактный зазор в зависимости от того, что меньше.

Согласно [5]

$$V_o = K_m I^2 + K_s \int_0^{t_s} i_d dt - \int_{t_s}^{t_d} K_p(\delta) i_d dt, \quad (4)$$

где K_m , K_s — коэффициенты мостиковой эрозии и короткой дуги, соответственно; $K_p(\delta)$ — коэффициент эрозии плазменной дуги, зависящий от межконтактного зазора;

$$K_p(\delta) = \begin{cases} \frac{W_0}{\gamma} \left(1 - \frac{\delta}{\delta_0}\right), & 0 < \delta < \delta_1; \\ \frac{1}{\gamma} \left(a + \frac{b}{\delta''}\right), & \delta \geq \delta_1, \end{cases} \quad (5)$$

γ — плотность материала; W_0 , δ_0 , a , b , δ_1 , n — коэффициенты, зависящие от материала контактов; t_s — время короткой дуги; t_d — общее время дуги; I — отключаемый ток; i_d — ток дуги; $\delta(t)$ — изменяющийся во времени межконтактный зазор,

$$\delta(t) \approx V_{cp} t;$$

V_{cp} — средняя скорость размыкания контактов.

Ток дуги i_d определяется из уравнения цепи с электрической дугой

$$U = i_d R + L \frac{di_d}{dt} + U_d(i_d, \delta), \quad (6)$$

где U — напряжение источника; R , L — активное сопротивление и индуктивность цепи; $U_d(i_d, \delta)$ — вольт-амперная характеристика дуги.

ВАХ дуги определяется экспериментально для выбранного типа контактов либо рассчитывается согласно

$$U_d(i_d, \delta) = U_m + E(i_d) l_d, \quad (7)$$

где U_m — напряжение дугообразования контактного материала (для мостиковых контактов используется $2U_m$); $E(i_d)$ — зависимость градиента напряжения дуги от тока дуги; l_d — длина дуги.

Решение дифференциального уравнения (6) для двухразрывного (мостикового) контакта имеет вид

$$i_d(t) = I - \frac{2U_m}{R} \left(1 - \frac{1 + e^{-t_1/\tau}}{2e^{-t_1/\tau}} e^{-t/\tau} \right), \quad (8)$$

где $I = U/R$ — ток коммутируемой цепи; $\tau = L/R$ — электромагнитная постоянная времени коммутируемой цепи; t_1 — время начала размыкания второго разрыва мостикового контакта.

Для одноразрывного контакта

$$i_d(t) = I - \frac{U_m}{R} (1 - e^{-t/\tau}). \quad (9)$$

Совместным решением уравнений (3)–(8) или (9) при начальных условиях $t = 0$, $i_d(t) = I$, $\delta(t) = 0$ определяется срок службы одноразрывного N_1 или двухразрывного N_2 контактов. В случае двухразрывного контакта время дуги меньше на t_1 , т.е. уравнение (4) примет вид

$$V_o = K_m I^2 + K_s \int_0^{t_s} i_d dt - \int_{t_s}^{t_d - t_1} K_p(\delta) i_d dt. \quad (10)$$

Поскольку мостиковый контакт имеет два разрыва, то срок службы определяется наименьшим из двух сроков:

$$N = \min \{N_1, N_2\}. \quad (11)$$

Описанная модель не учитывает эрозию контактов при включении с вибрацией. При этом имеют место одноразрывные короткие дуги. Следовательно, объемная эрозия за одну полную коммутацию (включение-отключение) может быть описана следующими уравнениями (так как не известно, какой из контактов подвергается эрозии в процессе вибрации):

$$V_{o1} = K_m I^2 + K_s \int_0^{t_s} i_d dt - \int_{t_s}^{t_d} K_p(\delta) i_d dt;$$

$$V_{02} = (m+1) \left(K_m I^2 + K_s \int_0^{t_s} i_d dt \right) - \int_{t_s}^{t_d} K_p(\delta) i_d dt;$$

$$V_{03} = K_m I^2 + K_s \int_0^{t_s} i_d dt - \int_{t_s}^{t_d-t_1} K_p(\delta) i_d dt; \quad (12)$$

$$V_{04} = (m+1) \left(K_m I^2 + K_s \int_0^{t_s} i_d dt \right) - \int_{t_s}^{t_d-t_1} K_p(\delta) i_d dt,$$

где m — среднее число отскоков с дугой за одно включение.

Тогда срок службы оценивается по наихудшему варианту:

$$N = \min \{N_1, N_2, N_3, N_4\}. \quad (13)$$

Для переменного тока срок службы определяется допустимым распыляемым объемом $V_{\text{доп}}$ контактного материала и объемом V_p материала, распыляемого за одну коммутацию [8]:

$$N = V_{\text{доп}} / V_p. \quad (14)$$

Для цилиндрических контактных накладок

$$V_{\text{доп}} \approx \pi R^2 \frac{2}{3} h_{\text{к.н}}, \quad (15)$$

где R — радиус контактной накладки.

Объем материала, распыляемого за одну коммутацию, определяется как

$$V_p = \int_{t_s}^{t_d} K_{pn}(\delta) K_p(\delta) i_d dt, \quad (16)$$

где $K_p(\delta)$ — определяется согласно (5), а i_d — из дифференциального уравнения

$$\begin{aligned} & \sqrt{2} U \sin(\omega t + \varphi + \omega t_p) = \\ & = \frac{U}{I} \left(i_d + \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi}}{\omega} \frac{di_d}{dt} \right) + U_d(i_d, \delta), \quad (17) \end{aligned}$$

где U, I — действующие значения, соответственно, напряжения и тока сети; ω — угловая частота тока сети; φ — условный угол сдвига фаз; $\cos \varphi$ — коэффициент мощности; t_p — время, прошедшее от перехода тока через нуль до момента размыкания контактов; $U_d(i_d, \delta)$ — вольт-амперная характеристика дуги, идентичная характеристике дуги при постоянном токе; $\delta(t)$ — межконтактный зазор; $K_{pn}(\delta)$ — коэффициент, приближенно определяемый как

$$K_{pn}(\delta) \approx K_{pn} = \frac{1}{2} \frac{V_{cp} t_d}{R}. \quad (18)$$

Поскольку момент размыкания контактов t_p является случайной величиной, то следует рассчитать эрозию контактов для значений t_p в диапазоне от 0 до полупериода и определить математическое ожидание по n_1 точкам расчета

$$V_p = \frac{1}{n_1} \sum_{j=1}^{n_1} V_{pj}, \quad (19)$$

а если необходимо, то и дисперсию и доверительный интервал.

В нашем случае решение уравнения (17) имеет вид [5]

$$i_d = \sqrt{2} I \sin(\omega t + \omega t_p) + 2U_m \frac{1}{U \cos \varphi} \left(e^{-\frac{\cos \varphi}{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi}}} - 1 \right). \quad (20)$$

Расчет по приведенной методике показал, что при напряжении 220 В, переменном токе 100 А и активно-индуктивной нагрузке, а также при условии, что длительность существования дуги не превышает 500 мкс, коммутационная износостойкость гибридного аппарата достигает 50 млн. циклов включений-отключений, что значительно превышает механический ресурс базового электромеханического аппарата.

Модель ГА постоянного тока проверена на базе поляризованных реле и транзисторов типа СИТ. Определены оптимальные длительности времени существования дуги на контактах с точки зрения минимальной эрозии контактов. Для ГА на базе реле РПС58 это время составляет 111 мкс; для реле РПС36 — 20 мкс и для реле РПС45 — 6 мкс.

Кроме того, как показали испытания, контакты на основе серебра более подвержены мостиковой стадии износа, что и явилось причиной роста высоты выступов на катоде.

Была проведена оценка срока службы ГА постоянного тока на номинальный ток 100 А, напряжение 110 В с учетом всего цикла коммутации (включение-отключение); исследовался контакт мостикового типа на серебряной основе с контактной накладкой радиусом $R = 0,3$ см и толщиной $h_{\text{к.н}} = 0,2$ см.

При длительности существования дуги на контактах $t_d = 100$ мкс срок службы составил $N = 0,361$ млн. циклов включений-отключений (ВО); при $t_d = 300$ мкс — $N = 0,403$ млн. циклов ВО; при $t_d = 500$ мкс — $N = 0,429$ млн. циклов ВО. При дальнейшем росте длительности горения дуги на контактах ГА срок службы аппарата существенно снижается.

Список литературы

1. Розанов Ю.К., Акимов Е.Г. Основные тенденции развития силовых коммутационных аппаратов управления и защиты низкого напряжения//Электротехника. 1997. № 1.
2. Омельченко В.Т. Теория процессов на контактах. Харьков: Вища школа, 1979.
3. Намитоков К.К., Могилевский Г.В., Колесов В.В. Некоторые особенности переходных процессов на контактах при отключении тока гибридным аппаратом//Электротехника. 1982. № 10.
4. Greitzke S., Lindmayer M. Mikroerosionsphänomene halbleiterbeschalteter Kontaktstrecken//Elektrotechn. und Informationstechn. 1990. № 2. S.107.

5. *Erosion processes in hybrid relais*/Ю.К.Розанов, Е.Г.Акимов, И.А.Рагулин, А.Н.Пручкин//Proceeding of the INTERNATIONAL CONFERENCE CONTACTS, ARCS, APPARATUS AND THEIR APPLICATIONS, XIAN, China, 1994.

6. Розанов Ю.К., Акимов Е.Г. Эрозия контактов в условиях гибридной коммутации//Тезисы докладов на международной

конференции “Электрические контакты”. Санкт-Петербург, 1995.

7. Развиг В.Д. Применение P-CAD и PSpice для схемотехнического моделирования на ПЭВМ. М.: Радио и связь, 1992. Вып. 2,3.

8. Математическая модель геометрии эрозионных зон на контактах реле/И.С.Таев, И.А.Рагулин, А.Н.Пручкин, Е.П.Попова//Электротехника. 1990. № 9.

Современное состояние испытаний низковольтных аппаратов управления

Е.Г.ЕГОРОВ, канд.техн.наук

Чувашский государственный университет

Рассмотрены вопросы компьютерной оценки работоспособности аппаратов, технические средства для контроля этих параметров, а также новые методики испытаний, переориентированные на автоматизированный контроль и аппаратные средства, для проведения научного эксперимента и стандартных испытаний в условиях промышленного производства непосредственно на заводах-изготовителях низковольтной аппаратуры управления, а также электрических контактов и материалов для них.

Внедрение средств вычислительной техники позволило решить многие проблемы испытаний электрических аппаратов управления:

— повышение производительности труда при проведении таких наиболее трудоемких испытаний, как приемо-сдаточные (которым подвергается каждое изделие НВА) или периодические испытания (например, на механическую износостойкость, коммутационную износостойкость или надежность), длительность которых достигает нескольких месяцев;

— объективность контроля;

— повышение качества выпускаемой и вновь разрабатываемой продукции.

Также решена проблема сертификации продукции, в частности, подлежащей обязательной сертификации. В первую очередь в перечень включена та продукция, на которую в государственных стандартах установлены требования по обеспечению безопасности жизни и здоровья потребителей, охраны окружающей среды, предотвращению вреда имуществу граждан.

В настоящее время создан комплекс автоматизированного испытательного оборудования. При этом были решены следующие вопросы:

— определены необходимые и достаточные для оценки работоспособности аппаратов параметры и критерии;

— разработаны технические средства для контроля этих параметров (датчики), сопрягаемые со средствами вычислительной техники;

— разработаны новые или усовершенствованы существующие методики испытаний с целью их переориентации с ручного на автоматизированный (компьютерный) контроль;

— разработаны аппаратные средства испытательного комплекса;

— разработаны прикладные программы на каждый конкретный вид испытаний.

Испытательный автоматизированный комплекс имеет возможность подключения к ЭВМ, расположенной на более высоком иерархическом уровне для обработки и хранения информации.

Наибольшую трудность в создании современного испытательного оборудования представляли выбор критериев и автоматизированное (компьютерное) определение работоспособности испытуемого аппарата. Например, вопрос установления регламентируемых критериев работоспособности испытуемого аппарата при испытании пускателей на коммутационную износостойкость был выполнен следующим образом. Состояние аппарата характеризуется дуговой эрозией контактов в процессе испытаний, что вызывает уменьшение провала контактов, конечного контактного нажатия, рост дребезга (вибрации) контактов при их замыкании, увеличение падения напряжения на контактах в замкнутом состоянии и температуры контактов.

Было предложено наряду с провалом контактов и конечным контактным нажатием, как это предусматривается нормативной документацией, в качестве одного из дополнительных критериев работоспособности испытуемых пускателей использовать температуру контактов, так как она объективно характеризует условия коммутаций и контактирования при работе аппарата в повторно-кратковременном режиме испытания пускателей на коммутационную износостойкость.

Непосредственный контроль износа и температуры контактов технически сложен. Необходимо с достаточно высокой точностью измерять механические перемещения деталей и узлов, конструкции которых различаются для различных серий и размеров испытуемых аппаратов. В связи с этим температура контактов может рассчитываться на основе решения тепловых задач, описывающих нагрев и эрозию контактов, с использованием в качестве исходных данных, непосредственно контролируемых в процессе выполнения испытательно-коммутационных циклов: коммутационного тока, времени дребезга контактов, падения напряжения на контактах, времени дуги и т.д.

Дуговая эрозия исследовалась по математическим моделям, разработанным в [1] с помощью методики оценки температуры в перемежающемся режиме [2].

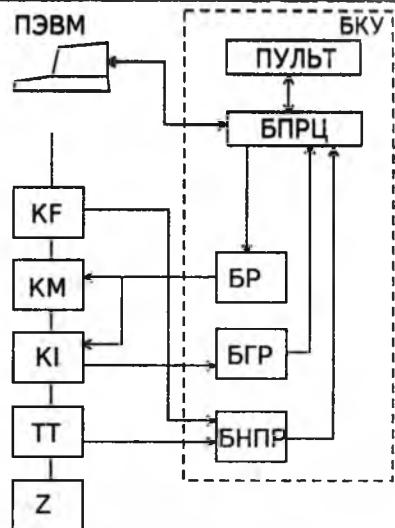
Для обеспечения применимости результатов исследований тепловых процессов на контактах по указанным выше методикам в различных условиях коммутации, характерных только для низковольтных аппаратов управления, было предложено использовать относительный износ контактов по отношению к ранее установленным (чаще всего номинальным) условиям.

В связи с тем, что при проведении испытаний контроль температуры контактов (т.е. его расчетная оценка) должен производиться в режиме реального времени, были разработаны математические модели в виде полиномов второго порядка, описывающие решения данных задач для ограниченного диапазона изменения условий коммутаций в режиме испытаний (напряжения и тока, частоты коммутаций, ПВ и т.д.)

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i,j=1, i < j} b_{ij} x_i x_j + \dots + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2, \quad (1)$$

где Y — определяемая расчетная оценка; b — коэффициенты математических моделей; $x_1 \dots x_n$ — нормированные значения влияющих факторов.

Коэффициенты математических моделей и их применимость для получения расчетных оценок температуры контактов и их относительного износа определялись на автоматизированном экспериментальном комплексе коммутационных процессов [3], структурная схема которого изображена на рисунке. Разработанный и внедренный в АО ВНИИР комплекс обеспечивает проведение исследований при коммутации токов от 4 до 240 А. Его средства позволяют контролировать в ходе исследований напряжение и ток испытательной цепи, время срабатывания исследуемых аппаратов, суммарное время разомкнутого состояния контактов при дребезге в процессе их замыкания, падение напряжения на замкнутых контактах при протекании тока, время горения дуги при размыкании контак-



Автоматизированный экспериментальный комплекс коммутационных процессов:

БКУ — блок контроля и управления АЭК КП; **БПРЦ** — блок процессора; **БР** — блок реле; **БГР** — блок гальванических развязок; **БНПР** — блок нормирующих преобразователей; **KF** — защитный аппарат; **KM** — вспомогательный аппарат; **KI** — испытательный аппарат; **TT** — трансформаторы тока; **Z** — нагрузка

тов, температуру контактных узлов, переходное сопротивление контактов. Комплекс позволяет автоматизировать эксперименты, обработку и документирование результатов исследования.

Использование расчетных оценок в качестве критериев работоспособности коммутационного аппарата [4] исключает необходимость постоянного участия человека в контроле испытуемого аппарата в ходе длительных испытаний.

Эти оценки являются также прогнозирующими, так как позволяют рассчитать температуру, которая при внезапном изменении условий коммутации, например, при скачкообразном увеличении напряжения или тока в испытательной цепи, установится лишь через некоторое время. Предотвращается необратимое разрушение объекта испытаний в случае поломки или ухудшения условий коммутации. Обеспечивается сохранение результатов испытаний, полученных в течение длительного времени, и предоставляется возможность анализа причин, приведших к предельному состоянию.

Применение разработанных критериев обеспечивает получение объективных и информационных данных об испытаниях постоянно, с самого их начала, что повышает оперативность использования результатов. Информативность и оперативность особенно важны при создании новых и модернизации существующих аппаратов, так как способствуют повышению качества разработки и сокращению ее сроков.

На заводах-изготовителях низковольтной аппаратуры, электрических kontakt-деталей и контактных материалов для проведения автоматизированных испытаний АО «ВНИИР» вне-

дрен комплекс специального технологического оборудования с применением современных средств вычислительной техники [5]:

1) стенд входного контроля СВК (проверка срабатывания и возврата, хода подвижной системы, зазора и провала контактов, неодновременность касания контактов);

2) стенд проверки прочности изоляции СПИ;

3) стенд калибровки (регулировки, стабилизации тока) тепловых реле РТСК (предварительный прогрев реле, охлаждение, проверка возврата, проверка несрабатывания и срабатывания реле, автоматическая стабилизация греющего тока);

4) автоматизированная испытательная станция АИС (проведение испытаний на коммутационную износостойкость в режимах AC-3, AC-4, AC-11, DC-11 и механическую износостойкость; станция состоит из стендов коммутационной износостойкости типа СКИ и механической износостойкости СМИ);

5) автоматизированный экспериментальный комплекс надежности контактирования АЭК НК (контроль падения напряжения на контактах, определение статистических характеристик эмпирического распределения, параметров распределения и проверка согласия с предполагаемыми теоретическими распределениями).

При разнообразии назначений и функций перечисленных испытательных стендов они имеют высокую степень унификации входящих в их состав электронных блоков, что достигнуто благодаря использованию в испытательном оборудовании микропроцессорных средств и контроля на базе K1816 Be35. В зависимости от задач, возлагавшихся на блок управления того или иного стенда, этот блок дополнялся блоками расширения. Такая схемоконструктивная унификация разработанных стендов, помимо упрощения процесса их разработки и изготовления, обеспечивает также большое удобство при выявлении и устраниении неисправностей, возникающих в процессе многолетней эксплуатации стендов в жестких заводских условиях работы.

Разработанные к настоящему времени и упомянутые технические средства испытаний позволяют также решить проблему сокращения времени получения информации по качеству и надежности выпускаемой продукции. Такая информация может быть получена путем проведения ускоренных испытаний.

Разработанная ускоренная методика определения коммутационной износостойкости электрических аппаратов является расчетно-экспериментальной [6].

Основа разработки — решение дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности в сочетании с физическим моделированием процесса нагрева контактов циклическими дуговыми разрядами при сильных токах [1].

Ускоренные испытания в этом случае сводятся к расчету удельной массы износа (на один цикл коммутации) по расчетно-экспериментальной зависимости

$$m_0 = F_1 + (Y_1 + Y_2 F_2), \quad (2)$$

где F_1 , F_2 — определяемые по теоретическим формулам функции отключаемого тока, параметров контактной системы и параметров ис-

$$\text{пытаний}, F_1 = I \sqrt{\frac{\lambda j t_d}{C}}; \quad F_2 = \frac{U_{\text{оз}}}{T_{\text{пл}}} \sqrt{\frac{t_d}{C_j}} \quad (j, \lambda, c,$$

$T_{\text{пл}}$ — плотность, удельные теплопроводность, теплоемкость, температура плавления материала контактов; I , $U_{\text{оз}}$, t_d — ток, околоэлектродное падение напряжения, время дуги); Y_1 , Y_2 — коэффициенты, определяемые экспериментально на основе измерения удельных масс износа при ограниченном количестве коммутаций при двух отключаемых токах.

Коммутационная износостойкость N_k будет определяться соотношением массы контактов M , которая может быть изношена, к удельной массе износа m_0 :

$$N_k = M/m_0.$$

Конкретные значения экспериментальных коэффициентов Y_1 , Y_2 (2) определяются для конкретных условий испытаний изделия, и эта формула справедлива для определения износостойкости именно в этих условиях. Например, по результатам приведенных исследований для пускателей типа ПМА-3000 на номинальный ток 40 А с контакт-деталями КМК-А10М (СОК-15М) для категории применения AC-3 и AC-4 получена зависимость

$$m_0 = F_1 (2,42 \cdot 10^{-7} - 7,57 \cdot 10^{-4} F_2) \text{ г/цикл.}$$

Дальнейшее совершенствование методов и средств испытаний будет происходить с учетом развития низковольтных аппаратов управления, тенденция которого — современные микропроцессорные системы и комплексы.

Список литературы

1. Электрическая эрозия сильноточных контактов и электродов/Г.В.Буткевич, Г.С.Белкин, Н.А.Ведешников, М.А.Жаворонков М.: Энергия, 1978.
2. Таев И.С. Электрические аппарат. Общая теория. М. Энергия, 1977.
3. Тезисы докладов научно-практической конференции, посвященной 25-летию Всесоюзного научно-исследовательского института релестроения/И.С.Таев, В.С.Генин, Е.Г.Егоров и др. Чебоксары: 1986. С.132—133.
4. Егоров Е.Г., Генин В.С. Критерии работоспособности аппаратов управления для машинно-ориентированной методики испытаний на коммутационную износостойкость. Чебоксары: Труды ВНИИР, 1987. С. 90—95.
5. Специальное технологическое оборудование для приемо-сдаточных и периодических испытаний пускателей и реле/Е.Г.Егоров, В.Е.Мандровин, Г.А.Бугаев и др./Электротехника. 1997. № 1. С. 24—26.
6. Таев И.С., Егоров Е.Г. Расчетно-экспериментальное определение коммутационной износостойкости электрических аппаратов//Электротехника. 1996. № 1. С.55—56.

Изучение распределения электрического поля в присутствии дуги

Д.В.ПОДОЛЬСКИЙ, В.В.КАПУСТИН (Ульяновский государственный университет),
В.П.МЕЩЕРЯКОВ, Н.В.КОШЕЛЕВ (АОЗТ "Контактор", г. Ульяновск)

При разработке автоматических выключателей важную роль играет изучение дуговых процессов, обусловленных наличием магнитного и электрического полей. При этом, если распределение магнитного поля в области существования дуги достаточно просто вычисляется и легко измеряется в эксперименте [1—3], то распределение электрического поля при рассмотрении электрической дуги до настоящего времени не исследовалось.

Для исследования влияния различных факторов на движение дуги была проведена скоростная киносъемка гашения токов КЗ в выключателях "Электрон" (АОЗТ "Контактор") от 10 до 100 кА мгновенного значения. Подробный анализ фотографий показал, что наряду с хорошо известными вторичными пробоями при переходе тока через нуль [4] и обратным движением дуги из дугогасительной решетки [5] возникает параллельная к основной дуге дуга (рис.1), которая начинает развиваться, что приводит к увеличению времени гашения дуги. Аналогичное явление наблюдалось Haug [1] и Mercier [2, 3]. Оно было названо передачей тока. Haug [1] предложил простую теоретическую модель процесса. В данной модели главной причиной возникновения параллельной дуги является ее тепловой разогрев при быстром росте напряжения, но при этом место и условия возникновения остаются неопределенными.

Объяснить этот факт можно, если предположить, что протекающий по токоподводящим электродам к дуге ток изменяет распределение электрического поля. Поэтому настоящая работа

посвящена исследованию влияния подвода тока на электрическое поле и вероятность повторных зажиганий.

Выбор модели

В 1932 г. Штеенбеком была предложена канальная модель дуги. В этой модели столб дуги при моделировании электрического поля заменился проводником с конечными размерами и малой проводимостью. В эксперименте, описанном ниже, повторное зажигание начиналось при напряжениях 130 В, расстоянии между электродами 2 мм и на некотором расстоянии от основного канала дуги. Легко видеть, что в рамках данной модели напряженность электрического поля, при которой происходит повторное зажигание, равна порядка $6,5 \cdot 10^4$ В/м, что существенно меньше напряженности поля, при которой происходит электрический пробой воздуха, $3 \cdot 10^6$ В/м.

С другой стороны, хорошо известно [6], что дугу в теории нелинейных электрических цепей можно представить в виде источника ЭДС с изменяющимися параметрами. В настоящей работе предлагается модель электрической дуги, где источники ЭДС находятся в точках контактирования электрической дуги с электродами.

Математическое описание электрического поля

Главным условием существования электрической дуги является наличие электрического тока. Следовательно, во время ее существования в каждой точке пространстве выполняется закон непрерывности тока:

для точек области (в предположении отсутствия пространственного заряда)

$$\operatorname{div} \vec{j} = 0, \quad (1)$$

где \vec{j} — плотность тока;

для точек поверхности раздела

$$j_{ni} = j_{nr}, \quad (2)$$

где j_{ni} , j_{nr} — нормальные составляющие плотности тока слева и справа относительно поверхности раздела, соответственно.

С другой стороны, из эксперимента известно, что дуга соединяется с электродами в конечном числе пятен. Таким образом, при математическом моделировании нормальная составляющая вектора плотности тока на поверхности раздела непрерывна в конечном числе точек. Так как мера точки равна нулю, то в данных точках функцию плотности тока можно представить в виде дельта-функции:



Рис.1. Параллельная дуга в камере выключателя:
а — движение основной дуги; б — развитие параллельной дуги

$$j_{ni} = j_{ni} = I \cdot \delta(p), \quad (3)$$

где I — полный ток, текущий через данное пятно; $\delta(p)$ — дельта-функция.

Таким образом, учитывая уравнения (1)–(3) и предполагая, что удельная проводимость в зоне дуги является постоянной и ток течет на поверхности раздела через единичные пятна, получаем следующую краевую задачу:

$$\Delta\phi(p) = 0, \quad p \in V; \quad (4)$$

$$\gamma_i \frac{\partial\phi}{\partial n_i} = J_0(p), \quad p \in S_{c-}, S_{c+}; \quad (5)$$

$$\frac{\partial\phi}{\partial n_i} = 0, \quad p \in S, \quad p \notin S_{j-}, S_{j+}, S_{c-}, S_{c+}; \quad (6)$$

$$\gamma_j \frac{\partial\phi}{\partial n_i}(p) = I \cdot \delta(p), \quad \gamma_e \frac{\partial\phi}{\partial n_e}(p) = I \cdot \delta(p), \quad p \in S_{j-}, S_{j+}. \quad (7)$$

Здесь ϕ — потенциал электрического поля; γ_i, γ_e — удельные проводимости металла и дуги соответственно; V — область двумерного пространства; S — поверхность проводников; S_{c-}, S_{c+} — точки поверхности S , где ток втекает и вытекает из проводников соответственно; S_{j-}, S_{j+} — точки поверхности S , где расположены корни дуги; \vec{n} — внешняя нормаль к поверхности S ; I — ток, текущий через пятно; $J_0(p)$ — плотность тока в проводнике (рис.2).

Напряженность электрического поля и плотность тока выражаются через ϕ следующим образом:

$$\bar{j} = \gamma \bar{E}; \quad \bar{E} = -\operatorname{grad} \phi.$$

Функцию ϕ будем искать в виде

$$\begin{aligned} \phi(p_0) &= \\ &= \begin{cases} C_i \left(\int_{S_a} \sigma(p) \ln(R(p, p_0)) ds + \sum_{k=1}^M q_i^k(p_a) \ln(R(p, p_0)) \right), & p_0 \in V_i; \\ \int_{S_a} \sigma(p) \ln(R(p, p_0)) ds + \sum_{k=1}^M q_e^k(p_a) \ln(R(p, p_0)), & p_0 \in V_e. \end{cases} \end{aligned}$$

Здесь $\sigma = \sigma(p)$ — функция плотности поверхностного заряда; $\vec{R}(p, p_0)$ — радиус-вектор, проведенный от точки p до p_0 ; S_a — поверхность

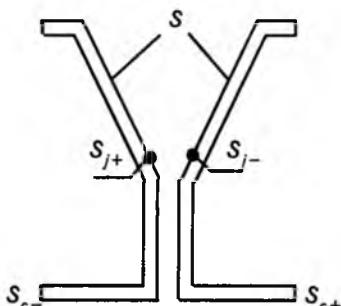


Рис.2. Моделирование электрического поля (эскиз макета)

S без точек S_{j-}, S_{j+} , $S_a = S / (S_{j-} \cup S_{j+})$; $p_a \in (S_{j-} \cup S_{j+})$;

M — число корней дуги; $\{q_i^k\}_{k=1}^M$ и $\{q_e^k\}_{k=1}^M$ — набор реальных чисел.

Можно показать, что функция σ и $\{q_i^k\}_{k=1}^M$ и $\{q_e^k\}_{k=1}^M$, удовлетворяющие граничным условиям (5)–(7), существуют и единственны, тогда и только тогда, когда:

$$C_i = \frac{\gamma_i}{\gamma_e},$$

где γ_i, γ_e — проводимости металла и дуги соответственно.

В настоящей работе краевая задача стандартным способом сведена [7] к решению следующего интегрального уравнения:

$$\begin{aligned} -\frac{\sigma(p_0)}{2} + \frac{1}{2\pi} \left(\int_S \frac{\sigma(p) \cdot \cos\beta}{R(p, p_0)} dS_p + \frac{q_i \cdot \cos\beta}{R(p, p_0)} \right) &= \\ &= F(p_0), \quad p_0 \notin S_{j+}, S_{j-}; \\ -\frac{q_e}{2} \delta(p_0) + \frac{1}{2\pi} \int_S \frac{\sigma(p) \cdot \cos\beta}{R(p, p_0)} dS_p &= \mp\Psi(p_0), \quad (8) \\ p_0 \in S_{j+}, S_{j-}. \end{aligned}$$

Здесь β — угол между радиус-вектором \vec{R} и внешней нормалью n в точке p_0 :

$$F(p_0) = \begin{cases} \pm J(p_0), & p_0 \in S_{c+}, S_{c-}; \\ 0, & p_0 \notin S_{c-}, S_{c+}, S_{j-}, S_{j+}; \end{cases}$$

$\Psi(p_0) = \rho_e \cdot I \cdot \delta(p)$; ρ_e — удельное сопротивление дуги.

Напряженность электрического поля находится по формуле:

для области вне проводников

$$\bar{E} = \frac{1}{2\pi} \left(\int_S \frac{\sigma \vec{R}}{R^2} dS - \frac{q_i \vec{R}}{R} \right);$$

внутри проводников

$$\bar{E} = \frac{\gamma_i}{2\pi \gamma_e} \left(\int_S \frac{\sigma \vec{R}}{R^2} dS + \frac{q_i \vec{R}}{R} \right).$$

Решение однородного уравнения, соответствующее уравнению (8), можно представить в виде

$$\sigma_g = \sigma_n + \sum_{i=1}^N C_i \sigma_i.$$

Здесь $\{\sigma_i\}_{i=1}^N$ — система линейно-независимых решений однородного уравнения; $\{C_i\}_{i=1}^N$ — набор неизвестных постоянных; σ_n — решение неоднородного уравнения (8); σ_g — общее решение.

Для определения единственного решения

(постоянных $\{C_i\}_{i=1}^N$) необходимо учесть, что

$$U_A = \int_L EdL \quad (9)$$

и требование отсутствия заряда у проводников, к которым не подводится ток,

$$\int_S \sigma(p) dS_p = 0, \quad \text{if } S_{c+}, S_{c-} \notin S_k, \quad k = 1, \dots, N. \quad (10)$$

Здесь U_A — напряжение на дуге; L — линия, соединяющая анодное и катодное пятна дуги.

Кроме того, решение уравнение (8) можно представить в виде:

$$\sigma = U_A \sigma_U + I_A \sigma_I.$$

Таким образом, решение в области, где находится дуга, однозначно определяется заданием напряжения U_A , тока I и удельного сопротивления дуги ρ_a . В работе разработан численный алгоритм решения задачи (8)–(10) и проведены расчеты модельных задач.

Моделирование электрического поля

Для исследования влияния подвода тока на электрическое поле были проведены численные расчеты для модели, изображенной на рис.2, в двух случаях его подвода.

Размеры: толщина шин 2 мм, ширина 10 мм, расстояние между шинами 2 мм. Задавалось, что ток втекает в электроды и вытекает из них в первом случае в точках поверхности F , во втором — в точках поверхностей F и G (рис.3). Причем через поверхность F протекает 60% полного тока, а через G — 40%, когда дуга находится в точке A . Полный ток равен 4000 А, напряжение на дуге 130 В, удельное сопротивление дуги $2 \cdot 10^{-4}$ Ом·м.

На рис.4 изображено распределение нормальной составляющей электрического поля у анода вдоль его поверхности и показано соответствующее распределение силовых линий электрического поля в пространстве для первого и второго случаев подвода тока, соответственно. Из рис.4,а видно, что значение нормаль-

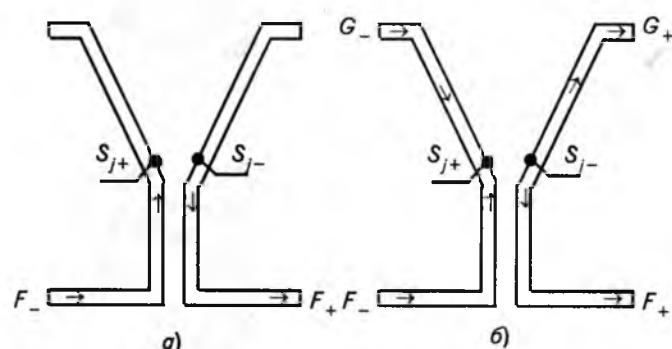


Рис.3. Моделирование электрического поля;
а — "одинарный" подвод тока; б — "двойной" подвод тока

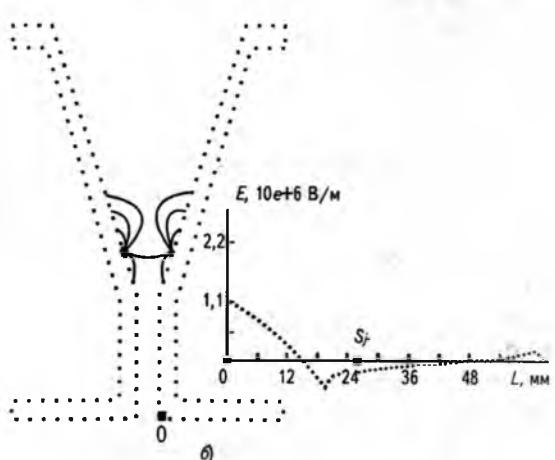
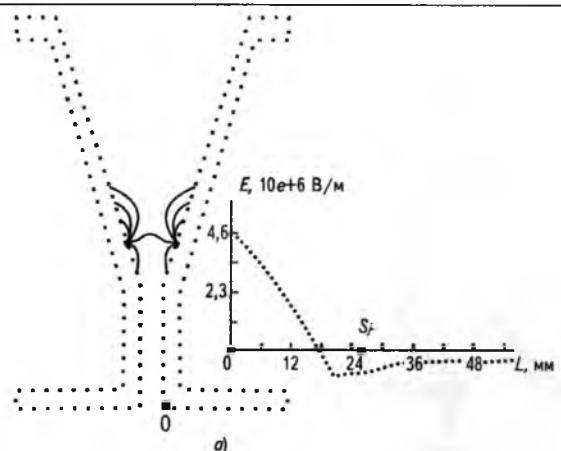


Рис.4. Силовые линии и нормальная составляющая напряженности электрического поля вблизи анода при "одинарном" (а) и "двойном" (б) подводе тока

мальной составляющей напряженности электрического поля в области от точки 0 до S_j^- лежит в пределах $2 \cdot 10^6$ – $4 \cdot 10^6$ В/м, что соответствует пробойным напряженностям воздуха.

Из рис.4,б видно, что при втором случае подвода тока напряженность уменьшилась в два раза по сравнению с первым.

Отметим, что прямые измерения электрического поля с помощью существующих методов невозможны из-за быстрого его изменения. Но, если предположить, что параллельная дуга образуется в результате электрического пробоя межэлектродного промежутка, то вероятность пробоя для второго случая должна значительно уменьшиться. Таким образом, фиксируя вероятность повторного зажигания для первого и второго случаев, можно качественно оценить изменение электрического поля при изменении подвода тока.

Эксперимент

Макет для проведения эксперимента схематически показан на рис.5. Шины были изготовлены из медной ленты толщиной 2 мм и шириной 10 мм. Расстояние d между шинами составляло $d=2$ мм. В точке A можно было соеди-

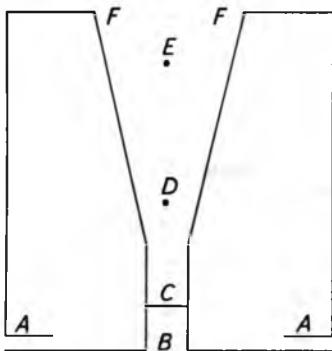


Рис.5. Схематический вид макета для проведения эксперимента

пять края шин, а в точке *B* размещать заглушку из диэлектрического материала. В качестве источника тока были использованы 8 конденсаторов ($C = 1500 \text{ мкФ}$, $U = 350 \text{ В}$), включенные попарно-параллельно. Конденсаторы заряжались до напряжения 580 В. Для ограничения разрядного тока в цепь была включена катушка индуктивности. В итоге импульс тока был длительностью 800 мкс при максимуме тока 4,5 кА. Дуга возбуждалась перезажиганием тонкой проволочки в точке *C*.

Движение дуги фиксировалось при помощи датчиков магнитного поля, установленных в точках *D* и *E* на внешней стороне макета. В их качестве использовались катушки диаметром 3 мм, содержащие 700 витков провода диаметром 0,05 мм. Сигнал с катушек после интегрирующей цепочки измерялся цифровым осциллографом, также измерялись сила тока и напряжения на дуге.

В эксперименте использовались два различных способа подвода тока: “одинарный” подвод — в точке *A* нет соединения; “двойной” подвод — в точке *A* есть соединение шин; и две различных конфигурации макета: без заглушки — в точке *B* нет заглушки; с заглушкой — в точке *B* есть заглушка.

Использовавшаяся в настоящей работе методика регистрации движения электрической дуги была предложена и детально описана в

[2,3]. Суть метода заключается в следующем. Электрический ток, текущий в дуге, вносит вклад в магнитное поле. Поэтому перемещение дуги изменяет магнитное поле, т.е. при измерении поля с помощью катушек форма сигнала с них изменяется. Следовательно, по значению сигнала можно определить расположение дуги.

При проведении эксперимента были получены две характерные формы сигнала (рис.6,*a* и 7,*a*). Причем им соответствовали определенные следы эрозии на шинах на рис.6,*в* и 7,*в* и форма зависимости напряжения от времени на рис.6,*б* и 7,*б*. Считалось, что произошло повторное зажигание, если сигнал с датчиков имел форму, изображенную на рис.6,*a*, и его не было, если сигнал имел форму, изображенную на рис.7,*a*.

Было проведено 4 серии по 20 экспериментов.

1. “Одинарный” подвод тока, без заглушки.

В 13 случаях повторное зажигание. Дуга доходит до точки *D* и гаснет при напряжении 40–60 В. В остальных случаях дуга выходит на расстояния 5–15 мм от точки *F* и гаснет при напряжении 100–120 В.

2. “Одинарный” подвод тока, с заглушки.

В 9 случаях повторное зажигание. Дуга доходит до точки *D* и гаснет при напряжении 40–60 В. В остальных случаях дуга выходит на расстояния 15–20 мм от точки *F* и гаснет при напряжении 120–140 В.

3. “Двойной” подвод тока, без заглушки.

Повторных зажиганий не зарегистрировано. Дуга выходит на расстояния 0–5 мм от точки *F* и гаснет при напряжении 80–100 В.

4. “Двойной” подвод тока, с заглушки.

Зарегистрировано одно повторное зажигание. В остальных случаях дуга выходит на расстояния 0–5 мм от точки *F* и гаснет при напряжении 100 В.

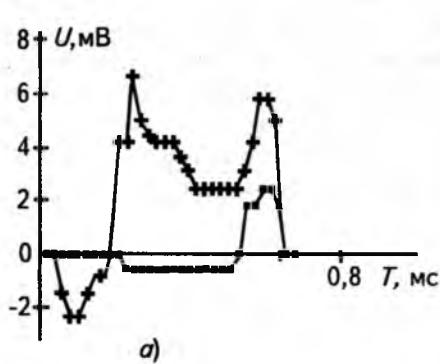


Рис.6. Движение дуги с повторным зажиганием:

a — сигнал с катушек; *б* — график зависимости напряжения от времени; *в* — следы эрозии; + — U_1 ; ■ — U_2

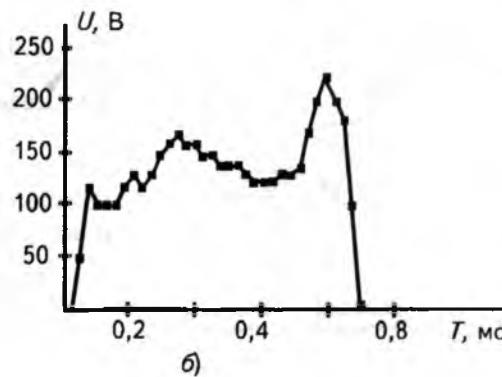




Рис.7. Движение дуги без повторного зажигания:

а — сигнал с катушек; б — график зависимости напряжения от времени; в — следы эрозии

Выводы

1. Предложена новая модель электрической дуги. Ее основой является представление дуговых пятен в виде источников ЭДС.

2. Дуга (точнее напряжение, ток и удельное сопротивлению дуги) определяет не только магнитное поле в камере выключателя, но и электрическое поле, которое является главной причиной вторичного зажигания. Распределение электрического поля зависит от подвода тока к дуге, а следовательно, и вероятности повторного зажигания.

3. Численные расчеты и эксперимент косвенным образом подтвердили сделанные выводы.

Список литературы

1. Haug R., Hahn A.//J. Phys. D: Appl. Phys. 1991. Vol. 24. P. 325—330.
2. Mercier M., Laurent A.//J. Phys. D: Appl. Phys. 1991. Vol. 24. P. 681—684.
3. Mercier M., Cajal D., Laurent A.//J. Phys. D: Appl. Phys. 1996. Vol. 1. P. 95—99.
4. Брон О.Б. Электрическая дуга в аппаратах управления. Л.: Госэнергоиздат, 1954.
5. Таев И.С. Электрические контакты и дугогасительные устройства аппаратов низкого напряжения. М.: Энергия, 1973.
6. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. М.: Высшая школа, 1964.

Методы анализа динамических характеристик магнитоэлектрических линейных приводов

Д.О.ДМИТРИЕВ, П.А.КУРБАТОВ

Магнитоэлектрические приводы (МЭП) с линейным апериодическим или возвратно-поступательным перемещением подвижной части [1], в том числе вибрационные приводы, последнее время стали успешно конкурировать с электромагнитными линейными приводами и вращающимися электрическими машинами с кривошипно-шатунными механизмами. Это стало возможным благодаря появлению новых энергоемких высококоэрцитивных материалов для постоянных магнитов. В то же время быстрое и широкое распространение и внедрение магнитоэлектрических приводов промышленности, особенно в прецизионных устройствах, сдерживается из-за недостаточно разработанной методической базы для проектирования в части математического моделирования динамиче-

ских процессов. Особенности конструкций МЭП таковы, что применение для анализа простых методов макромоделирования магнитных цепей в условиях протяженных немагнитных рабочих зазоров и значительных магнитных потоков рассеяния не позволяет получить необходимую точность. Поэтому внимание исследователей обращено на использование аппарата микромоделирования электромагнитных полей [2].

В предлагаемых авторами методах анализа динамических процессов электромеханической системы МЭП макромодели используются только для электрической и механической подсистем, а электромагнитная подсистема представляется более точной микромоделью с пространственно-временными распределенными параметрами на основе результатов численного ана-

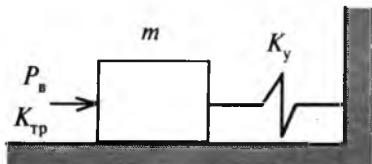


Рис.1. Кинематическая схема вибрационного механизма

лиза электромагнитного поля. Рассмотрим на конкретном примере разработанные модели, различающиеся исходными допущениями, определяющими точность расчетов.

На рис.1 изображена кинематическая схема простейшего типового механизма с линейным вибрационным приводом. Схема содержит массу m подвижного узла устройства, состоящего из массы подвижной части привода и присоединенной массы подвижной части рабочего органа, пружину с жесткостью K_y и опору скольжения с коэффициентом вязкого трения K_{tp} . Обычно устройство работает на частоте механического резонанса, т.е. жесткость пружины задается условием $K_y = \omega^2 m$, где $\omega = 2\pi f$ — угловая частота колебаний. Знакопеременное вынуждающее усилие P_B действует непосредственно на массу подвижной части в направлении перемещения.

Эскиз возможного варианта магнитной системы применяемого в такого рода устройствах магнитоэлектрического привода изображен на рис.2. Подвижная часть представляет собой кольцо магнитопровода из магнитомягкого материала, на котором с внутренней стороны закреплены кольцевые постоянные магниты с чередующейся радиальной намагниченностью. Внутри подвижной части установлен неподвижный электромагнит с кольцевым сердечником П-образного сечения из магнитомягкого материала, в пазу которого размещена также кольцевая катушка, подключаемая к источнику переменного напряжения.

В сердечнике электромагнита и в подвижной части возбуждается переменный магнитный поток от тока в катушке и от постоянных магнитов. Этот поток индуцирует противо-ЭДС в катушке. На постоянные магниты, помещенные

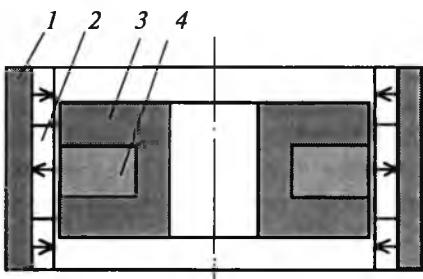


Рис.2. Магнитная система магнитоэлектрического привода:

1 — магнитопровод подвижной части; 2 — постоянные магниты; 3 — сердечник электромагнита; 4 — кольцевая катушка

в переменное магнитное поле, действует знакопеременная сила P_B в осевом направлении, которая вызывает возвратно-поступательное движение рабочего органа устройства. Функции ЭДС и силовых взаимодействий от фазовых переменных электрической и механической подсистем в настоящей работе предлагается определять с помощью численного анализа электромагнитного поля и затем использовать их в макромоделях. Форма представления указанных функций зависит от принимаемых упрощающих допущений.

Предположим, с допустимой погрешностью выполняются следующие условия:

- постоянна относительная магнитная проницаемость сердечника и магнитопровода;
- неизменна намагниченность постоянных магнитов;
- отсутствуют вихревые токи в проводящих элементах конструкции и магнитный гистерезис.

Принятые допущения позволяют использовать принцип наложения для определения параметров моделей. Потокосцепление в катушке электромагнита представим в виде двух составляющих: $\Psi_k = \Psi_i(x, i) + \Psi_{n.m}(x)$, где $\Psi_i(x, i)$ — создается током в катушке и линейно зависит от значения тока для каждого положения x подвижной части привода; $\Psi_{n.m}(x)$ — создается постоянными магнитами и не зависит от значения тока в катушке, а определяется только положением подвижной части. Особенности конструкции рассматриваемого МЭП таковы, что в рабочем диапазоне перемещений $\Psi_i(x, i)$ слабо зависит от x , т.е. $\Psi_i(x, i) = \Psi_i(i)$. В этих условиях результирующую противо-ЭДС удобно представить в виде суммы напряжения на эквивалентной индуктивности и ЭДС пропорциональной скорости движения подвижной части в соответствии со следующим преобразованием:

$$\begin{aligned} e(t) &= -d\Psi_k/dt = -d\Psi_i(i)/dt - d\Psi_{n.m}(x)/dt = \\ &= -(d\Psi_i(i)/di)di/dt - (d\Psi_{n.m}(x)/dx)dx/dt = \\ &= -Ldi/dt - C_e(x)v, \end{aligned}$$

где $L = d\Psi_i(i)/di = \Psi_i(i)/i$ — эквивалентная индуктивность катушки; $C_e(x) = d\Psi_{n.m}(x)/dx$ — коэффициент по ЭДС; $v = dx/dt$ — скорость движения постоянных магнитов.

Результирующая сила взаимодействия электромагнита и подвижной части также раскладывается на две составляющие: $P = P_{n.m}(x) + P(x, i)$, где $P_{n.m}(x)$ — сила взаимодействия постоянных магнитов на подвижной части с сердечником электромагнита при отсутствии тока в катушке; $P(x, i)$ — сила взаимодействия постоянных магнитов с магнитным полем электромагнита, определенным при отсутствии постоянных магнитов. Как первая, так и вторая составляющие результирующей силы зависят от

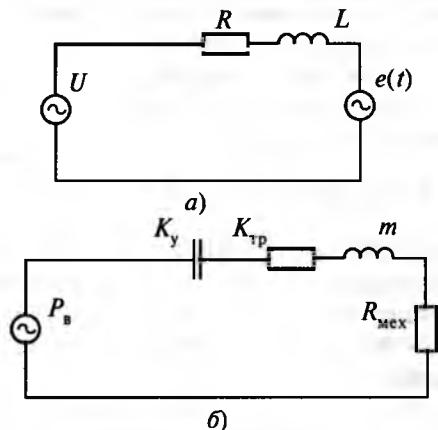


Рис.3. Эквивалентные схемы электрической (а) и механической (б) подсистем магнитоэлектрического привода

положения подвижной части. От значения тока в катушке, причем при принятых допущениях для МЭП линейно, зависит только вторая составляющая силы. Поэтому можно записать выражение для силы в виде: $P = P_{\text{п.м.}}(x) + C_f(x)i$.

Указанные представления сил и ЭДС удобны, так как позволяют предварительно на основе численного анализа стационарного магнитного поля рассчитывать L и аппроксимации для функций для $C_e(x)$, $C_f(x)$, $P_{\text{п.м.}}(x)$ и при последующем решении уравнений макромоделей электрической и механической подсистем не обращаться более к анализу магнитной системы. Эквивалентная схема электрической подсистемы, изображенная на рис.3, а, содержит последовательно соединенные источник синусоидального напряжения $U = U_m \sin(\omega t)$, активное сопротивление провода катушек R , индуктивность электромагнита L и возникающую при движении постоянного магнита противо-ЭДС $e_{\text{п.м.}}(t) = C_e(x)v$.

Приведенная на рис.3, б эквивалентная схема механической подсистемы построена на основе обращенной модели, где в качестве фазовой переменной типа потока выбрана линейная скорость v , а переменной типа потенциала — сила. На подвижную часть действуют сила взаимодействия с электромагнитом $P = P_{\text{п.м.}}(x) + C_f(x)i$, инерционная сила на индуктивном элементе m , сила трения в опорах на резистивном элементе K_{tp} и упругая сила пружины на конденсаторе K_y . Механическая нагрузка представлена сопротивлением $R_{\text{мех}}$. Согласно условию равновесия все элементы схемы включены последовательно. Уравнения математической макромодели, составленные по приведенным эквивалентным схемам, имеют вид:

$$\begin{aligned} di/dt &= (U_m \sin(\omega t) - Ri - C_e(x)v)/L; \\ dv/dt &= (P_{\text{п.м.}}(x) + C_f(x)i - K_{\text{tp}}v_I - P_y)/m; \\ dP_y/dt &= K_y v_{12}; \\ dx/dt &= v_{12}. \end{aligned}$$

Проектирование конкурентоспособных МЭП требует обоснованной экономии магнитных материалов, а также применения для постоянных магнитов и магнитопроводов возможно более дешевых сплавов. Сердечники электромагнитов и особенно магнитопроводы подвижной части следует рассчитывать на нормальное состояние, близкое к магнитному насыщению, а постоянные магниты должны работать вблизи максимума энергии. Такие магнитные системы отличаются резкой нелинейностью магнитных свойств, и использование указанных допущений приводит к значительным погрешностям моделирования.

Существенного уточнения модели электромеханической системы МЭП можно добиться, если отказаться от допущений о постоянстве намагниченности постоянных магнитов, постоянной относительной магнитной проницаемости магнитомягких материалов и отсутствии магнитного гистерезиса, а оставить только допущение об отсутствии вихревых токов. В этом случае взаимосвязь электрической и механической подсистем может быть определена через зависимые источники фазовых переменных: результирующую противо-ЭДС и результирующую силу. Однако источники представляют собой функции трех переменных: тока, перемещения и скорости. Поиск явных выражений аппроксимирующих функций становится нецелесообразным из-за значительных вычислительных затрат и более приемлем алгоритм пошагового во времени анализа динамики работ электромеханической системы МЭП с расчетом на каждом шаге текущих значений противо-ЭДС и силы взаимодействия с помощью численного анализа стационарного магнитного поля. Представим $e(t)$ в виде суммы двух составляющих в соответствии с разложением:

$$e(t) = -d\Psi_k/dt = -(\partial\Psi_k(x,i)/\partial i)\partial i/\partial t - (\partial\Psi_k(x,i)/\partial x)\partial x/\partial t = -L(x,i)\partial i/\partial t - C_e(x,i)v,$$

где $L(x,i)$ и $C_e(x,i)$ — частные производные результирующего потокосцепления по току и перемещению.

Система уравнений математической модели электромеханической системы принимает вид:

$$\begin{aligned} di/dt &= (U_m \sin(\omega t) - Ri - C_e(x,i)v)/L(x,i); \\ dv/dt &= (P(x,i) - K_{\text{tp}}v_I - P_y)/m; \\ dP_y/dt &= K_y v_{12}; \\ dx/dt &= v_{12}. \end{aligned}$$

Несмотря на ее сходство с рассмотренными ранее уравнениями, алгоритм решения включает определение на каждом шаге по времени текущих значений параметров $C_e(x,i)$, $L(x,i)$ и суммарной силы $P(x,i)$ на основе численного анализа стационарного магнитного поля. При

конкретных значениях тока и перемещения для вычислений двух производных потокосцепления требуется минимально выполнить три расчета магнитного поля. Возможна другая форма записи уравнения электрической цепи. После выполнения почлененного интегрирования в интервале времени $\Delta t = t_k - t_{k-1}$, где k — номер шага численного решения дифференциальных уравнений, получаем выражение для потокосцепления в виде:

$$\Psi_k = \Psi_{k-1} - R \int_{\Delta t} idt - \int_{\Delta t} U_m \sin(\omega t) dt.$$

После замены интеграла от тока конечной суммой в соответствии с выбранной квадратурной формулой последнее уравнение выразит линейную связь между потокосцеплением и током на k -м шаге расчета. С другой стороны, при заданном токе и положении подвижной части потокосцепление может быть определено расчетом магнитного поля. Таким образом, для нахождения искомых потокосцепления и тока необходимо минимизировать функцию невязки между зависимостями потокосцепления от тока из уравнения цепи и из полевого расчета. Обычно эти задача успешно решается по двум пробным расчетам магнитного поля при отличающихся токах вблизи ожидаемого значения. Поэтому последний вычислительный алгоритм может оказаться более экономичным, чем алгоритм решения с использованием дифференциального уравнения для тока.

Для расчетов стационарного магнитного поля применена математическая модель, базирующаяся на пространственных интегральных уравнениях для распределений векторов намагнченности в ферромагнитных деталях [3]. Модель составляют выражения для векторов напряженности в областях с неизвестной намагнченностью. В магнитной системе, содержащей катушки с током объемом V_n и намагниченные детали объемом V_m с площадью поверхностей S_m ,

$$H = \frac{1}{4\pi} \left[\int \frac{\mathbf{J} \cdot \mathbf{r}}{V_n r^3} dV + \int \frac{\nabla \cdot \mathbf{M} \cdot \mathbf{r}}{V_m r^3} dV - \int \frac{(\mathbf{n} \cdot \mathbf{M}) \cdot \mathbf{r}}{S_m r^3} dS \right],$$

где H , M — векторы напряженности и намагнченности; J — вектор плотности тока в катушках; r — радиус-вектор, соединяющий точки наблюдения и интегрирования; n — единичная нормаль к поверхности интегрирования.

Замкнутая система уравнений получается при доопределении этих линейных для намагнченности интегральных выражений заданными магнитными характеристиками используемых материалов $M = f(H)$.

Численное решение составленной нелинейной системы уравнений производится сведением интегральных операторов к алгебраическим

путем пространственной аппроксимации искомого распределения намагнченности.

Для расчета силы взаимодействия электромагнита с подвижной частью МЭП применяется формула Максвелла:

$$P = \mu_0 \int_S [(n \cdot H) H - 0,5 n H^2] dS,$$

где интегрирование производится по замкнутой поверхности S , ограничивающей взаимодействующие группы деталей магнитной системы; n — единичная нормаль к поверхности интегрирования.

При применении в МЭП металлических электропроводящих постоянных магнитов, например, из сплавов КС-37 или NdFeB и нешихтованных металлических магнитопроводов из-за сильного влияния вихревых токов модель, основанная на анализе стационарного магнитного поля, может привести к значительным погрешностям. Поэтому требуется полный расчет нестационарного электромагнитного поля с учетом движения. Макромодели электрической и механической подсистем сохраняются прежними.

Источниками переменного электромагнитного поля будут помимо сторонних токов в катушке электромагнита и намагнченности ферромагнитных деталей также наведенные вихревые токи в объеме проводящих деталей конструкции и поверхностные электрические заряды [3]. Из выражения для вектора напряженности электрического поля

$$E = -\partial A / \partial t - \nabla \Phi_e,$$

в которое входят полная производная по времени векторного магнитного потенциала A и градиент скалярного электрического потенциала Φ_e , следует уравнение для плотности вихревого тока:

$$J = \gamma E = -\gamma \partial A / \partial t - \gamma \nabla \Phi_e,$$

где

$$A = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[\int \frac{\mathbf{J}}{V_n r} dV + \int \frac{\nabla \cdot \mathbf{M}}{V_m r} dV - \int \frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{M}}{S_m r} dS \right],$$

$$\Phi_e = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_S \frac{\sigma}{r} dS;$$

σ — плотность поверхностных электрических зарядов.

Уравнение для плотности σ следует из граничного условия $nE = 0$ о равенстве нулю нормальной компоненты напряженности электрического поля внутри у поверхности проводника:

$$n \cdot E = -n(\partial A / \partial t + \nabla \Phi_e).$$

Распределение векторов намагнченности в деталях из ферромагнитных материалов рассчитывается как и в стационарном поле, но под J

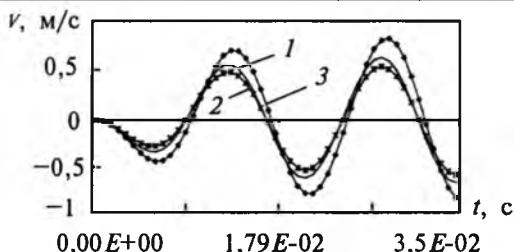


Рис.4. Временная зависимость колебательной скорости поршня:

1 — без учета вихревых токов; 2 — с учетом вихревых токов; 3 — по линейной модели

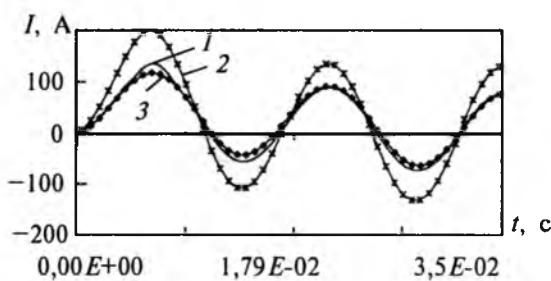


Рис.5. Временная зависимость тока в катушке МЭП:

1 — без учета вихревых токов; 2 — с учетом вихревых токов; 3 — по линейной модели

понимают плотность как стороннего, так и вихревого тока. Для численного решения системы интегральных уравнений применяется пространственная аппроксимация источников поля.

Характерные данные практического использования предлагаемых методов моделирования приведены на рис.4,5 для МЭП рис.1, работа-

ющего в составе гидроакустического поршневого излучателя с активной механической нагрузкой $R_{\text{мех}} = 1200 \text{ Н}\cdot\text{с}/\text{м}$. Сопоставлены временные зависимости колебательной скорости поршня и тока электромагнита, рассчитанные по описанным моделям.

Модель, не учитывающая нелинейные свойства магнитных материалов и возникающие вихревые токи, дает минимальное значение потребляемого тока и максимальную колебательную скорость. В модели без вихревых токов, но с учетом реальных магнитных свойств электротехнической стали и постоянных магнитов из сплава NdFeB получаем, по сравнению с первым вариантом, большее на 10% значение тока и меньшее на 25% значение скорости. В наиболее точной модели с нелинейными свойствами магнитных материалов и вихревыми токами в постоянных магнитах отличие от первого варианта достигает 50% по току и 40% по скорости.

Полученные результаты свидетельствуют о значительных погрешностях в определении основных характеристик МЭП в упрощенных моделях, которые могут достигать 200% полезной механической мощности.

Список литературы

1. Магнитоэлектрические вибрационные приводы. Применение и проектирование/Д.О.Дмитриев, П.А.Курбатов, С.Б.Рябинин и др.///Электротехника. 1995. № 6. С.28—31.
2. Васковский Ю.Н., Дынник Л.П. Математическое моделирование двусторонних магнитоэлектрических преобразователей//Техническая электродинамика. 1995. № 3. С.29—32.
3. Курбатов П.А., Ариичин С.А. Численный расчет электромагнитных полей. М.: Энергоатомиздат, 1994.

Расчет параметров коммутационной способности электромеханических аппаратов автоматики

А.Г.НИКИТЕНКО, доктор техн.наук, проф., С.А.НЕКРАСОВ, канд.техн.наук., доц.

Новочеркасский ГТУ

Предложена математическая модель для расчета перенапряжения и времени горения дуги при отключении активно-индуктивных цепей постоянного тока контактным аппаратом (электромеханическим реле). Приведены некоторые результаты расчета, адекватно отражающие физику процессов, происходящих в электрической дуге отключения.

В статье излагаются результаты разработки математической модели и соответствующей инженерной методики для расчета параметров дугогашения аппаратов автоматики (электрических реле), коммутирующих активно-индуктивные цепи постоянного тока.

Методика предназначена для расчета комму-

тационных процессов при значениях отключаемых токов 1—20 А и напряжений 50—200 В.

Полная система уравнений, описывающая процессы в положительном стволе дуги, при электродных областях и внутри электродов, может быть сформулирована на основе результатов [1—4].

Для расчетной оценки параметров дуговой эрозии и характеристик износстойкости контактных материалов необходимо моделирование катодных процессов.

Возможно также определение расчетным путем значения катодного падения напряжения в дуге, которое необходимо учитывать в случае дуг на контактах реле, что достигнуто в [1,2].

Расчет параметров дуговой эрозии и катодного падения напряжения в дуге

Математическая модель в катодных пятнах дуги формулируется в виде системы уравнений, описывающих тепло-, массо- и электроперенос внутри и на поверхности электродов, а также в микроскопически малом по размерам катодном слое дугового разряда [1,2]. При формулировке соответствующей системы уравнений в [1] учитывалось, что вблизи катода газ состоит из:

1) нейтральных частиц, поступающих с поверхности катода в результате испарения, отражения конденсирующихся атомов, а также выбиваемых ионами вследствие катодного распыления;

из плазмы положительного ствола дуги; с поверхности анода (только для случая краткой дуги);

2) ионов, полученных в результате ионизации нейтральных частиц одного из перечисленных сортов; поступающих из плазмы дуги и вследствие ионной десорбции с поверхности катода;

3) электронов, эмитированных с поверхности катода (двух типов — классических и туннельных); поступающих из положительного ствола дуги; полученных в результате ионизации нейтральных частиц в зоне катодного падения напряжения.

Как установлено [1,2], определяющее влияние на катодные процессы оказывают: ионизация электронным ударом, включая ступенчатую ионизацию; переход нейтральных частиц на метастабильные энергетические уровни в результате актов возбуждения (в основном для щелочных металлов и ртути); резонансная перезарядка ионов с родственными нейтральными частицами.

Эффектами меньшего порядка значимости являются: акты дипольной поляризации; кулоновские взаимодействия; рекомбинация и тормозное излучение; газокинетические взаимодействия; флуктуации полей в силу дискретности заряда; различные химические реакции.

Система уравнений катодного слоя имеет вид [1]:

$$\frac{\partial f_j}{\partial t} + \bar{v} \frac{\partial f_j}{\partial \bar{r}} + \frac{\bar{F}_j}{m_j} \frac{\partial f_j}{\partial \bar{v}} = L_j[f_j]; \quad (1)$$

$$\Delta \Psi_e + \frac{2m_e}{h^2} (\epsilon + e\varphi_e - \epsilon_F + U(\bar{r})) \Psi_e = 0; \quad (2)$$

$$\Delta\varphi = -\frac{e}{\epsilon_0} (n_i - n_e); \quad \bar{r} \in R_+^3 = \{\bar{r} \in R^3 : x_3 > 0\}. \quad (3)$$

При соответствующих начальных и краевых условиях [1] ток, приходящийся на катодное пятно, определяется по формуле

$$I = \int_S (\delta_e + \delta_i) dS; \quad S = \{\bar{r} \in R^3 : x_3 = +0\}; \quad (4)$$

$$x_1^2 + x_2 \geq 0; \quad t > 0.$$

В (1)–(4) f_j — функция распределения по скоростям; L_j — интеграл столкновений; m_j — масса частиц j -го сорта; \bar{F}_j — действующая на частицы сила; \bar{v} — вектор скорости частиц, $\bar{v} = (v_1, v_2, v_3)$; \bar{r} — радиус-вектор точки с декартовыми координатами (x_1, x_2, x_3) ; φ — электрический потенциал; $\bar{E} = (E_1, E_2, E_3)$ — вектор напряженности электрического поля; $E_j = -d\varphi/dx_j$, $j = 1, 2, 3$; n_e — концентрация электронов; n_i — суммарная концентрация ионов; Ψ_e — скалярная функция стационарных состояний электрона с кинетической энергией ϵ ; $U(\bar{r})$ — функция потенциального барьера вблизи катода для эмиссионного электрона; m_e — масса электрона; ϵ_0 — диэлектрическая постоянная вакуума; ϵ_F — уровень Ферми электронного газа в катоде; h — постоянная Планка; φ_e — работа электрона из катода.

Плотность электронного тока на поверхности катода определяется из уравнения термоавтоэлектронной эмиссии при помощи квадратурной формулы [1]. Удельная эрозия в парообразной форме рассчитывалась по формуле:

$$\gamma_k = \frac{m_k}{\rho_k (\delta_e + \delta_i)} \int_{R^3} v^3 f_k(\bar{v}, \bar{r}, t) \Big|_{\varphi=\varphi_k} d\bar{v},$$

где f_k — функция распределения атомов материала катода; m_k — масса атома; ρ — массовая плотность материала катода.

Плотность теплового потока на поверхности пятна определяется интегрированием по спектру скоростей соответствующих функций распределения.

Система (1)–(4) решалась численными методами. В результате расчетов получены функции распределения электрических потенциала и вектора напряженности, приведенные на рис.1 и 2, а также значения параметров эмиссионного центра на медном катоде: $U_k \approx 15$ В; $T_k \approx 4500$ К; $E_3|_{x_3=0} \approx 5 \cdot 10^9$ В/м; $\delta_e \approx 1,2 \cdot 10^{12}$ А/м²; $\delta_i \approx 8 \cdot 10^9$ А/м²; $\gamma_k \approx 0,85 \cdot 10^{-12}$ м³/Кл; доля туннельного тока примерно 0,40; ток, приходящийся на одно пятно, около 0,5 А; плотности нейтральных частиц примерно $4 \cdot 10^{26}$ м⁻³, ионов 10^{25} м⁻³, электронов 10^{24} м⁻³; средняя переносная скорость нейтральных частиц на поверхности пятна 950 м/с, на выходе из катодного слоя 1200 м/с, для ионов соответственно — 3500 м/с и 950 м/с; 70% атомов материала катода воз-

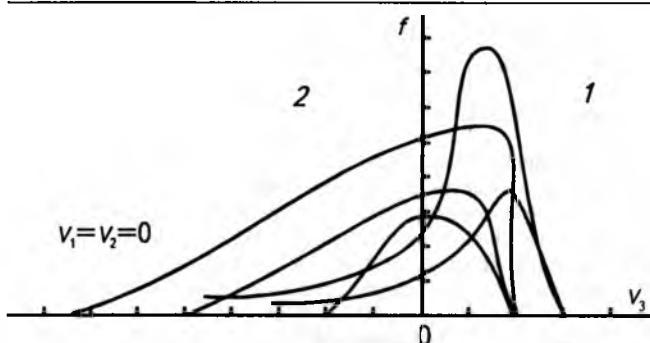


Рис.1. Функции распределения нейтральных частиц (1) и ионов (2) (при удалении от катода максимумы убывают)

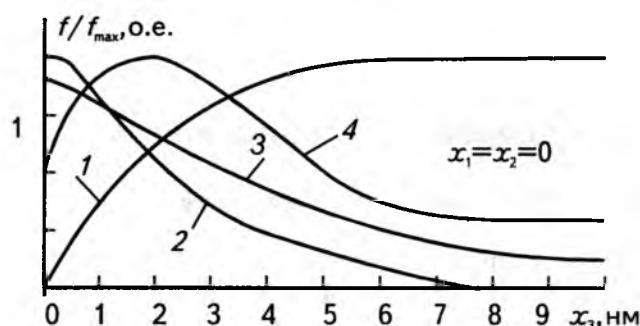


Рис.2. Зависимости потенциала (1), напряженности (2), концентраций нейтральных частиц (3) и ионов (4) от расстояний до катода

вращаются на катод, 30% определяют эрозию в парообразной форме; вклад катодного распыления составляет менее 10%, давление на поверхности пятна $5 \cdot 10^7$ Па; протяженность катодного слоя 10^{-8} м; в актах ионизации в основном выбиваются S -электроны внешней оболочки (80–90%), а в 10–20% случаев — d -электроны внутренней оболочки. Доля многозарядных ионов пренебрежимо мала. Падение напряжения в катоде примерно 4,5 В.

Результаты моделирования подтвердили известный факт [2] неустойчивости пятна в силу температурного и гидродинамического факторов. Удовлетворительное совпадение с экспериментальными оценками катодного напряжения, удельной эрозии, порогового тока, плотности частиц, скорости струи паров и другими параметрами.

Моделирование показало, что плотность теплового потока на катоде немонотонным образом зависит от температуры, при определенных значениях которой она обращается в нуль.

Можно предположить, что соответствующие относительно устойчивые температурные режимы определяют три основных экспериментально наблюдаемых типа катодных пятен [1,2].

На всем протяжении катодного слоя происходят интенсивные процессы столкновения, прежде всего, резонансная перезарядка и ионизация.

Модель может служить основой для соответствующих инженерных методик прогнозирования

ния электроэрзационных параметров контактных накладок и электродов.

Расчет ВАХ дуги и времени дугогашения

Дугогашение в аппаратах данного типа осуществляется механическим растяжением открытой дуги атмосферного давления.

Из-за относительно небольших интервалов коммутирующих токов и напряжений, скоростей расхождения контактов (порядка 1 м/с) расчеты могут осуществляться на основе статической ВАХ открытой дуги $U(i, S)$, которая легко табулируется по известным экспериментальным данным [3,4].

Расчет ампер-секундной характеристики и времени горения дуги определяется интегрированием задачи Коши для уравнения коммутируемой цепи

$$L \frac{di}{dt} + Ri + pU(i, S) = U_c; \quad t > 0; \quad (8)$$

$$I_0 = i(0) = U_c / R, \quad (9)$$

где L — индуктивность; R — активное сопротивление; U_c — коммутируемое напряжение; p — конструктивный параметр (для рычажного исполнения реле $p = 1$, в случае мостикового контакта $p = 2$).

Сопоставление расчетных и экспериментальных данных показывает удовлетворительное совпадение (табл.1, 2).

Таблица 1

Контактный материал	U_c , В	I_0 , А	Максимальная длина дуги, мм	
			Эксперимент [3]	Расчет
Au	61	10,5	1,6	1,6
Au	60	2	0,37	0,40
Ag	56	4,9	1,0	1,0
Ag	28	9	0,18	0,22
W	220	1,4	0,12	0,08
W	58	4	0,34	0,40
Fe	110	0,94	0,35	0,32
Fe	48,5	1,8	0,32	0,25

В табл.1 содержатся данные по максимальной длине дуги отключения при коммутации активных цепей рычажными реле.

Результаты расчетов времени горения дуги при коммутации сильноиндуктивных цепей управления электровозов контактными реле мостикового исполнения приведены в табл.2.

Таблица 2

I_0 , А	0,93	1,07	0,87	1,08	2,10	3,40	2,24	3,40	1,2	5
T , мс	64	64	47	64	66	23	56	19	90	50
t_d , мс										
эксперимент	16	18	14	18	28	10	24	10	27	30
расчет	16	18	13	18	27	13	25	12	24	30

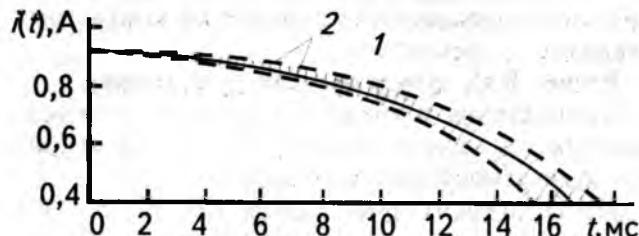


Рис.3. Расчетная (1) и экспериментальные (2) ампер-секундные характеристики дуги

На рис.3 приведена расчетная ампер-секундная характеристика дуги отключения при коммутации LR -цепи. Область разброса эксперимен-

тальных данных осциллографирования тока дуги на рис.3 заштрихована.

Список литературы

- Некрасов С.Н. Математическое моделирование процессов тепло-, массо- и электропереноса в электроразрядной и коммутационной аппаратуре. Автореф. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. Новочеркасск, 1992.
- Козлов Н.П., Хвесюк В.И.//ЖТФ. Т.ХI, вып.10. С.213.
- Автоматизация расчетов параметров дуговой эрозии и ресурса контактов реле//Ю.А.Базвалов, Л.С.Лобанова, С.А.Некрасов, З.В.Шабанова//Изв.вузов. Электромеханика. 1986. № 5. С.39—50.
- Основы теории электрических аппаратов//И.С.Таев и др. М.: Высшая школа, 1987.

Герконы. Взгляд на перспективы развития направления

Р.М.МАЙЗЕЛЬС, доктор электротехники, В.Н.ШОФФА , доктор техн.наук., проф.

Магнитоуправляемые герметизированные контакты (герконы) по совокупности присущих им технических характеристик к настоящему времени остаются одними из перспективных элементов коммутационной техники. Во многих случаях, особенно при коммутации "сухих" и маломощных цепей (ток до 10^{-9} А, напряжение до 10^{-6} В), им практически нет альтернативы. Существенным достоинством герконов является:

- полностью герметизированный металлический контакт; герконы могут работать в условиях повышенной влажности и запыленности, в среде активных жидкостей и газов, при изменении температур от -60 до $+150^{\circ}\text{C}$; они практически невосприимчивы к воздействию радиации;

- полная гальваническая развязка цепей нагрузок и управления;

- малая мощность управления (50 — 200 мВт), низкое электрическое сопротивление ($0,05$ — $0,150$ мА), высокое сопротивление изоляции (10^{10} — 10^{12} Ом), быстродействие ($0,5$ — $1,5$ мс);

- большой срок службы при высокой надежности (10^6 — 10^8 переключения циклов);

- высокая механическая устойчивость (удары до 500g , вибрации в диапазоне частот до 3000 Гц при 15 — 20g);

- доступность и удобство в эксплуатации.

В табл.1 представлены основные характеристики герконов (рис.1), выпускаемых Рязанским заводом металлокерамических приборов (РЗМКП) — единственным в бывшем СССР и крупнейшим в Европе производителем герконов.

Достоинства и простота конструкции герконов, способность управляться внешним магнитным полем (созданным электрическим током или постоянным магнитом) позволяют приме-

нять их в качестве контактных пар всевозможных реле, концевых выключателей, тумблеров, кнопок клавиатуры, датчиков положения, скорости и ускорения, индикаторов перемещения и распределения сигналов, преобразователей неэлектрических величин в электрические аналоги, элементов высокочастотных и измерительных систем спецтехники и т.п.

Общая нестабильность в стране, разрыв экономических связей с бывшими республиками, необоснованные темпы конверсии не позволяют объективно оценить реальные объемы рынка герконов, однако по опыту развитых стран, на основе анализа свежей информации, можно говорить о тысячах изделий с использованием герконов в промышленности, во всех видах транспорта, в бытовой и специальной технике. Поэтому нынешний (довольно резкий) спад производства на РЗМКП ни в коей мере нельзя связывать с якобы принятой ранее ошибочной тенденцией развития рынка герконов в стране. Практически только в промышленности средств связи падение в потребности в герконах (для матричных полей АТС и сервисных реле) объясняется переходом на более современные (но дорогие) интегрально-цифровые системы. Но потеря этого рынка может с успехом компенсироваться развитием выпуска стандартных изделий на герконах, в том числе гибридных, с использованием полупроводниковых элементов. Например, в современных автомобилях таких фирм, как "Хондо", "Мерседес", "Тойота" и др., используются от 10 до 40 различных датчиков на герконах, в то время как у нас впервые (по 3—4 элемента) герконы применены в новых автомобилях: ВАЗ-2110—ВАЗ-2119.

Не отрицая в целом развития релейного направления использования герконов (особенно

Таблица 1

Геркон (рис. 1)	МКА-52141	МКА-50201	МКА-КЭМ-1	КЭМ-6	МКА-36701	МКА-27101	МКА-16101	МКА-27103	МКА-20102	МУК-1A1	МУК-15102	МКС-15103	МК-14101	МКА-10501	МКА-10104	МКА-10105
Габаритные размеры																
А — общая длина, мм																
В — максимальная длина стекла, мм	80	80	64	61	46	44,7	67	41,5	41,5	45,6	53	54,1	44,8	40,6	49,2	49,2
С — максимальный диаметр стекла, мм	53,5	50	50	37	36	28	16,5	28	21,5	21,5	20	18	15,5	14,2	11	10,45
D — диаметр вывода, мм	5,7-12	5,6	5,6	4,2	5,5	3,8	2,54	5,3	2,54	3,2	3,1	4,05	3,0	2,3	2,3	2,0
G — конструкция	1,3	1,3	1,3	0,8	1,2	0,6	0,55	1,0	0,6	0,6	0,6	0,8	0,5	0,47	0,47	0,47
Симметричная																
Симметрическая																
Симметричная																

Электрические характеристики	Максимальная коммутуемая мощность, В	Максимальный коммутируемый ток, А	Максимальное коммутируемое напряжение, В	Переходное сопротивление*, не более, Ом	Пробойное напряжение, не менее, В	Сопротивление изоляции**, не менее, Ом	Магнитные характеристики	МДС срабатывания, АW***	Коэффициент возврата	Максимальное время срабатывания, мс	Максимальное время отпускания, мс	Максимальная рабочая частота, Гц	*	**	***
50	120	30	20	20	10	30	50	15	1,0	7,5	30	3	10	5	10
3	3	2	1	0,35	0,5	0,5	1,0	1,5	0,5	0,25	1,0	0,25	0,5	0,5	0,5
5000	250	300	250	100	250	100	200	200	160	180	80	125	100	80	100
0,1	0,1	0,1	0,15	0,15	0,1	0,25	0,15	0,15	0,1	0,15	0,15	0,15	0,1	0,1	0,1
7500	500	700	500	700	500	200	350	300	180	250	210	100	150	150	150
10 ¹²	10 ⁹	10 ⁹	10 ⁹	10 ⁹	10 ⁹	10 ⁹	10 ⁹	10 ⁹	10 ⁹	10 ⁹	10 ⁹	10 ⁹	10 ¹⁰	10 ⁹	10 ⁹

* Измеряется в режиме б В — 10 мА, величина ориентировочная.

** Измеряется под напряжением 100 В постоянного тока.

*** Измеряется в электромагнитной катушке (5000 витков), герконы делются на группы чувствительности в указанном диапазоне.

МКА-52141	МКА-50201	КЭМ-1	КЭМ-6	МКА-36701	МКА-27101	МКА-16101	МКА-27103	МКА-20102	МУК-1A1	КЭМ-2	МК-17	КЭМ-3	МКС-15102	МК-14101	МКА-10501	МКА-10104	МКА-10105

Рис.1.

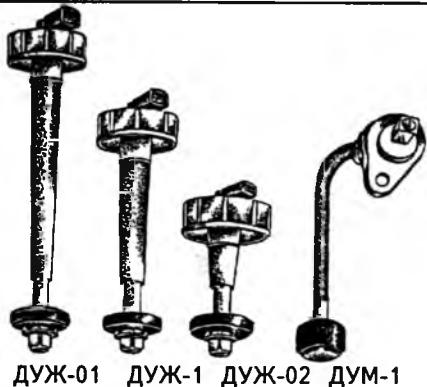
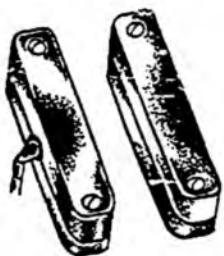


Рис.2.



специальных с применением поляризованных магнитных систем), разработки новых герконов для этих целей, следует отметить, что к настоящему времени наиболее перспективным представляется применение герконов в качестве датчиков в паре с постоянным магнитом. Тем более, что в последнее время наметилась тенденция к снижению цен на качественные магниты.

На рис.2 представлена серия герконовых датчиков, применяемых в автомобилях семейства ВАЗ:

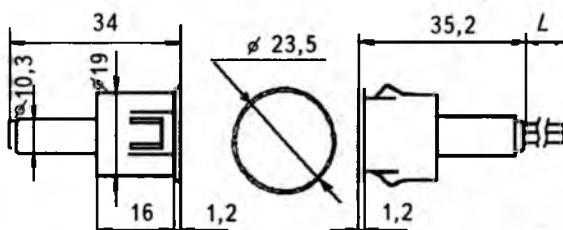
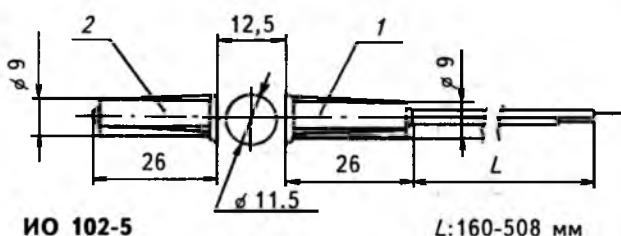
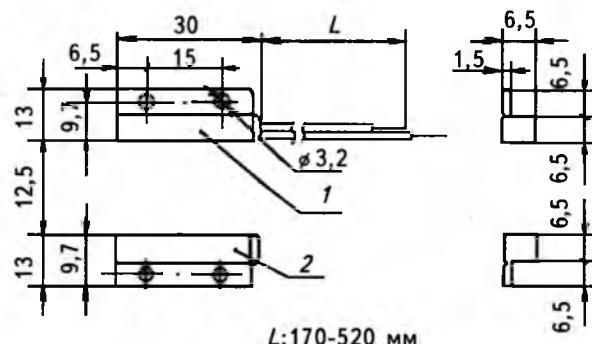
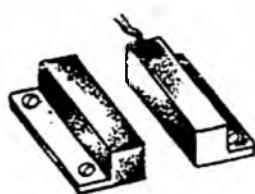
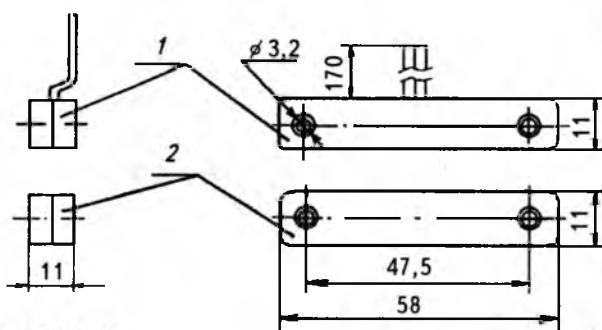


Рис.3.



Рис.4.

- в бачках с омывающей и охлаждающей жидкостями (ДУЖ);
- в картере двигателя для контроля уровня масла (ДУМ).

Датчики служат для предотвращения аварийной ситуации при понижении уровня контролируемой жидкости до предельно допустимого значения с выдачей сигнала в бортовую систему контроля (БСК) автомобиля.

Основные характеристики датчиков

Номинальное напряжение, В	12
Коммутируемый ток, максимальный, А	0,25
Срок службы, минимальный, срабатываний	10^6
Контактное сопротивление (без учета выводов), максимальное, Ом	0,2
Температура окружающей среды, °С	-40...+60

На рис.3 представлена серия охранных магнитоуправляемых извещателей, предназначенные

для скрытого внутреннего (ИО 102-5, ИО 102-6) и поверхностного (ИО 102-2, ИО 102-4) магнитов, при этом ИО 102-6 может монтироваться в металлические двери. Все извещатели изображены в рабочем положении (1 — датчик, 2 — магнит), их крепление осуществляется с помощью винтов (ИО 102-2, ИО 102-4) или приклеивания в подготовленное отверстие (ИО 102-5, ИО 102-6). Все извещатели включены в перечень средств, рекомендуемых к применению ГУВО МВД РФ.

В ряде разработок РЗМКП (ОКБ) используются свойства размыкаемой пары контактов, в частности, ее способность размыкаться при воздействии различных ударных нагрузок. Это позволило создать серию удароконтактных датчиков (рис.4, табл.2) для применения в охранных системах зданий, сооружений, транспортных средств. Так, использование датчика ДРС-1 только с размыкаемой парой (взамен ДРС с герконом КЭМ-3) в извещателях, предназначенных для обнаружения разрушения стекла (ИО 303-4, выпускаемом РЗМКП), позволило исключить возможность влияния внешних магнитных полей и как следствие подачу ложных сигналов "Тревога" на приемно-контрольные приборы.

Разработаны и выпускаются концевые выключатели на герконах. Так, в авиационной промышленности используются ВКГС-17-01,

Таблица 2

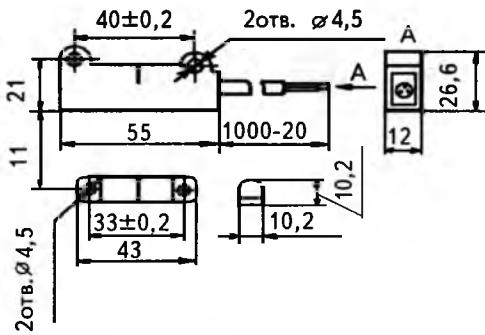
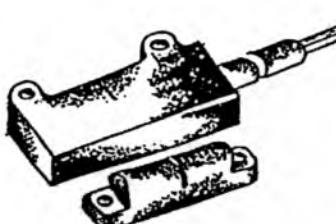
Параметры	ДРС	ДРС-1	ДРС-3	Д1	Д2
Сопротивление контакта*, Ом	1	1	1	1	1
Сопротивление разомкнутых контактов*, МОм	10	10	10	10	10
Сила контактного нажатия, Н	25-110	25-80	15-80	5-7	15-25
Площадь блокируемого стеклянного полотна*, м ²	4	4	4	—	—
Масса*, г	8	6	5	6	6
Габаритные размеры*, мм	35×9×8	31×9,4×8,4	6,5×13×15	29×13×6,5	

* Максимальные

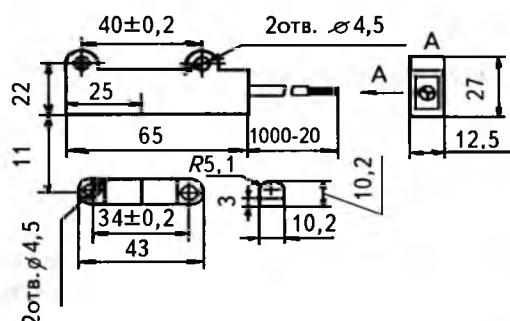
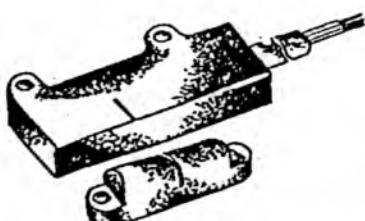
Таблица 3

Датчики	ВКГС-17-01	ВКГС-27-01	СКВ-04	В-27
Коммутирующий элемент, геркон	МКС-17702	МКС-27702	КЭМ-3	МКС-17702
Расстояние срабатывания*, мм	5	9	2-3	15
Дифференциал хода, мм	3-4	5-8	1-2	5
Коммутируемый ток**, А	1	2,5	0,1	1,2
Коммутируемое напряжение**, В	30	30	30	30
Коммутируемая мощность на активную и индуктивную нагрузку**, Вт	30	75	10	30
Контактное сопротивление (без учета выводов), Ом	0,3	0,3	0,3	0,3
Диапазон рабочих температур, °С		-60 \div +85		
Срок службы в зависимости от режима коммутаций	10^6	$5 \cdot 10^5$	10^6	$2 \cdot 10^5$
Масса датчика и управляющего магнита, г	55	65	40	30

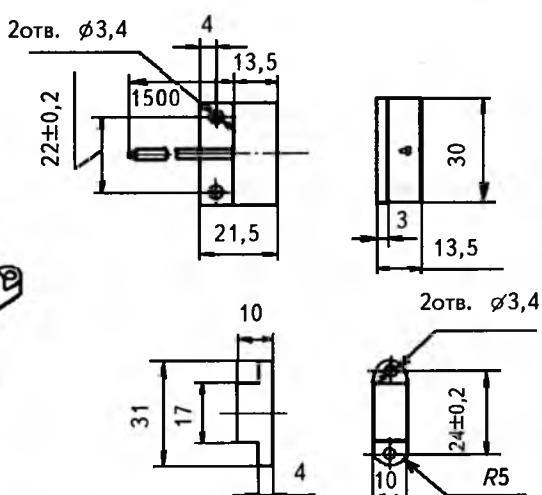
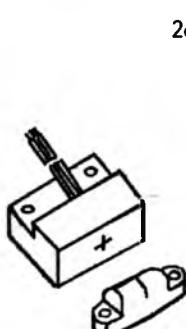
* Минимальное. ** Максимальное.



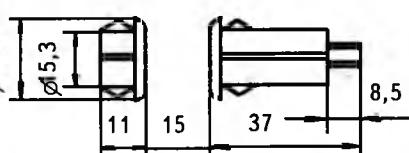
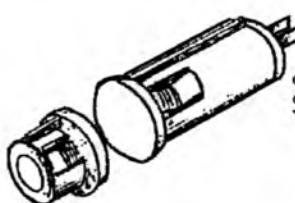
ВКГС-17-01



ВКГС-27-01



СКВ-04



B-27

Рис.5.

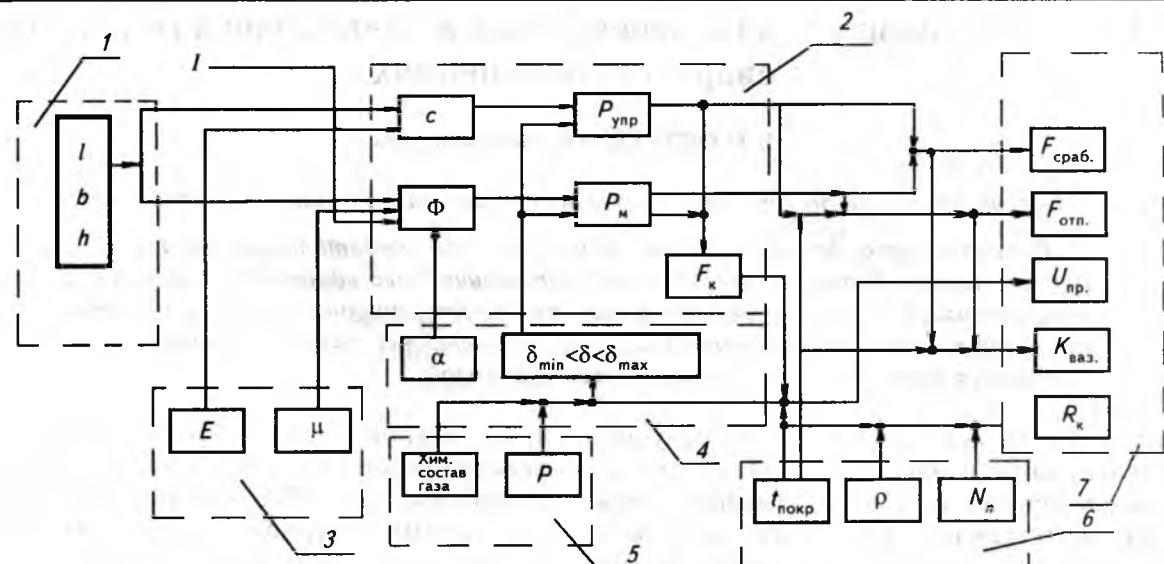


Рис.6.

ВКГС-27-01, СКВ-04, заканчивается подготовка производства изделия В-27 для применения в автомобилях (рис.5, табл.3).

Несмотря на кажущуюся простоту конструкций герконов, в них заложена масса противоречий между физическими процессами, сопровождающими коммутацию, собственно конструкцией и различными технологическими факторами. На рис.6 представлена укрупненная схема качественных взаимосвязей отдельных параметров герконов с характеристиками образующих их элементов и другими информативными данными. Здесь l , b , h — геометрические размеры контакт-деталей; α — перекрытие; δ — раствор контактов; c — жесткость контакт-детали; I — ток в катушке управления; Φ — магнитный поток в растворе; μ — магнитная проницаемость материала контакт-детали; E — модуль упругости контакт-детали; P — давление газа в баллоне; $P_{\text{упр}}$, P_m — упругая и магнитная силы взаимодействия; F_k — контактное давление; $t_{\text{покр}}$ — толщина покрытия контакт-детали; ρ — удельное сопротивление контактирующего покрытия; N_n —

твердость контактирующего покрытия; 1 — геометрические параметры контакт-детали; 2 — физические величины, определяющие работу МК; 3 — физические характеристики материала контакт-детали; 4 — геометрические характеристики МК; 5 — физические характеристики наполнения; 6 — физические характеристики контактного покрытия; 7 — выходные характеристики МК.

Даже беглый анализ этой схемы (выполненной на основе многолетнего опыта и исследований) указывает на компромиссный характер параметров герконов. В производстве этот компромисс поддерживается за счет высокой квалификации и опыта технологов, других ИТР и наладчиков основного производства. К сожалению, временный спад потребности в герконах (возрождение вместе с экономикой страны неизбежно) вызвал отток многих из этих специалистов в другие, пока более благодарные, сферы деятельности. Конечно, это осложнило работу РЗМКП, но в тоже время заставляет с большим вниманием относиться к предложениям по сотрудничеству во всем спектре разработок, производства и сбыта.

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

Ширина разделяющих пазы перешейков в электрических контактных сварных соединениях

В.Н.ОСТРЕЙКО, канд.техн.наук

Северо-западный заочный политехнический институт (Санкт-Петербург)

Показано, что для повышения равномерности ответвления тока в заваренные пазы одного из проводников электрического сварного контактного соединения (а значит, и выравнивания его температурного поля, и снижения электрического сопротивления) ширину разделяющих пазы перешейков целесообразно выполнять равной ширине самих пазов.

Электрический контакт между токоведущими проводниками в электрических аппаратах зачастую реализуется с помощью сварных швов [1]. Шов характеризуется средним катетом Δ контактирования с каждым из свариваемых проводников, размер которого обычно выбирается из условий обеспечения требуемых электрических и механических характеристик сварного соединения. Для удлинения сварного шва с целью увеличения площади контакта и, как следствие, уменьшения его активного сопротивления в одном из привариваемых проводников (например, в шине или переходной пластине) может быть выполнен ряд параллельных сквозных по толщине проводника пазов шириной 2Δ , разделенных перешейками или зубцами некоторой ширины $2C$, с последующей приваркой стенок пазов швом с катетом Δ к поверхности другого проводника, т.е. фактически пазы завариваются по всей их ширине 2Δ . При этом, естественно, возникнет вопрос о выборе значения $2C$. Понятно, что теория такого выбора из-за разброса геометрических и электрических параметров сварных швов может носить лишь оценочный характер. Следовательно, ее основу могут составлять приближенно-оценочные соотношения.

Для решения поставленного вопроса рассмотрим фрагмент проводника с равномерно чередующимися заваренными пазами шириной 2Δ (на рисунке они показаны штриховкой), разделенными перешейками (зубцами) шириной $2C$. Один из вариантов повышения равномерности ответвления тока от зубцов в контакты заваренных пазов может заключаться в выполнении условия

$$\frac{\rho_y}{\rho_x} = \min, \quad (1)$$

где ρ_x и ρ_y — эквивалентные удельные электрические сопротивления рассматриваемой зубцово-пазовой структуры в принятых на рисунке координатных направлениях x , y , т.е. соответственно поперек (x) и вдоль (y) стенок пазов.

Условие (1) максимально способствует продольному прохождению тока по зубцам (т.е.

вдоль стенок пазов) и тем самым повышает равномерность его поперечного ответвления в заваренные пазы. Это должно не только выравнивать температурное поле контактного соединения, но и в целом снижать его электрическое сопротивление.

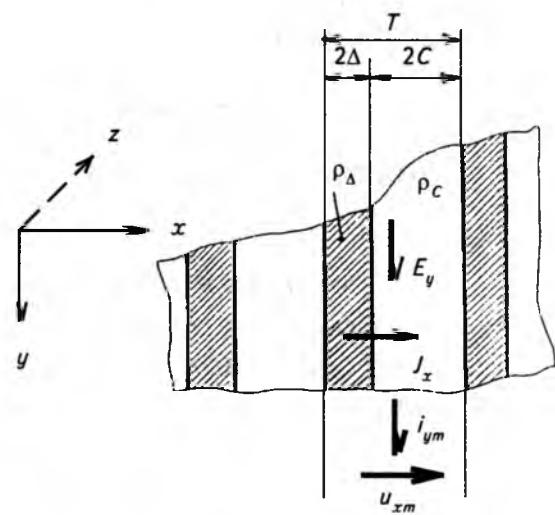
На границах раздела пазов и зубцов нормальная составляющая J_x вектора плотности тока \mathbf{J} непрерывна. Поэтому можно принять $J_x \approx \text{const}$, так что условие эквивалентности для электрического напряжения u_{xt} , приложенного к отрезку оси x длиной T , равной шагу чередования пазов, по аналогии с [2, второе уравнение (58)], имеет вид

$$u_{xt} = \rho_c J_x 2C + \rho_\Delta J_x 2\Delta = \rho_x J_x T; \quad T = 2(C + \Delta), \quad (2)$$

где ρ_c и ρ_Δ — удельные электрические сопротивления соответственно зубцов (перешейков) и заваренных пазов (т.е. сварных швов).

На указанных границах раздела непрерывна и касательная составляющая E_y вектора \mathbf{E} электрической напряженности. Поэтому можно принять $E_y \approx \text{const}$, так что условие эквивалентности для удельного (на единицу длины по оси z) электрического тока i_{yt} , протекающего вдоль оси y через отрезок оси x длиной T , по аналогии с [2, первое уравнение (58)], имеет вид

$$i_{yt} = \rho_c^{-1} E_y 2C + \rho_\Delta^{-1} E_y 2\Delta = \rho_y^{-1} E_y T. \quad (3)$$



Умножив (2) на (3) и сократив J_x и E_y , получим:

$$\frac{\rho_y}{\rho_x} = \frac{(C + \Delta)^2}{C^2 + qC\Delta + \Delta^2}, \quad (4)$$

где

$$q = \rho_* + \frac{1}{\rho_*} \geq 2; \quad \rho_* = \frac{\rho_\Delta}{\rho_c} > 0. \quad (5)$$

Если найти производную от выражения (4) по C и в соответствии с (1) приравнять ее к нулю, то с учетом (5) получается уравнение $C - \Delta = 0$, которое свидетельствует о наличии именно минимума у функции (4), достигаемого при равенстве ширины пазов и зубцов (перешейков), т.е.

$$C = \Delta, \quad (6)$$

при этом

$$\min \frac{\rho_y}{\rho_x} = \frac{4}{2 + q} \leq 1.$$

Отметим, что равенство (6) не зависит от значений ρ_Δ и ρ_c . Следовательно, оно сохраняется независимо от материалов как сварного шва, так и проводника, который, в частности, может быть медным, алюминиевым, стальным или слоистым [1].

Таким образом, для повышения равномерности ответвления тока в заваренные пазы проводника ширину их разделяющих перешейков целесообразно выполнять равной ширине этих пазов.

Список литературы

- Бойченко В.И., Дзекцер Н.Н. Контактные соединения токоведущих шин. Л.: Энергия, 1978.
- Острайко В.Н. Расчет электромагнитных полей в многослойных средах. Л.: Изд-во ЛГУ, 1981.

Экспериментальное исследование воздействия электромагнитных полей на статические реле

А.П.ВИХАРЕВ, А.В.ГОЛГОВСКИХ, кандидаты техн.наук

Вятский ГТУ

Приведены результаты испытаний статических реле РСТ 11-14, РСТ 11-19, РСН 15-33, РСН-17-33, РТЗ-51, РМ 12 при воздействии на них электромагнитного поля промышленной частоты большой интенсивности.

Важную роль в обеспечении эксплуатационной надежности мощного электроэнергетического оборудования играет безотказная работа систем противоаварийных защит и автоматики. Довольно часто на промышленных предприятиях и предприятиях энергетики устройства противоаварийных защит оказываются расположенным в непосредственной близости от того электрооборудования, которое они защищают. Например, на гидроэлектростанциях на расстоянии нескольких метров от мощных гидрогенераторов и электрооборудования главных цепей генераторов (по которым протекают токи в десятки килоампер) размещаются системы противоаварийных защит, автоматики и измерений гидрогенераторов. Результаты измерений на действующих ГЭС показали, что напряженность электромагнитного поля (ЭМП) промышленной частоты в пространстве, окружающем электрооборудование главных цепей генераторов (токопроводы, выключатели, разъединители), в нормальном режиме может достигать 1000 А/м, а в аварийном режиме — 3000—4000 А/м [1—3].

В настоящее время происходит замена электромеханических устройств противоаварийных защит и автоматики более совершенными устройствами на интегральных микросхемах. Эти

устройства, называемые статическими, имеют гораздо более низкие уровни полезных сигналов, чем электромеханические. Воздействия ЭМП на указанные устройства могут приводить к ложной работе противоаварийных защит. Но в таких случаях далеко не всегда удается установить истинную причину ложного срабатывания (или отказа в работе).

В связи с этим актуальными являются исследования помехоустойчивости выпускаемых реле противоаварийных защит, выполненных на интегральных микросхемах, при воздействии на них ЭМП промышленной частоты большой интенсивности. В данной статье приводятся результаты таких исследований.

Исследования проводились в лабораторных условиях на специальной установке, состоящей из квадратной рамки Гельмгольца, источника трехфазного регулируемого тока, коммутационного фазорегулятора, конденсаторной батареи, устройства дистанционного управления, защиты, сигнализации и приборов контроля. Более подробно ее конструкция описана в [4]. С помощью установки создавалось однородное магнитное поле напряженностью от 0 до 6000 А/м различного геометрического направления и фазы.

Степень воздействия ЭМП на статические реле оценивалась по дополнительной погрешности параметров срабатывания и возврата реле. Дополнительная погрешность срабатывания реле рассчитывалась по формуле

$$\delta_{cp} = \frac{A_0 - A_h}{A_0} \cdot 100\%,$$

где A_0 — параметр срабатывания реле при отсутствии воздействия внешнего ЭМП; A_h — параметр срабатывания реле при воздействии внешнего ЭМП.

Аналогично определялась дополнительная погрешность возврата реле

$$\delta_{bz} = \frac{B_0 - B_h}{B_0} \cdot 100\%,$$

где B_0 — параметр возврата реле при отсутствии внешнего ЭМП; B_h — параметр возврата реле при влиянии внешнего ЭМП.

Испытанию были подвергнуты следующие статические реле: реле тока РСТ 11-14 и РСТ 11-19; реле напряжения РСН 15-33 и РСН 17-33; реле тока нулевой последовательности РТЗ-51; реле направления мощности РМ 12.

Реле серии РСТ 11, РТЗ-51, РСН 15, РСН 17, РМ 12 входят в измерительные и пусковые органы систем защит и автоматики, которые действуют на логическую часть при отключении контролируемого параметра от значений предварительно заданных для защищаемого объекта. Эти реле идут на смену электромеханическим реле серии РТ-40, РН-53, РН-54 и РТЗ-50 и РБМ.

Анализ результатов испытаний показал, что дополнительная погрешность реле зависит от нескольких основных факторов. Первый из них — направление в пространстве вектора напряженности помехонесущего ЭМП. Испытания проводились при трех направлениях вектора напряженности, совпадающих с направлениями прямоугольных осей координат. Было установлено, что у каждого реле имеется одно наиболее опасное направление, при котором дополнительная погрешность имеет наибольшее значение. Например, для реле серии РСТ 11, РСН 15 и РСН 17 наиболее опасным является вертикальное направление. При прочих равных условиях дополнительная погрешность в этом случае в 4—5 раз больше, чем при других направлениях (рис.1). Причиной этого является расположение внутри реле магниточувствительных элементов: входных трансформаторов (тока или напряжения) и выходного электромагнитного или герконового реле. Наибольшая дополнительная погрешность имеет место в том случае, когда вектор напряженности помехонесущего ЭМП направлен перпендикулярно плоскости витков обмотки трансформатора или реле. Указанные

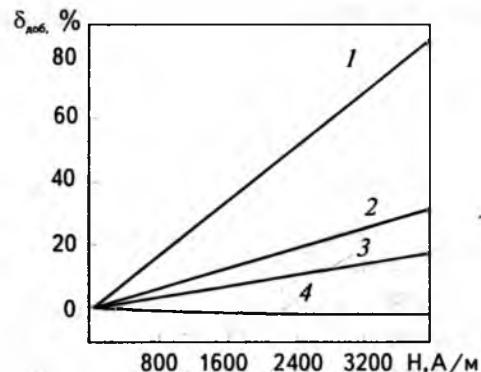


Рис.1. Зависимости дополнительной погрешности срабатывания реле РСТ 11-19 от направления и напряженности помехонесущего ЭМП при различных уставках:

1,2,3 — при вертикальном направлении и уставках 1,5 A; 3,75 A; 6,15 A (соответственно); 4 — при горизонтальном направлении и уставке 1,5 A

магниточувствительные элементы являются основными рецепторами помех от ЭМП промышленной частоты. Микроэлектронные элементы реле практически не подвержены воздействию отмеченных полей во всех проведенных испытаниях.

Вторым фактором, от которого зависит дополнительная погрешность статических реле, является значение напряженности помехонесущего поля. При проведении испытаний напряженность изменялась от 0 до 4000 A/m. При этом наблюдалось прямо пропорциональное увеличение дополнительной погрешности реле. В качестве примера на рис.1 показаны зависимости дополнительной погрешности срабатывания реле РСТ 11-19 от напряженности помехонесущего поля. Характер зависимости указывает на отсутствие насыщения ферромагнитных элементов, входящих в состав реле во всем исследуемом диапазоне значений напряженности. Необходимо отметить, что статические реле подвержены воздействию ЭМП промышленной частоты в значительно меньшей степени (более, чем в 2 раза), чем аналогичные электромеханические реле. Исключение составляет реле РТЗ-51.

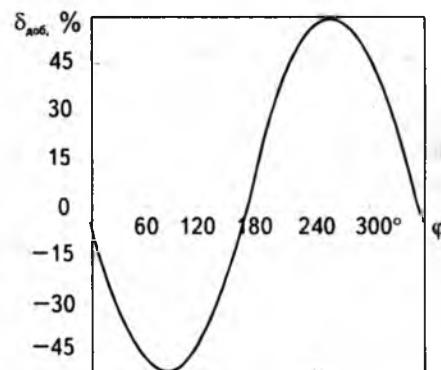


Рис.2. Зависимости дополнительной погрешности срабатывания реле РСН 17-33 от угла между векторами напряженности помехонесущего ЭМП и собственного поля реле (при вертикальном направлении первого)

Третьим фактором, влияющим на значение дополнительной погрешности, является сдвиг по фазе между векторами напряженности помехонесущего ЭМП и собственного поля реле. Собственное поле реле создается токами, протекающими в обмотках входного трансформатора. При изменении угла между векторами меняется знак дополнительной погрешности. Реле может срабатывать при меньшем (положительная погрешность) или большем (отрицательная погрешность) значении контролируемого параметра. В качестве примера на рис.2 приведена зависимость дополнительной погрешности срабатывания реле РСН 17-33 от указанного параметра.

Четвертым фактором, оказывающим влияние на дополнительную погрешность реле, является значение уставки реле (по току

или напряжению). Чем больше уставка, тем меньшее влияние оказывает на работу реле помехонесущее ЭМП. Такое явление объясняется тем, что при большей уставке в обмотках входного трансформатора протекают большие токи. Следовательно, напряженность собственного поля реле будет выше, а степень влияния на нее помехонесущего поля — ниже. В качестве примера на рис.1 показаны зависимости дополнительной погрешности от напряженности помехонесущего поля для реле РСТ 11-19 при разных значениях уставок (зависимости 1—3).

Особо следует сказать о реле направления мощности РМ 12. Результаты испытаний показывают, что при воздействии помехонесущего ЭМП происходят смещение угловых характеристик и изменение угла наибольшей чувствительности реле. В зависимости от направления помехонесущего поля смещение может составлять от 50 до 165°. Такое воздействие существенно сдвигает зону срабатывания реле, что может привести к полной работе направленных противоаварийных защит.

Для большей наглядности результаты испытаний сведены в таблицу, откуда видно, что наиболее подвержено воздействию помехонесущего ЭМП промышленной частоты реле РТЗ-51. При уставке 20 мА оно срабатывает даже при отсутствии тока в обмотках при напряженности 360 А/м.

Дополнительная погрешность срабатывания статических реле в зависимости от уставки и напряженности внешнего ЭМП

Тип реле	Уставка срабатывания	Максимальная дополнительная погрешность срабатывания (%) при напряженности внешнего магнитного поля, А/м		
		800	2000	4000
РСТ 11-14	1,25 А	-10,1	-23,0	-39,5
	0,50 А	-9,2	-9,2	-16,5
	2,05 А	-2,4	-5,1	-10,2
РСТ 11-19	1,50 А	19,8	44,4	88,1
	3,75 А	8,3	17,2	32,5
	6,15 А	4,7	11,0	19,7
РСН 15-33	80,0 В	24,2	51,6	Сработало при напряженности поля 3960 А/м
	136,0 В	8,7	30,6	65,6
	200,0 В	10,0	21,5	42,1
РСН 17-33	80,0 В	27,3	56,7	Сработало при напряженности поля 3520 А/м
		15,5	32,6	
		10,5	22,5	
РТЗ-51	20 мА	Срабатывает без тока в обмотке при напряженности поля 360 А/м		
	68 мА	55,0	Сработало при напряженности поля 1560 А/м	
	136,0 В	49,8	69,0	Сработало при напряженности поля 2940 А/м

Остальные из испытанных реле более устойчивы к отмеченным воздействиям.

Выводы

1. Статические реле серий РСТ 11, РСН 15, РСН 17 и РМ 12 более устойчивы к воздействию низкочастотных ЭМП, чем соответствующие электромеханические реле серий РТ-40, РН-53, РН-54 и РБМ. Но из-за наличия у статических реле ферромагнитных элементов дополнительная погрешность от воздействия помехонесущего поля остается значительной.

2. Для уменьшения степени воздействия помехонесущих ЭМП на статические реле предлагаются:

выпускать реле не в пластмассовых корпусах, а в корпусах-экранах из ферромагнитных или комбинированных материалов;

размещать системы противоаварийных защит и автоматики с учетом предварительного анализа распределения ЭМП, создаваемых мощным электроэнергетическим оборудованием.

Список литературы

- Хагемайстер Е.А., Вихарев А.П., Голговских А.В. Магнитные поля в машинном зале Нурекской ГЭС при установленных коротких замыканиях//Электротехника. 1988 г. №11.
- Хагемайстер Е.А., Вихарев А.П. Экспериментальное исследование внешних магнитных полей в машинном зале Саяно-Шушенской ГЭС//Электротехника. 1985. № 1.

3. Хагемейстер Е.А., Вихарев А.П., Голговских А.В. Мешающее влияние магнитных полей на работу аппаратуры рельсовой защиты и автоматики крупных ГЭС//Электрические станции. 1988. № 11.

4. Хагемейстер Е.А., Гиновкер А.М., Жолобова Л.А. Установка для испытаний аппаратуры в магнитном поле до 6000 А/м//Электротехника. 1984. № 6.

Вихарев Александр Павлович — доцент кафедры электроэнергетических систем Вятского государственного технического университета. В 1977 г. окончил электротехнический факультет Кировского политехнического института. В 1986 г. защитил диссертацию по теме

"Методы определения внешних магнитных полей в условиях мощных электрических станций" на звание кандидата технических наук.

Голговских Александр Владимирович — доцент кафедры электрических станций Вятского ГТУ. В 1982 г. окончил электротехнический факультет Кировского политехнического института. В 1991 г. защитил диссертацию по теме "Влияние магнитных полей на работу контрольно-измерительной аппаратуры в условиях электрических станций" на звание кандидата технических наук.

Конструктивные принципы разработки экономичных токоведущих систем аппаратов

Ю.А.ФИЛИППОВ, доктор техн.наук, проф.

Санкт-Петербургский ГТУ

Лаборатория больших токов кафедры электрических и электронных аппаратов Санкт-Петербургского государственного технического университета постоянно проводит исследования и конструктивные разработки токоведущих систем (ТВС) различных аппаратов широкого диапазона параметров по напряжению, номинальным токам, электродинамической и термической стойкости в аварийных режимах.

Целью этих исследований и разработок является совершенствование базовых принципов создания высокоэкономичных аппаратов на основе дальнейшего развития возможностей ранее разработанных тонкостенно-профильных ТВС разъединителей и выключателей на 10–20 кВ, от 2000 до 12500 А, много лет успешно выпускаемых отечественными и некоторыми зарубежными промышленными предприятиями. Однозначным условием развития ТВС является возможность создания на их основе аппаратов и других видов электрооборудования на номинальные токи 30000 А и выше при естественном охлаждении. Необходимость применения средств искусственного охлаждения исключается — как неоправданно удорожающих аппараты и снижающих надежность их работы в эксплуатации.

Установлено, что при номинальном токе от 400 до 30000 А и любой необходимой стойкости в аварийных режимах работы аппаратов по условиям технологичности целесообразно ограничиться использованием листовой и полосовой мягкой меди для формирования нужных жестких профилей с толщинами их стенок от 1,5 до 6 мм. Теоретические и эксперименталь-

ные исследования подтвердили достаточность этого диапазона толщин стенок профилей не только по длине элементов ТВС, но, что особенно важно, в контактных зонах.

Проведены обширные исследования в аварийных режимах работы тонкостенных контактов на надежность их работы. Определены токи короткого замыкания, при которых начинают появляться первые следы оплавления контактирующих поверхностей. Установлено влияние геометрии рабочей поверхности контактирования, вида металла или разных металлов, образующих контактные пары, шероховатостей контактных поверхностей, контактных нажатий на свариваемость различных гальванических покрытий, в том числе влияние толщины слоя серебрения, длительности протекания тока короткого замыкания и некоторых других факторов, фактически оказывающих существенное влияние на сваривание контактов в аварийных режимах работы. Эти исследования показали, что обеспечение конструктивно-технологическими средствами достаточно малых и, что особенно важно, стабильных и одинаковых сопротивлений стягивания контактов в процессе производства аппаратов одной партии позволяет достигнуть высоких значений их электродинамической и термической стойкости.

Примером практического использования этих конструктивных принципов стала разработка новой конструкции ТВС и возможность модернизации на ее основе генераторных воздушных выключателей типа ВВГ-20 на 20 кВ, 12500 А, работающих в настоящее время на атомных и других электростанциях при рабочих токах ок

ло 18000 А в условиях постоянно действующих дополнительно установленных систем искусственного воздушного обдува. Модернизация путем замены главной токоведущей системы разработанной тонкостенно-профильной и введения конструктивно простой системы пофазного электромагнитного экранирования позволит полностью отказаться от искусственного охлаждения с достижением номинального тока аппарата 20000 А при естественном охлаждении и одновременном исключении тепловых потерь, соответственно, и перегрева в местах установки выключателей близлежащих металлоконструкций. В [1] показаны использованные при разработке конструкции опытного образца средства оптимизации ТВС выключателя по тепловым потерям и достижению равномерного распределения токов по параллельно работающим

элементам. В настоящее время ведется подготовка к промышленному изготовлению головного образца, проведению типовых испытаний и модернизации установленных выключателей в эксплуатации.

В последнее время на базе тонкостенных профилей ТВС в лаборатории больших токов кафедры разрабатываются по заказам промышленности конкретные виды электрических аппаратов высокого и низкого напряжения на номинальные токи 400, 630 и 1000 А, в которых достигается эффективное и экономичное использование проводниковых материалов.

Список литературы

1. Филиппов Ю.А., Шилейко Л.Р. Оптимизация многоамперных токоведущих систем по тепловым потерям//Электротехника. 1989. № 2.

Динамические характеристики срабатывания Ш-образных электромагнитов переменного напряжения

Г.П.СВИНЦОВ, канд. техн. наук

Чувашский государственный университет

Динамические характеристики (ДХ), такие как время срабатывания, скорость перемещения, во многих случаях являются основными для приводных электромагнитов (ЭМ) различного назначения и дают более объективную информацию о функционировании электромагнитного привода, чем его статические характеристики [1]. Определение ДХ на основе решения системы дифференциальных уравнений [2,3] связано, в свою очередь, со сложной задачей расчета [14] магнитной цепи (МД). В том случае, когда ЭМ проектируется на заданные динамические параметры или с учетом наложенных ограничений на его ДХ, целесообразно иметь в распоряжении достаточно общие (универсальные) математические зависимости, связывающие его ДХ с определяющими размерами МЦ и электромеханическими параметрами.

Задача может быть решена экспериментальными исследованиями, организованными в соответствии с методами активного эксперимента [5,6], в котором в качестве факторов целесообразно использовать безразмерные критерии подобия. При этом ДХ (y_*) должны представляться в виде безразмерных критериальных уравнений [7,8].

В соответствии с теорией планирования эксперимента [5] функции y_* ищутся в виде полиномов

$$y_* = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2 + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n b_{ij} x_i x_j + \dots, \quad (1)$$

где b_0, b_i, b_{ii}, b_{ij} — коэффициенты, вычисляемые при обработке экспериментально определенных значений y_* в x -х опытах; x_i — кодированные значения факторов.

В качестве функций цели (ДХ) здесь выбраны: отрезок времени t , определяемого с момента подачи напряжения на обмотку ЭМ до момента перемещения его подвижной системы на расстояние r от начального положения (рис.1); мгновенная скорость v перемещения подвижной части аппарата в заданной точке пути r . Представленная на рис.1 противодействующая характеристика 2 соответствует контакторам, магнитным пускателям, некоторым типам электромагнитных реле с замыкающими контактами. В этом случае t, v представляют соответственно время срабатывания t_k коммутационного аппарата и линейную скорость v_k движения якоря ЭМ в момент замыкания его контактов. Скорость соударения последних в значительной мере определяет время вибрации контактов и, как следствие, — включающую способность и коммутационную износстойкость аппарата [1,9]. Поскольку ДХ ЭМ переменного напряжения существенно зависят от фазы α напряжения источника питания в момент включения и изменяется в достаточно широких пределах [9,10], целесообразно математически описать не только средние значения $t_{k,ср}, v_{k,ср}$, получаемые при включении обмотки ЭМ в произвольную фазу α , но и аппроксимировать огибающие максимальных ($t_{k,max}, v_{k,max}$) и мини-

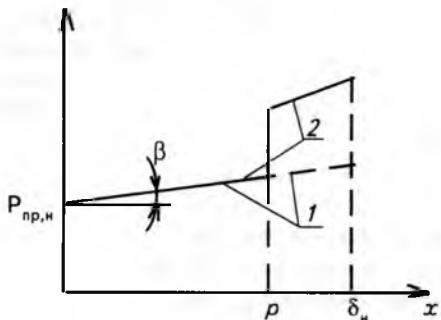


Рис.1. Основные типы противодействующих характеристик ЭМ

мальных ($t_{k,min}$, $v_{k,min}$) значений. Дополнительно находилась функция (1) для времени срабатывания $t_k(0)$ при включении обмотки ЭМ в нуль напряжения ($\alpha=0$) питания, которая необходима при построении зависимости $t_k=t_k(\alpha)$ [11]. Подключение обмотки ЭМ к источнику напряжения осуществлялось специальным устройством включения в регулируемую плавно фазу ($0 \leq \alpha \leq \pi$) и по зависимостям $y(\alpha)$ определялись максимальные, минимальные, средние значения исследуемых ДХ. Для допустимости определения средних значений ДХ y_{cp} при включении в произвольную фазу α по зависимостям $y(\alpha)$ были сопоставлены результаты обработки данных для нескольких сочетаний обобщенных параметров ЭМ, и оказалось, что

$$y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi y(\alpha) d\alpha,$$

где $n = 160$ (n — число включений в произвольную фазу напряжения).

Такой подход к определению средних значений ДХ значительно снижает затраты времени на получение функций y_{cp} . Отметим, что построение зависимостей $y(\alpha)$ производилось по усредненным значениям, определенным по не менее чем трем значениям ДХ, измеренным при фиксированной фазе α (которая, как правило, изменялась с шагом 10° , за исключением случаев крутого изменения зависимостей $y(\alpha)$).

Измерение v_k производилось индукционным датчиком скорости [12], а времени t_k — электронным миллисекундомером.

В качестве факторов выбраны критерии подобия [8] динамических процессов срабатывания ЭМ:

$$\pi_1 = \delta_n / l_{6a3}; \quad \pi_2 = \omega L_n / R; \quad \pi_3 = p / \delta_n;$$

$$\pi_{14} = \frac{m \omega^3 l_{6a3}^2}{U^2 / R}; \quad \pi_{15} = \frac{P_{пр,н} \omega l_{6a3}}{U^2 / R},$$

где δ_n — воздушный зазор между якорем и полюсами МЦ; $l_{6a3} = \sqrt{S}$ — базисный линейный размер МЦ ЭМ; S — сечение среднего полюса, в данном случае вдвое большее сечения

крайних полюсов; L_n, R — индуктивность и активное сопротивление обмотки; U, ω — действующее значение напряжения и угловая частота источника питания соответственно; $m, P_{пр,н}$ — приведенные к оси симметрии МЦ ЭМ масса подвижных элементов аппарата и противодействующее усилие аппарата (рис.1); индекс “н” свидетельствует об определении величины для начального положения якоря.

Для подобных ЭМ должны совпадать относительные характеристики [7, 8, 13], и в частности $\sigma = L/L_0$, где L_0 — индуктивность ЭМ, обусловленная магнитной проводимостью путей магнитного потока, сходящего с торцов полюсов магнитной системы. Функция σ отражает влияние на индуктивность L ЭМ (при ненасыщенной системе) основных геометрических соотношений в магнитной системе [8, 14, 15]. Отметим, что на основании четвертого дополнительного положения для физического подобия [7] достаточно аффинного подобия магнитных систем ЭМ, которые имеют подобные магнитные проводимости рабочих воздушных зазоров.

Известно, что на ДХ в значительной мере влияет [9, 15] относительная глубина внедрения якоря h_n/H_n в обмотку (рис.2). Поэтому в качестве шестого фактора здесь принимается геометрический критерий $\pi_{20} = h_n/H_n$. Остальные геометрические размеры поддерживались неизменными, равными характерным значениям для этого типа ЭМ (рис.2). Критерий $\pi_{17} = C_n \omega S / (U^2 / R)$, характеризующий [8] критериальную “жесткость” ($\operatorname{tg}\beta$) противодействующей характеристики 1 (рис.1), поддерживался неизменным ($\pi_{17} = 0,136$).

Были выбраны достаточно широкие диапазоны варьирования факторов:

$$0,231 \leq \pi_1 \leq 0,485; \quad 0,574 \leq \pi_2 \leq 5,631; \quad 0,474 \leq \pi_{13} \leq 0,826;$$

$$3,43 \leq \pi_{14} \leq 7,14; \quad 0,0384 \leq \pi_{15} \leq 0,0978; \quad 0 \leq \pi_{20} \leq 0,5,$$

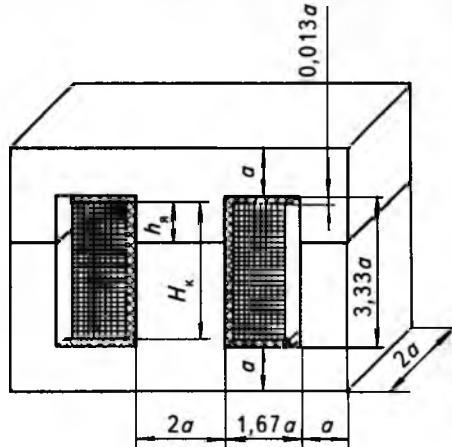


Рис.2. Геометрические размеры исследованного электромагнита

что позволяет распространить результаты исследований на большой круг приводов этого типа.

Был спланирован ортогональный центрально-композиционный план второго порядка для шести факторов [5,6]. На специально разработанной установке воспроизводились 77 сочетаний обобщенных параметров ЭМ в соответствии с матрицей [5] эксперимента и измерялись ДХ, которые представлялись в критериальной (безразмерной) форме [8]:

$$V_* = V_{\kappa} / V_{\text{баз}}; \quad t_* = t_{\kappa} / t_{\text{баз}},$$

где $V_{\text{баз}} = I_{\text{баз}} R / L_{\text{н}} = \omega \sqrt{S} / \pi_2$; $t_{\text{баз}} = \pi_2 / \omega$.

Огибающие максимальных, минимальных, средних значений ДХ снабжены дополнительными индексами: max, min,ср.

Для обеспечения приемлемой для инженерной практики точности аппроксимации полиномами (1) ДХ критериальные значения v_* , t_* подвергались нелинейным преобразованиям. После обработки [5] экспериментальных данных получено:

$$\begin{aligned} v_{*\text{ср}} &= 10^{-4}[8,491 - 0,459x_1 + 0,739x_2 + 0,171x_3 - \\ &- 0,269x_4 - 0,100x_5 + 0,335x_6 - 0,165x_1^2 - \\ &- 0,313x_2^2 + 0,064x_3^2 + 0,146x_4^2 + 0,061x_5^2 - \\ &- 0,081x_6^2 - (0,201x_2 - 0,079x_6)x_1 + 0,081x_2x_4]^4; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} v_{*\text{max}} &= 10^{-4}[9,016 - 0,480x_1 + 0,838x_2 + 0,225x_3 - \\ &- 0,301x_4 - 0,053x_5 + 0,357x_6 - 0,197x_1^2 - \\ &- 0,254x_2^2 + 0,132x_4^2 + 0,064x_5^2 - 0,115x_6^2 - \\ &- (0,228x_2 + 0,062x_4 - 0,133x_6)x_1 - \\ &- (0,060x_4 - (0,118 + 0,119x_1)x_6)x_2]^4; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} v_{*\text{min}} &= 10^{-4}[7,251 - 0,063x_1 + 0,666x_2 + 0,266x_3 - \\ &- 0,119x_4 - 0,097x_5 + 0,154x_6 - 0,074x_1^2 - \\ &- 0,180x_2^2 + 0,070x_3^2 + 0,077x_4^2 - 0,069x_6^2 - \\ &- (0,160x_2 - 0,100x_6)x_1 + 0,061x_2x_3]^4; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} t_{*\text{ср}} &= 10^{-4}[11,212 + 0,745x_1 - 1,158x_2 + 0,108x_3 + \\ &+ 0,180x_4 + 0,133x_5 - 0,392x_6 + 0,138x_1^2 + 0,545x_2^2 - \\ &- 0,104x_3^2 - 0,163x_4^2 - 0,122x_5^2 - 0,032x_6^2 + \\ &+ (0,038x_3 + 0,040x_4 + 0,104x_5 - \\ &- 0,270x_6)x_1 + (0,054x_2 - 0,070x_6)x_5 + (0,060x_2 - \\ &- 0,036x_6)x_1x_5 - 0,035x_2x_5x_6]^4; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} t_{*\text{max}} &= 10^{-3}[12,562 + 1,355x_1 - 1,389x_2 + 0,184x_3 + \\ &+ 0,250x_4 + 0,447x_5 - 0,778x_6 + 0,395x_1^2 + 0,970x_2^2 - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &- 0,157x_3^2 - 0,184x_4^2 - 0,136x_5^2 + 0,062x_6^2 + \\ &+ (0,320x_2 + 0,075x_3 + 0,096x_4 + 0,362x_5 - \\ &- 0,625x_6)x_1 + (0,035x_2 + 0,032x_4)x_3 + (0,287x_5 - \\ &- 0,172x_6)x_2 + (0,034x_2 + 0,038x_3 + 0,034x_5)x_1x_4 + \\ &+ (0,250x_2 - 0,222x_6)x_1x_5 - (0,169x_2 + 0,030x_4 + \\ &+ 0,199x_5)x_2x_6]^3; \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} t_{*\text{min}} &= 10^{-4}[10,474 + 0,769x_1 - 1,166x_2 + 0,169x_3 + \\ &+ 0,165x_4 + 0,096x_5 - 0,361x_6 + 0,139x_1^2 + 0,557x_2^2 - \\ &- 0,128x_3^2 - 0,153x_4^2 - 0,121x_5^2 + (0,037x_1 + \\ &+ 0,041x_2)x_3 + 0,035x_1 - 0,040x_2)x_4 + (0,091x_1 + \\ &+ 0,035x_2 - 0,036x_4)x_5 - (0,234x_1 - 0,113x_2 + \\ &+ 0,038x_4)x_6 - (0,058x_1 + 0,032x_5)x_3x_4 + (0,062x_1 + \\ &+ 0,043x_3)x_2x_5 + 0,059x_1x_2x_6 - 0,070x_1 + 0,050x_2 + \\ &+ 0,037x_3)x_4x_6 + (0,030x_2 + 0,32x_3)x_5x_6]^4; \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} t_{(0)*} &= 10^{-4}[10,756 + 0,595x_1 - 1,284x_2 + 0,118x_3 + \\ &+ 0,156x_4 + 0,054x_5 - 0,328x_6 + 0,126x_1^2 + 0,561x_2^2 - \\ &- 0,130x_3^2 - 0,146x_4^2 - 0,119x_5^2 - (0,050x_2 - \\ &- 0,041x_3 - 0,046x_4 - 0,039x_5 + 0,225x_6)x_1 + \\ &+ (0,064 + 0,048x_1)x_2x_6]^4; \end{aligned} \quad (8)$$

где $x_1 = 13,89\pi_1 - 4,972$; $x_2 = 0,696\pi_2 - 2,16$; $x_3 = 10\pi_{13} - 6,5$; $x_4 = 0,95\pi_{14} - 5,02$; $x_5 = 59,17\pi_{15} - 4,03$; $x_6 = 7,04\pi_{20} - 1,76$.

Точность аппроксимации полиномами (2) – (8) экспериментально определенных безразмерных ДХ была проверена во всех плановых точках факторного пространства. Относительное расхождение между экспериментальными и предсказанными в соответствии с (2)–(8) значениями составило: для временных параметров – не более 12%; для скорости перемещения – не более 10%; для подавляющего большинства точек факторного пространства эти расхождения не превышают соответственно 2% и 5%. Отметим, что максимальные расхождения имеют место при минимальном значении критерия π_2 ($\pi_2 = 0,574$), а характерные для приводных ЭМ контакторов, магнитных пускателей значения этого критерия находятся, как видно из таблицы, в диапазоне 1,3–5,8.

В целом о характере влияния обобщенных параметров ЭМ на его ДХ можно судить по кривым на рис.3, рассчитанным по выражениям (2), (5) при $I_{\text{баз}} = 0,03$ м и $\omega = 314$ рад в сечениях, проходящих через центр факторного пространства (точка пересечения всех кривых представляет собой значение ДХ, когда все

Тип аппарата	$\omega L_n / R$	Тип аппарата	$\omega L_n / R$	Тип аппарата	$\omega L_n / R$
KTB-35	5,80	DL-251	4,43	ПМА-5000	2,04
KT-6053	4,90	ПА-511	1,56	CN2-C	2,59
KTB-34	3,18	PAK-160A	2,29	ПА-411	1,30
KT-6043	4,23	CN2-HC	3,07	DIL-422	2,43
KTB-23	3,30	KTB-22	1,60	LS60/84	1,33
KT-6033	2,96	KT-6023	1,23	CN2-FC	2,68
ПА-611	2,16	PAK 100A	1,98	ПАЕ-311	1,27
PAK 250A	1,93	SRC-3631-6	3,30	ПМА-3000	1,88
SRC-3661-8	2,59	KT-6013	1,37	PAK 80A	1,78

обобщенные параметры ЭМ зафиксированы на своих средних уровнях ($x_i = 0$). При изменении одного из обобщенных параметров другим задавалось их среднее значение. Как видно из рис.3, наиболее существенно на ДХ влияют относительный зазор π_1 , добротность обмотки π_2 и относительная степень внедрения π_{20} якоря в обмотку. Приведенным зависимостям можно дать простое толкование. Так, увеличение усредненной скорости движения и уменьшение времени срабатывания с ростом относительной степени внедрения якоря в обмотку при неизменном π_2 объясняется повышением составляющей электромагнитной силы, обусловленной потоками рассеяния. Характер влияния π_2 несколько сложнее, но в центральных сечениях

факторного пространства с ростом добротности обмотки значения $V_{k,cr}$, $t_{k,cr}$ изменяются монотонно. В зависимости же $V_{k,cr}$ от относительного зазора может наблюдаться экстремум (рис.3, а, кривая 1).

Характер влияния обобщенного параметра на ДХ ЭМ зависит и от значения других его обобщенных параметров. На рис.4 представлены кривые, рассчитанные по выражениям (3) и (7). Видно, что в практически имеющем место диапазоне изменения π_2 огибающая максимальной скорости перемещения подвижной системы существенно зависит от относительного зазора π_1 . При малых π_1 зависимости V_{kmax} , t_{kmin} имеют два явно выраженных экстремума. Обратим внимание, что ЭМ ударного действия должны про-

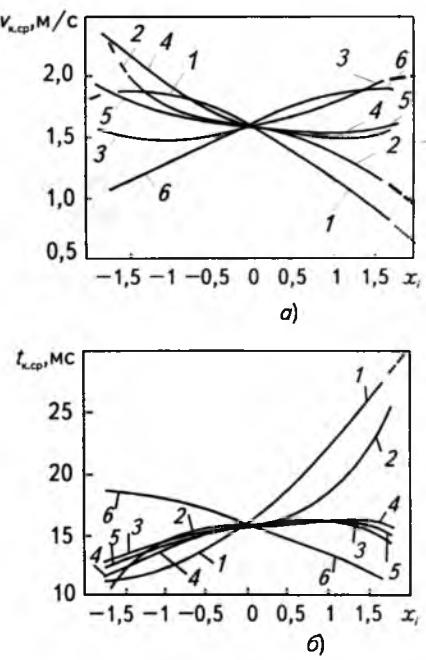


Рис.3. Усредненные ДХ при включении электромагнита в произвольную фазу напряжения:

а — скорости перемещения подвижной системы в заданной точке пути системы; б — времени срабатывания аппарата, в центральных сечениях факторного пространства при варьировании обобщенных параметров (1 — π_1 ; 2 — π_2 ; 3 — π_{13} ; 4 — π_{14} ; 5 — π_{15} ; 6 — π_{20}).

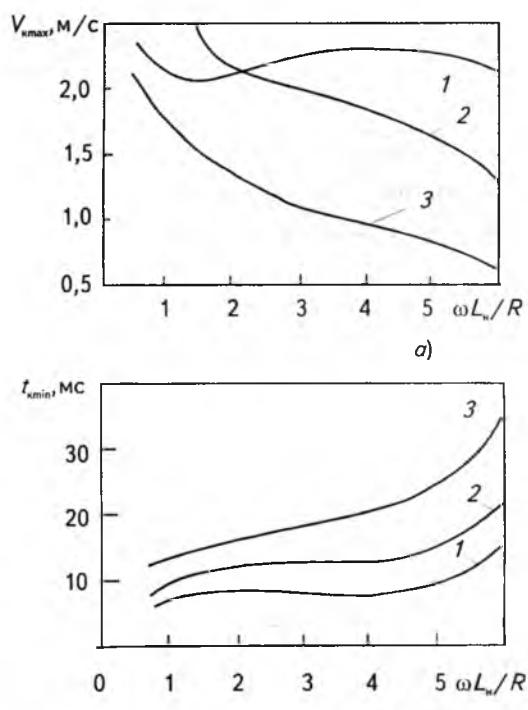


Рис.4. Зависимости максимальной скорости V_{kmax} перемещения подвижной системы в заданной точке пути и минимального времени срабатывания t_{kmin} аппарата от добротности обмотки π_2 при $\pi_{13} = 0,65$; $\pi_{14} = 5,285$; $\pi_{15} = 0,0681$; $\pi_{20} = 0,25$:

1 — $\pi_1 = 0,231$; 2 — $\pi_1 = 0,358$; 3 — $\pi_1 = 0,485$.

ектироваться с критерием $\pi_2 \approx 1$ и иметь при этом оптимальный зазор π_1 . Так, при уменьшении π_2 от 1,5 до 0,75 максимальная скорость соударения v_{kmax} увеличивается (рис.4, а, кривая 2) с 2,28 до 2,95 м/с. При других значениях относительного зазора (кривые 1 и 3) изменение этой скорости незначительно. И наоборот, приводные ЭМ контакторов, магнитных пускателей, проектируемые на высокие показатели по износостойкости, должны иметь относительно большие рабочие зазоры, добротности обмотки (кривая 3) и малую степень внедрения якоря в обмотку (последнее в большей степени относится к приводам контакторов магнитных пускателей на большие номинальные токи (на 63 А и выше)).

Следует иметь в виду, что варьирование первичных параметров ЭМ (рабочий зазор, число витков, диаметр провода обмотки, высота внедрения якоря в обмотку) вызывает одновременное изменение нескольких обобщенных параметров ЭМ.

Выводы

- Предложенные математические выражения динамических характеристик ЭМ представлены в критериальной форме и могут быть использованы для поверочных и проектных расчетов Ш-образных ЭМ переменного напряжения в широком диапазоне варьирования их обобщенных параметров.

- Наиболее существенное влияние на скорость движения и время срабатывания оказывают конструктивные параметры: относительное значение рабочего воздушного зазора, отношение индуктивного и активного сопротивлений обмотки, относительная глубина внедрения якоря в обмотку, а также начальная фаза напряжения источника питания в момент включения обмотки.

- Выбор параметров приводного Ш-образного ЭМ должен производиться с учетом основного назначения аппарата.

Список литературы

- Любчик М.А. Оптимальное проектирование силовых электромагнитных механизмов. М.: Энергия, 1974.
- Никитенко А.Г., Пеккер И.И. Расчет электромагнитных механизмов на вычислительных машинах. М.: Энергоатомиздат, 1985.

- Никитенко А.Г., Гринченков В.П., Иванченко А.Н. Программирование и применение ЭВМ в расчетах электрических аппаратов. М.: Высшая школа, 1990.

- Никитенко А.Г., Бахвалов Ю.А., Щербаков В.Г. Анализический обзор методов расчета магнитных полей электрических аппаратов//Электротехника. 1997. № 1. С. 15–19.

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

- Зедгинидзе И.Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем. М.: Наука, 1976.

- Веников В.А. Теория подобия и моделирования. М.: Высшая школа, 1976.

- Свинцов Г.П., Софронов Ю.В. О критериях подобия динамических процессов при включении приводного электромагнита//Изв. вузов. Электромеханика. 1983. № 6. С. 73–77.

- Софронов Ю.В., Свинцов Г.П. Влияние скорости движения подвижных частей на время вибрации контактов магнитного пускателя//Электротехническая промышленность. Сер. Аппараты низкого напряжения. М.: Информэлектро, 1983. Вып. 1 (104). С. 3–4.

- Свинцов Г.П., Софронов Ю.В. К динамике приводных П-образных электромагнитов переменного тока//Изв. вузов. Электромеханика. 1985. № 5. С. 72–78.

- Желтов В.П., Свинцов Г.П., Софронов Ю.В. Вероятностная оценка времени срабатывания электромагнитного реле переменного тока//Тр. "Контактные и бесконтактные электрические аппараты автоматики и управления". М.: МЭИ. 1986. Вып. № 84. С. 6–12.

- Свинцов Ю.В., Софронов Ю.В. Устройство контроля скорости перемещения подвижных частей электромагнитных аппаратов в заданной точке пути//Автоматизация технологического контроля электрических аппаратов. Чебоксары: Чувашский ун-т, 1986. С. 67–71.

- Глухов В.П., Шаповалов О.А. Условия подобия процессов включения электромагнитов//Изв. АН Латвийской ССР. Серия физических и технических наук. 1966. № 5. С. 119–123.

- Бугаев Г.А., Герасимова М.В., Ложкина Т.М. Экспериментальное исследование коэффициента рассеяния магнитных систем аппаратов переменного тока//Тр. ВНИИР "Аппараты управления". Чебоксары. 1980. Вып. 11. С. 23–28.

- Шаповалов О.А. Обобщенные кривые изменения нелинейных параметров электромагнитных контакторов//Изв. АН Латвийской ССР. Серия физических и технических наук. 1966. № 5. С. 111–118.

Свинцов Геннадий Петрович — доцент кафедры электрических и электронных аппаратов Чувашского государственного университета. В 1972 г. закончил электротехнический факультет Чувашского ГУ. В 1980 г. в МЭИ защитил кандидатскую диссертацию "Электромагнитные механизмы, питающиеся через выпрямители".



Журнал "Электротехника" переводится в США фирмой "ALLERTON PRESS, INC".

Российское авторское общество (РАО) выплачивает гонорар в валюте авторам опубликованных в нашем журнале статей.

Справки по телефону: 203-35-33, 203-59-53

Адрес: 103670, Москва, ул. Б.Бронная, 6а, комн. 110.

Необходимо знать название статьи, год и номер журнала, страницы.

Разработки и исследования вакуумных выключателей на напряжение 6—35 кВ

А.И.БУДОВСКИЙ, В.П.ИВАНОВ

ВЭИ

Рассматривается использование вакуумных выключателей среднего напряжения 6—35 кВ, главным образом, для ячеек комплектных распределительных устройств (КРУ).

В СССР и России ВЭИ — основоположник работ по исследованиям, разработке и промышленному освоению вакуумных дугогасительных камер (ВДК) и вакуумных выключателей (ВВ).

По данным Исследовательского Комитета 13 комиссии СИГРЭ [1] 80% отказов выключателей приходится на приводы, системы управления и контроля.

Работы по ВВ в последнее время касаются, главным образом, этих узлов.

Для выключателей среднего напряжения — вакуумных, элегазовых и маломасляных — используются пружинно-моторные и электромагнитные приводы (ЭП); последние получили в России наибольшее применение ввиду их простоты, надежности, дешевизны, гибкости системы управления, возможности дистанционного контроля за силовыми элементами привода. Тяговая характеристика ЭП наилучшим образом соответствует характеру сил сопротивления ВВ. Недостатками электромагнитных приводов являются: большая электромагнитная инерционность, большой потребляемый ток на включение, неавтономность в ячейках КРУ. Для устранения первого недостатка в выключателях с быстродействующим автоматическим повторным включением (БАПВ) применяется механизм свободного расцепления (МСР), т.е. механизм, обеспечивающий кинематическое расцепление якоря с подвижными контактами ВДК в конце процесса включения на короткое замыкание. Но, как показала практика, МСР является наиболее сложным, дорогим и ненадежным узлом ВВ.

Надежность выключателя в большой степени зависит от систем питания и управления катушек электромагнитов включения и отключения. В ячейках КРУ используется либо питание от переменного тока 220 В с двухполупериодным выпрямлением в приводе выключателя, либо от постоянного тока 110 или 220 В. В первом случае был сделан естественный переход в системе управления с ранее применявшимся контакторов на встречно-параллельные тиристоры, с последующим двухполупериодным выпрямлением. Такая схема применена в ВВ на 10 кВ на МЗВВ (г. Минусинск) [2]. Блокировки от повторного непредусмотренного включения, включения при наличии команды на отключе-

ние, отключения при напряжении питания ниже допустимого, отключение как от датчика конечного включеного положения, так и от уставки времени выполняются с помощью двух реле. Во включенном состоянии якорь доходит до стопа.

На рис.1,а представлена схема управления, использованная в ВВ типа ВБТ-10-20/630, освоенных в настоящее время на ГНПП "Контакт" (г. Саратов). Особенностью схемы является применение оптотиристоров в плечах моста, питающего катушку электромагнита включения. Управление светодиодами осуществляется от разряда конденсатора C_1 , что обеспечивает отключение питания от временной уставки при отказе датчика конечного положения SQ_1 , шунтирующего C_1 в конце включения (при нормальной работе). Гальваническая связь в силовой и управляющей цепях оптрана просто решает с помощью диода VD_2 блокировку включения при одновременной подаче команд на О и В.

В варианте — при последовательном включении оптранов относительно катушки — ее остаточная электромагнитная энергия рассеивается на ней самой через диоды моста. При необходимости быстрого рассеивания энергии катушка шунтируется диодно-резисторной цепью VD_1R_1 , а оптраны включаются параллельно в цепь катушки.

Отмеченный второй недостаток — большой потребляемый ток ЭП устраняется с помощью применения емкостного накопителя энергии ЕНЭ. Причем, с повышением напряжения накопителя существенно снижаются его необходимые емкость, габариты и стоимость. Повышение напряжения на ЕНЭ решается просто при питании цепей управления переменным током, например, с помощью повышающего трансформатора или схем умножения напряжения (рис.1,б). Кардинальным решением этой задачи является применение высокочастотных преобразователей напряжения со стабилизацией напряжения на ЕНЭ. Схема управления выключателем становится универсальной и может питаться как от сети постоянного тока, так и от сети переменного тока, при этом устраняется влияние колебаний напряжения питающей сети на работу привода выключателя. В каче-

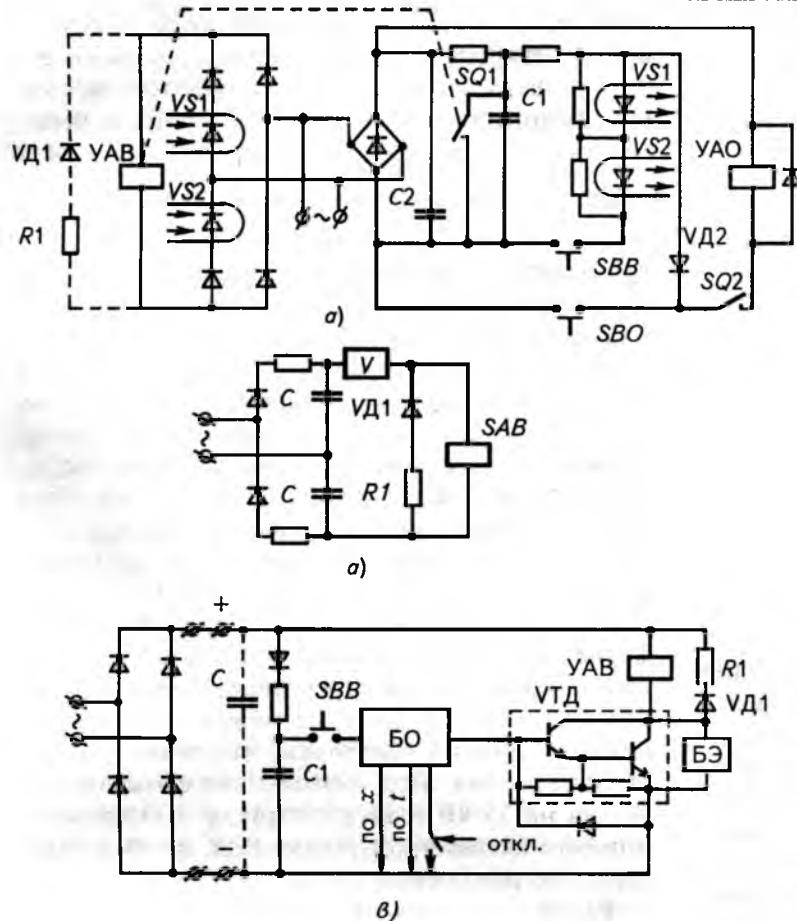


Рис.1. Схема управления:

VTD — транзистор Дарлингтона; *УАВ*, *УАО* — катушки электромагнитов включения, отключения; *SBB*, *SBO* — кнопки включения, отключения; *VS1*, *VS2* — оптотиристоры; *C1* — конденсатор цепи управления; *C* — емкостной накопитель; *БО* — блок отключения; *БЗ* — блок защиты от перенапряжений; *V* — электронный ключ

стве коммутирующего ключа *V* может быть использован, в простейшем случае, тиристор. Испытания выключателя ВБТ-10-20/630 показали, что для его успешного включения достаточно иметь емкость конденсаторов около 1000 мкФ при напряжении 560 В.

При питании катушки включения от источника постоянного тока до настоящего времени использовались контакторы в качестве коммутаторов. Выключатели РЗВА (г. Ровно) при напряжении 220 и 110 В потребляют довольно большой ток — соответственно 55 и 110 А, что вызвано большим ходом (103 мм) массивного якоря и литым магнитопроводом. Время включения — до 0,3 с. Это можно считать примером неоптимального решения для электромагнитного привода.

В последние годы стали серийно выпускаться силовые транзисторы Дарлингтона — ТКД — на токи до 100 А и напряжение до 800 В.

В ВЭИ проведены исследования и испытания транзисторных ключей в схемах управления приводами вакуумных выключателей. Транзисторный ключ имеет преимущества по срав-

нению с тиристорным, особенно при постоянном токе: для отключения основного тиристора необходимо с помощью другого тиристора подать противоток от перезаряжаемой индуктивно-емкостной цепи, а у транзистора достаточно оборвать ток базы; в отличие от тиристорного транзисторный ключ некритичен к наводкам от импульсных магнитных полей. Чем больше коэффициент передачи транзистора по току h_{213} , тем маломощней и компактней получается схема управления ключом. На рис.1,в представлена схема управления ВВ с помощью ТКД. Ключ является универсальным: он пригоден для источников питания переменного и постоянного тока. Отключение транзистора и блокировки осуществляется — от датчика конечного положения, от уставки времени, от подачи команды на отключение — шунтированием цепи база-эмиттер. В блоке отключения *БО* используются *RC*-цепь и порогово-ключевой элемент. Блок защиты *БЗ* транзистора от перенапряжений включает в себя *RC*-цепь и/или нелинейный ограничитель перенапряжений (ОПН). Энергия катушки привода после обрыва тока выводится в шунтирующую ее цепь *R₁*, *VD₁*. При испытаниях выключателя использовались транзистор разработки и изготовления ВЭИ

с h_{213} до 1000 на напряжение 700 В с рабочим током выше 100 А, а также энергоемкий миниатюрный ОПН разработки и изготовления ВЭИ-СЭЛКОМ. Серийно выпускаемые ТКД ПО "Электромодуль" (г. Молодечно) имеют h_{213} до 100. На токи до 30 А могут быть применены недорогие серийные транзисторы типа 2T847Б, но к ним необходимо иметь каскад предусилителя на маломощном низковольтном транзисторе. На ток до 15 А пригодны транзисторы 2T834.

Поскольку вакуумные выключатели требуют значительных усилий для удержания выполненных торцевыми контактами ВДК в замкнутом состоянии, механизм выключателей снабжается защелкой — механической, либо электромагнитной. Последняя может быть выполнена на постоянных магнитах или пропусканием через электромагнит включения небольшого удерживающего тока в доли ампера. Для выключателей на токи КЗ выше 16 кА при усилиях поджатия контактов более 1000 Н применяются электромеханические защелки. В выключателе ВБТ-10-20/630 УХЛ3 имеются две защелки, ки-

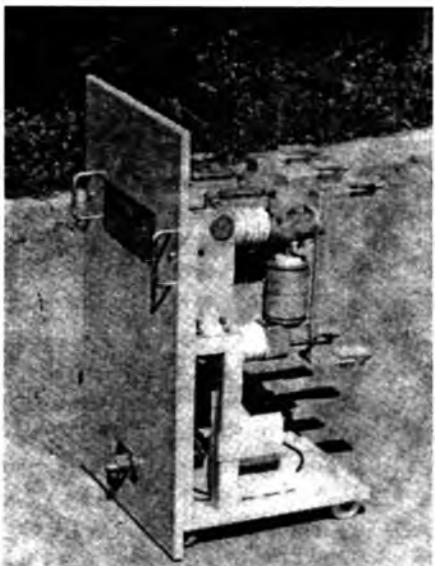


Рис.2. Вакуумный выключатель ВБТ-10-20/630 УХЛЗ

нематически связанные друг с другом. Одна позволяет производить оперативное отключение, другая — отключение в аварийном режиме. Еще одной особенностью этого выключателя является применение демпфера отключения с насыпными элементами — шариками — вместо традиционных гидро- или пневмодемпферов. Выключатель показан на рис.2. Выполнение этого выключателя с шихтованным электромагнитом включения и с электронной схемой управления позволяет использовать его для подстанций предприятий, где необходимо быстрое аварийное включение резерва. Испытания показали, что в форсированном режиме —питающая емкость 300 мкФ при напряжении 800 В — собственное суммарное время включения и отключения составило менее 25 мс.

В последнее время в ВЭИ проведены исследования и испытания электромагнитного привода с простой кинематикой без механизма свободного расцепления для выключателей 10—35 кВ и токи отключения 20 кА и выше. Необходимые условия такой конструкции: гарантированный рабочий зазор во включенном положении электромагнита, шихтованный магнитопровод из двух типов материалов с разными индукциями насыщения и в слабых магнитных полях, шунтирующая катушка диодно-резисторная цепь, насыщение одного из материалов при минимальном рабочем зазоре, электронный ключ управления. В таком приводе необходимо не только уменьшить постоянную времени спада тока катушки за счет введения в ее цепь дополнительного сопротивления R_1 , но и обеспечить быстрый спад магнитного потока. По-

стоянная времени спада $\tau \approx \frac{V}{\rho\delta}$. Отсюда следует стремиться уменьшать объем V магнитопро-

вода, применять шихтованную высококремнистую электротехническую сталь с высоким ρ и увеличивать зазор δ , но при обеспечении необходимого тягового усилия. Расчеты и испытания показывают, что достаточно иметь

$\delta/\sqrt{S} \geq 0,06 \div 0,15$ или $\delta = 2 \div 5$ мм. Здесь S — площадь сечения торца стопа или якоря. Большой зазор требует значительного увеличения намагничивающего тока. Правильное соотношение площадей торца из сталей с разными магнитными характеристиками и, следовательно, с разной степенью насыщения при минимальном рабочем зазоре также ускоряет спад магнитного потока и остаточные усилия. Магнитопровод выполнялся из сталей Э423 и отожженной стали 10, индукция насыщения которых 1,9 и 2,3 Т. В начале включения при больших зазорах работает сталь Э423, а при малых зазорах она близка к насыщению и дополнительное поджатие контактов обеспечивает сталь 10. Кроме того, в конструкции перераспределение магнитных потоков при их спаде между сталью происходит поперек шихтовки, что также ускоряет спад потока. При испытаниях фазы выключателя на 35 кВ и 20 кА в цикле В-О время от момента касания контактов ВДК до их размыкания не превысило 30 мс.

Такая конструкция позволяет исключить МСР для выключателей с процентом апериодической составляющей менее 50%.

В разработанном выключателе $U_h = 10$ кВ, $I_h = 1600$ А, $I_{ho} = 20$ кА в пофазном исполнении с электромагнитным приводом кроме отмеченных особенностей применен пневмодемпфер с коническими рабочими поверхностями, обеспечивающий отсутствие обратных отбросов после отключения, что повышает отключающую способность выключателя.

В настоящее время ведутся разработки пневмоприводов для генераторных выключателей в пофазном исполнении. При включении на КЗ предусмотрен форсированный сброс воздуха из полости силового цилиндра. Электромагниты управления пневмоклапаном на включение и отключение работают от транзисторной схемы, с электронной и силовой блокировкой сигналов включения при наличии сигнала отключения.

Рассмотренные разработки использованы в проектах выключателей с ВДК постоянного и переменного тока, в контакторах. В частности — для коммутационных аппаратов новой серии электровозов и скоростного поезда "Сокол".

Список литературы

1. Выключатели высокого напряжения. Переводы докладов СИГРЭ-86. М.: Атомэнергоиздат, 1988.
2. А.с. 1683086, кл. НОИ33/59 от 18.04.89. Устройство для управления высоковольтным выключателем.
3. Пат. 4.628.393, кл. 361/3, МКИНО2Н3/033 от 11.03.82 США. Метод отключения трехфазной высоковольтной сети.

Алгоритмы цифрового моделирования и коррекции погрешности каскадных трансформаторов тока

Л.И.СОКОЛИК, канд.техн.наук

Рассмотрены проблемы погрешности трансформаторов тока. Показаны возможности измерения больших постоянных токов с помощью обычных трансформаторов тока.

Каскадная схема конструкции обычно применяется для обеспечения достаточно прочной изоляции между первичной цепью, где напряжения 300–1000 кВ и более, и заземленной вторичной цепью, обслуживание которой должно быть безопасно для человека. Каждая ступень каскадной схемы является обычным трансформатором тока, динамическое состояние которого удачно описывается следующей системой двух дифференциальных уравнений [1]:

$$\begin{aligned} dB/dt &= c(i_1 w_1 / l - i_2 w_2 / l - f(B)); \\ di_2/dt &= (w_2 S dB/dt) / L - R i_2 / L, \end{aligned} \quad (1)$$

где B — индукция в стальном сердечнике; c — коэффициент аппроксимации; i_1 — первичный ток; i_2 — вторичный ток; w_1 , w_2 — число витков первичной и вторичной обмоток; l — длина средней силовой линии сердечника; S — площадь поперечного сечения сердечника; L , R — индуктивность и активное сопротивление вторичной цепи; t — реальное время.

Удачность описания (1) заключается в том, что решение системы дифференциальных уравнений может быть без затруднений выполнено любым известным численным методом. Метод Эйлера (прямоугольников), являющийся непрерывным компонентом более сложных, может быть использован и как самостоятельный, с удовлетворительно малой погрешностью при достаточно и не слишком малом шаге интегрирования. Различные варианты исправлений метода Эйлера, например метод трапеций (2-го порядка Рунге-Кутты), также могут быть использованы. При этом появляется возможность контролировать погрешность и менять шаг интегрирования по условию ограничения погрешности, сравнивая результаты вычислений на каждом шаге по Эйлеру и конечный. Листинг соответствующей программы представлен на рис.1. Результат работы этой программы при первичном токе, заданном в виде суммы синусоиды и апериодической составляющей, представлен на рис.2. Вид заданного первичного тока обычен при переходном процессе короткого замыкания в цепях электрических систем. Вид кривой вторичного тока весьма характерен и описан. Как видно из рис.2, значения мгновенной погрешности превосходят 90%.

```
REAL I1, I1M, I2M, I2, L, I2E, I1J  
DATA W1, W2, S, CL, L, R/2., 80., 00023., 238., 001, 1.0/,  
     C1, C2, C3/1.76, 119.9, 3.01/,  
     T, I2, B, H, M, K, J/.0., .0., .00002, 2500, 29, 30/,  
     G, TA, I1M, I2M/1.57, 01, 1000., -1000./  
I1=I1M*SIN(314.159*T+G)+I2M*EXP(-T/TA)  
DO 100 I=1,M  
H1=I1*W1/CL-I2*W2/CL  
IF (I1.NE.0) P=100*I1J/I1  
IF (I1.NE.0) P2=100*(I2*W2/W1)/I1  
K=K+1  
IF(K.NE.J) GO TO 10  
TI1=I1/(W2/W1)  
TI1J=I1J/(W2/W1)  
WRITE (3,1) T, I1, I1J, P, I2, P2, TI1, TI1J  
1 FORMAT (1X, F7.5, 2F11.3, 2X, F6.2, F9.3, 2X, F6.2, 2F9.4)  
K=0  
10 FB=C2*SINH(C3*B)  
F1=C1*(H1-FB)  
F2=F1*W2*S/L-I2*R/L  
BE=B+F1*H  
I2E=I2+F2*H  
T=T+H  
I1=I1M*SIN(314.159*T+G)+I2M*EXP(-T/TA)  
H1E=I1*W1/CL-I2E*W2/CL  
FBE=C2*SINH(C3*BE)  
F1E=C1*(H1E-FBE)  
F2E=F1E*W2*S/L-I2E*R/L  
B=B+(F1+F1E)*H/2  
I2=I2+(F2+F2E)*H/2  
CALJ. FENIX(I, H, I2, I1J, BJ)  
D=ABS(B-BE)  
IF (ABS(B).GT.0.005.AND.D.LT.0.0005)H=H*2  
H- (D.GT.0.001)H=H/2  
100 CONTINUE  
STOP  
END
```

Рис.1. Программа цифровой динамической модели одной ступени трансформатора тока с учетом гистерезиса

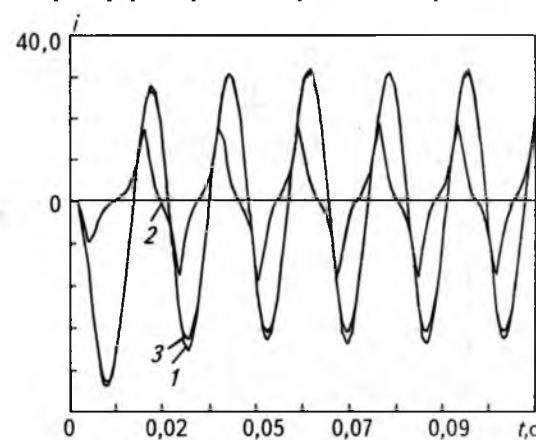


Рис.2. Результаты "математического эксперимента" цифрового моделирования одной ступени трансформатора тока с коррекцией погрешности:

1 — первичный ток; 2 — приведенный к первичной цепи вторичный ток; 3 — "восстановленный" первичный ток

```

SUBROUTINE FENIX (I, H, I2, I1, B)
REAL I1, I2, I20, L, M, M1, M2, N
IF (I.GT.1) GO TO 1
DATA W1, W2, S, CL, L, R/2., 80., 00023., 238., 001, 1.0,
*      C1, C2, C3, BO, Y0/1.76, 119.9, 3.01, 0.0/
BC=CL/W1
M=1/(W2*S)
M1=M*R
M2=M*L
N=W2/W1
I20=0
1 Y0=Y0+M1*I2*H+M1*(I2-I20)*H/2
I20=I2
B=Y0+M2*I2
H1=C2*SINH(C3*B)
I1=H1*BC+I2*N
RETURN
END

```

Рис.3. Подпрограмма коррекции погрешности

Корректирующий алгоритм [2] основан на том же математическом описании (1) и реализован в виде программы, представленной на рис.3. Идея коррекции почти тривиальна и состоит в том, что если (1) содержит однозначную зависимость $i_2(i_1)$, то там же заключена и обратная зависимость $i_1(i_2)$, которая ведет от истинного погрешностью вторичного тока к истинным значениям первичного. В те моменты, когда мгновенная погрешность более 98%, достигается точность коррекции более 98%. Результат работы корректирующей программы, полученный в математическом эксперименте, представлен на рис.2 в виде кривой приведенного вторичного тока, практически совпадающей с истинным первичным током.

Алгоритм цифровой модели каскадного трансформатора тока представлен на рис.4. Со-

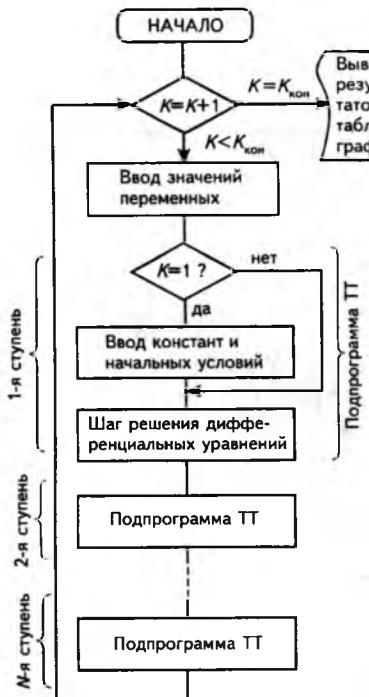


Рис.4. Алгоритм программы цифровой динамической модели каскадного трансформатора тока

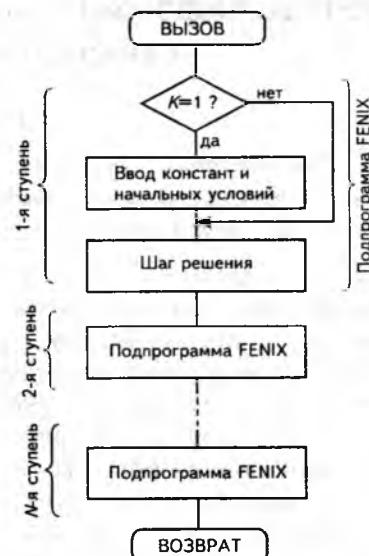


Рис.5. Алгоритм программы коррекции погрешности каскадного трансформатора тока

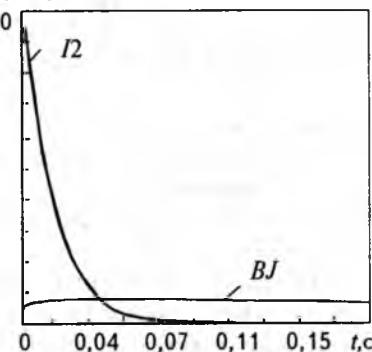


Рис.6. Измерение постоянного тока с помощью обычного трансформатора тока — отслеживание магнитной индукции в сердечнике

ответствующий корректирующий алгоритм — на рис.5. Число каскадов может быть любым.

Эти алгоритмы могут использоваться в компьютерных устройствах релейной защиты и измерений, например фиксирующих приборах.

Поскольку корректирующая программа отслеживает значение магнитной индукции в сердечнике трансформатора тока, неожиданно оказывается, что с ее помощью можно измерять постоянный ток, используя обычный трансформатор тока. Известные методы измерения больших постоянных токов все основаны на контроле индукции. На рис.6 представлен результат работы корректирующей программы совместно с программой моделирования при подаче в трансформатор тока толчком постоянного тока. Точность измерений составляет 96—99%. Таблицы результатов приведены в приложениях 1, 2 (1 — начало, 2 — окончание процесса).

Список литературы

- Соколик Л.И. Математическая модель трансформатора тока с учетом гистерезиса//Изв.вузов. Энергетика. 1982. № 9. С.100—102.
- Соколик Л.И., Силаков Е.П. О возможности коррекции погрешности трансформаторов тока с помощью вычислительной техники//Автоматические и автоматизированные системы управления в энергосистемах. М., 1973. С. 35—39.

Приложение 1

T	I1	I1J	I1J/I1, %
0,00000	1000,000	000	.00 %
0,00016	1000,000	889,531	88,95
0,00163	1000,000	996,377	99,64
0,00411	1000,000	996,619	99,66
0,00631	1000,000	996,170	99,62
0,00831	1000,000	995,033	99,50
0,01015	1000,000	994,156	99,42
0,01185	1000,000	993,933	99,39
0,01345	1000,000	992,986	99,30
0,01501	1000,000	992,431	99,24
0,01651	1000,000	991,730	99,17
0,01801	1000,000	990,455	99,05
0,01941	1000,000	990,237	99,02
0,02079	1000,000	987,829	98,78
0,02209	1000,000	988,878	98,89
0,02343	1000,000	987,066	98,71
0,02473	1000,000	986,192	98,62
0,02599	1000,000	986,909	98,69
0,02725	1000,000	986,851	98,69
0,02851	1000,000	986,074	98,61
0,02975	1000,000	985,219	98,52
0,03097	1000,000	984,435	98,44
0,03217	1000,000	983,907	98,39
0,03335	1000,000	984,526	98,45
0,03455	1000,000	983,893	98,39
0,03573	1000,000	983,564	98,36
0,03689	1000,000	983,626	98,36
0,03805	1000,000	983,296	98,33
0,03921	1000,000	982,547	89,25
0,04035	1000,000	982,399	98,24
0,04149	1000,000	981,835	98,18
0,04261	1000,000	982,080	98,21
0,04373	1000,000	981,969	98,20
0,04485	1000,000	981,626	98,16
0,04597	1000,000	980,971	98,10

Приложение 2

T	I1	I1J	I1J/I1, %
0,14911	1000,000	969,077	96,91
0,15017	1000,000	968,649	96,86
0,15122	1000,000	968,170	96,82
0,15226	1000,000	969,184	96,92
0,15332	1000,000	968,856	96,89
0,15438	1000,000	968,483	96,85
0,15544	1000,000	968,046	96,80
0,15650	1000,000	967,555	96,76
0,15754	1000,000	968,602	96,86
0,15860	1000,000	968,268	96,83
0,15966	1000,000	967,881	96,79
0,16072	1000,000	967,433	96,74
0,16176	1000,000	968,335	96,83
0,16282	1000,000	968,018	96,80
0,16388	1000,000	967,680	96,77
0,16494	1000,000	967,277	96,73
0,16600	1000,000	966,821	96,68
0,16704	1000,000	967,755	96,78
0,16810	1000,000	967,431	96,74
0,16916	1000,000	967,084	96,71
0,17022	1000,000	967,666	96,67
0,17128	1000,000	966,194	96,62
0,17232	1000,000	967,167	96,72
0,17338	1000,000	966,842	96,68
0,17444	1000,000	966,479	96,65
0,17550	1000,000	966,047	96,60
0,17656	1000,000	965,569	96,56
0,17760	1000,000	966,585	96,66
0,17866	1000,000	966,253	96,63
0,17972	1000,000	965,874	96,59
0,18078	1000,000	965,431	96,54
0,18182	1000,000	966,309	96,63
0,18288	1000,000	965,999	96,60
0,18394	1000,000	965,659	96,57
0,18500	1000,000	965,266	96,53
0,18606	1000,000	964,816	96,48
$T = 0,18676$			

Жидкометаллические контакты для вакуумных контакторов

В.Г.ДЕГТАРЬ, доктор техн.наук

Рассмотрены перспективы применения жидкотемпературных контактов для вакуумных контакторов низкого напряжения на большие токи. Указаны достоинства жидкотемпературных контактов, благодаря которым имеются возможности улучшения массогабаритных показателей и снижения собственного энергопотребления коммутационных аппаратов. Даны сведения по разработанным новым композиционным жидкотемпературным контактным материалам и результаты экспериментальных исследований опытных образцов вакуумных камер с композиционными жидкотемпературными контактами.

Применение вакуумных дугогасительных камер для коммутации больших переменных токов электрическими аппаратами началось несколько десятилетий назад.

Надежность работы, небольшие массы и габариты, отсутствие необходимости эксплуатационного ухода за контактным узлом способствуют быстрому внедрению этого вида аппа-

ратов как в общепромышленные энергообъекты, так и в электроустановки автономных объектов.

Место, которое занимают вакуумные выключатели в современной коммутационной технике, определяется спросом на указанную аппаратуру на мировом рынке.

Так, по данным фирмы "Siemens" от общего

количества изготовленных в мире выключателей на напряжения от 3,6 до 36 кВ уже к 1990 г. на вакуумные выключатели приходилось 70%, на масляные — 10% и на электромагнитные — 5%.

Незначительная энергия дуги (вследствие небольшого напряжения на дуге, короткой ее длины и малой продолжительности горения), небольшая эрозия контактов, очень быстрое восстановление электрической прочности после отключения тока и небольшое потребление энергии приводным устройством являются главными отличительными особенностями вакуумных выключателей.

Несмотря на описание достоинства вакуумных выключателей, они в последнее время нашли широкое применение только на высокие (свыше 3 кВ) напряжения и в меньшей степени применяются в установках низкого (меньше 1 кВ) напряжения.

Объяснением этому может быть тот факт, что в установках низкого напряжения общепромышленного назначения вопрос применения вакуумных камер был до последнего времени менее актуальным, чем в распределителях высокого напряжения.

Тем не менее, все возрастающие требования по надежности электрической аппаратуры, ее долговечности, влиянию ее работы на окружающую среду, а также требования по снижению энергопотребления и эксплуатационных расходов привели к тому, что в отечественной и мировой практике стали находить свое место вакуумные коммутационные аппараты низкого напряжения.

Особенно этот вопрос актуален для энергетических установок автономных объектов.

На основе разработок АО "ЭНАС" (бывший ВНИИэлектроаппарат) г. Харькова Минусинский завод высоковольтных вакуумных выключателей (МЗВВ) изготавливает вакуумные контакторы серии КТ12Р и КТ17Р. Изготовителем вакуумных камер является Донецкий опытный электромеханический завод (ДОМЗ).

Завод предлагает контакторы КТ12Р33, КТ12Р37, которые имеют соответственно массы 18,5 и 32 кг и номинальные токи 160 и 400 А при номинальном напряжении переменного тока 660 и 1440 В. Контакторы типа КТ17Р выпускаются на напряжения 660 и 1140 В при номинальных токах 160, 250 и 400 А. Массы этих контакторов колеблются в пределах от 6,2 до 14,8 кг.

Среди отечественных производителей вакуумного коммутационного электрооборудования можно назвать также предприятие "Таврида-электрик", которое производит кроме высоковольтных выключателей (на 12 кВ) низковольтные вакуумные контакторы типа КВ/TEL на номинальное напряжение 660 В переменного тока.

Механический ресурс контактора составляет 5 млн. циклов ВО, номинальный ток контактора — 630 А при напряжении 660 В.

Среди зарубежных образцов вакуумных контакторов — разработки фирмы ABB, реализация которых на базе американских вакуумных камер осуществляется в филиале фирмы в г. Брно в Чешской республике. Номинальный ток контактора 400 А при номинальном рабочем напряжении 660 В.

Таким образом, в последнее время получают развитие вакуумные коммутационные аппараты не только высокого, но и низкого (менее 1000 В) напряжения.

Свойства вакуумных выключателей и контакторов позволяют, используя высокий вакуум (10^{-4} — 10^{-6} мм рт.ст.) в дугогасительных камерах, достичь высоких параметров по номинальным и отключаемым токам.

При отключении вакуумным выключателем цепи переменного тока гашение электрической дуги облегчается условием прохождения тока через нуль. При отключении вакуумным выключателем цепи постоянного тока для успешного гашения электрической дуги, возникающей между контактами, необходимо искусственно создавать условия снижения тока до нулевого значения в течение времени надежного восстановления электрической прочности межконтактного промежутка.

Кроме этого, в вакуумных выключателях одной из основных проблем являются большие номинальные и сквозные токи, поскольку в силу известных причин в этом случае затруднена теплоотдача от контактного перехода через вакуум.

Таким образом, для повышения параметров вакуумных коммутационных аппаратов необходимо, кроме традиционных, искать новые решения [1].

Для контактного электроаппаратостроения можно отметить четыре качественных скачка его развития, которые характеризовались применением пластмасс для изоляционных частей аппаратов, использованием деионных решеток для дугогасительных систем, развитием композиционных контактных материалов и герметизацией контактных узлов с контролируемой атмосферой.

В настоящее время существенный скачок в развитии контактных электрических аппаратов обещают жидкометаллические контакты (ЖМК) и контактные устройства на их основе.

Жидкометаллические контакты для коммутационной аппаратуры

Применение ЖМК в контактных электрических аппаратах обеспечивает малое переходное сопротивление, отсутствие свариваемости при больших токах и высоких температурах, отсутствие вибраций (дребезга) при включении,

независимость контактного сопротивления от контактного нажатия, независимость состояния контактной поверхности от числа срабатываний, отсутствие электродинамических сил сужения (сил Двайта) в контактной зоне, малые электрические и механические потери в скользящих контактных узлах, возможность регенерации контактного материала в процессе коммутации, возможность циркуляции жидкого металла с целью интенсификации охлаждения контактного узла [2].

На базе ЖМК можно создавать жидкометаллические контактные устройства (ЖМКУ), которые представляют собой малогабаритные герметизированные контактные устройства с электромагнитным, тепловым, пневматическим, гидравлическим, магнитогидродинамическим или другим приводным механизмом, в которых имеет место существенная экономия проводниковых и магнитных материалов, отсутствие серебросодержащих и других остродефицитных контактных материалов, малые электрические потери в контактных переходах, малое потребление энергии на управление.

Кроме того, коммутационные аппараты с композиционными ЖМК обладают достоинствами как твердометаллических, так и жидкометаллических аппаратов, в том числе их работоспособность не зависит от положения в пространстве, уровня и направления силового воздействия [3].

Кроме ртути в настоящее время используются галлий и его сплавы, а также сплавы щелочных металлов с температурами плавления до -60°C и ниже [4].

Таким образом, можно сделать вывод, что ЖМК должны найти широкое применение не только в электрических аппаратах объектов автономного электропитания, но и в электрических аппаратах общепромышленного применения.

К настоящему времени проблемам ЖМК посвящены 2 монографии, опубликовано более 1000 научных статей, выдано более 4000 патентов и авторских свидетельств, только в странах бывшего СССР защищено 3 докторских и более 20 кандидатских диссертаций.

К настоящему времени разработаны основные принципы конструирования и синтеза жидкометаллических контактных узлов и электрических аппаратов с улучшенными технико-экономическими показателями, на основе которых, в частности, созданы образцы токосъемных устройств мощного гидрогенератора и метрологические токосъемники, проведены разработки жидкометаллических коммутационных аппаратов пережимного типа и коммутационных аппаратов релейного диапазона токов, разработаны основы конструирования коммутационных аппаратов с композиционными жид-

кометаллическими контактами, направленные на повышение ресурса работы и уменьшение массогабаритных показателей контактных узлов, разработан ряд жидкометаллических соединителей для работы в электрических сетях большой мощности [5].

Таким образом, уровень развития ЖМК в настоящее время достаточно высок, а их достоинства настолько существенны и очевидны, что их применение в вакуумных коммутационных аппаратах должно дать существенный технический и экономический эффект.

Анализ возможностей применения коммутационных аппаратов с композиционными жидкометаллическими контактами

Одним из основных недостатков жидкометаллических контактов является зависимость их работоспособности от положения в пространстве и от направления и уровня механических воздействий.

Созданные нами композиционные жидкометаллические контакты не обладают этим недостатком.

Композиционным жидкометаллическим контактным материалом называется контактный материал, состоящий из твердого пористого каркаса, пропитанного легкоплавким металлом или сплавом.

Электрические контакты на основе такого материала обладают достоинствами жидкометаллических и твердометаллических контактов и почти не имеют присущих им недостатков.

В направлении синтеза композиционных жидкометаллических контактных материалов имеются два пути: создание материала на основе диэлектрического пористого каркаса, пропитанного жидким металлом или его пастой, и создание контактного материала, содержащего твердометаллический пористый каркас, пропитанный жидким металлом [6].

Кроме того, каркас может иметь организованную или неорганизованную структуру и выполняться из жесткого или эластичного материала.

В настоящее время композиционные жидкометаллические контактные материалы находят применение в коммутирующих, скользящих и неподвижных контактных узлах.

Основным недостатком композиционных жидкометаллических материалов с диэлектрическим каркасом является трудность, а иногда и невозможность смачивания легкоплавкими металлами и сплавами диэлектрических материалов. Применение же металлического пористого каркаса для пропитки его жидким металлом или сплавом дает возможность получать более надежные контактные материалы.

Из краткого анализа известных композиционных жидкокометаллических контактных материалов можно сделать вывод, что контактные материалы с несмачиваемыми каркасами должны быть исключены из дальнейшего рассмотрения, так как система, в которой поры каркаса заполнены несмачивающей жидкостью, нестабильна как в механическом, так и в термодинамическом смысле, а использование таких контактов в вакууме и при повышенных температурах не представляется возможным.

Контактные материалы со смачиваемыми каркасами как организованной, так и неорганизованной структуры заслуживают более подробных разработок и исследований.

Композиционные ЖМК обладают целым рядом преимуществ по сравнению с твердометаллическими и жидкокометаллическими контактами. Контактное сопротивление этих контактов не зависит от контактного нажатия, переходное сопротивление может быть равным нулю, контакты не подвержены свариванию, вибрация контактов при замыкании отсутствует, работоспособность контактов не зависит от направления силового воздействия, динамические характеристики не уступают динамическим характеристикам твердометаллических контактов и т.п.

Однако для достижения указанных достоинств композиционных ЖМК необходимо удовлетворить основным принципам разработки композиционных ЖМК:

- каркас композиционного ЖМК должен надежно смачиваться жидким металлом;
- при механических силовых воздействиях жидкий металл должен надежно удерживаться в каркасе;
- контактирование всегда должно происходить через жидкий металл, ибо в противном случае контактирование примет твердометаллический характер и при протекании больших токов может произойти сваривание контактов;
- при горении электрической дуги на поверхности композиционных ЖМК не должно происходить соприкосновения электрической дуги и каркаса;
- относительное содержание жидкого металла в порах каркаса должно соответствовать требуемым механическим воздействиям, в том числе и с учетом термического воздействия;
- при наличии подпиточных полостей их капиллярные характеристики должны быть согласованы с капиллярными характеристиками контактов.

Одним из первых композиционных ЖМК был контактный материал, выполненный в виде концентрических трубок, зазоры между которыми заполнены жидким металлом. Трубки ориентируются друг относительно друга таким образом, что зазоры между ними обеспе-

чивают капиллярные силы, надежно удерживающие жидкий металл между стенками трубок. Такая конструкция позволяет сколь угодно варьировать площадь контактной поверхности, а следовательно, создавать контакты на большие токи.

С целью дальнейшего упрощения технологии изготовления был предложен сильноточный ЖМК, который выполнен из металлической ленты, смоченной жидким металлом и свернутой в спираль. Зазоры между витками спирали образуют капилляры, по которым жидкий металл из подпиточной полости поступает в зону контактирования. Зазоры между витками можно регулировать при помощи специального устройства.

Наиболее ответственной операцией при изготовлении композиционных ЖМК является операция по достижению надежного смачивания твердометаллической составляющей. При использовании в качестве легкоплавкого металла галлия или его сплавов с индием и оловом, смачивание твердых металлов всегда наталкивается на определенные трудности, поскольку для обеспечения высокой эрозионной стойкости в качестве твердометаллической составляющей целесообразно использовать такие плохо смачиваемые тугоплавкие металлы, как вольфрам, рений или молибден.

Разработанные методы получения изделий с ориентированными каналами в виде стержней, труб и профилей различного сечения из меди, алюминия и стали при пропитке их жидким металлом позволяют получать композиционные жидкокометаллические материалы анизотропной структуры с размерами капиллярных каналов до десятков микрометров.

Нами совместно с ИПМ НАН Украины разработан широкий класс композиционных жидкокометаллических контактных материалов с жесткими и эластичными каркасами из вольфрама и молибдена, изготовленными методами порошковой металлургии, с дальнейшей пропиткой их жидким галлием, оловом или сплавом галлия с индием и оловом.

С целью улучшения характеристик контактного материала его жесткий пористый каркас выполнен неоднородным, причем таким образом, чтобы в процессе работы контакта происходила подпитка контактирующей области жидким металлом из глубинных областей.

Неоднородность каркаса может быть достигнута за счет применения исходного порошка с различной зернистостью, за счет различных усилий прессования контактной и основной частей каркаса и т.п. Неоднородный каркас обеспечивает разность капиллярных давлений в отдельных его частях, что приводит к более интенсивной пропитке жидким металлом сло-

ев, близких к поверхности контактирования, в результате чего улучшается стабильность переходного сопротивления, его независимость от контактного нажатия и предотвращается сваривание контактов при больших токах.

При изготовлении эластичного жидкometаллического композиционного контактного материала исходным материалом для каркаса служит вольфрамовая проволока, из которой выполняют ткань в виде полосы организованной структуры путем плетения. Затем полученную полосу помещают в цилиндрическую заготовку, прессуют и пропитывают галлием или его сплавами в среде водорода.

Исполнение каркаса эластичным позволяет при небольших контактных нажатиях уменьшить его объем и пористость, что приводит к более интенсивной подпитке рабочей поверхности контакта жидким металлом, и, следовательно, повышает стабильность контактных характеристик. При разрыве цепи снимается контактное нажатие и каркас возвращается в исходное положение.

Кроме того, эластичные каркасы демпфируют ударные нагрузки при замыкании композиционных ЖМК.

Довольно хорошо зарекомендовали себя контактные пары, в которых один контакт выполнен на основе эластичного каркаса, а другой — на основе жесткого.

Некоторые характеристики разработанных композиционных ЖМК приведены в таблице.

Применение разработанных контактов позволяет экономить драгоценные металлы, существенно уменьшить габариты и массы приводных механизмов коммутационных аппаратов за счет малых требуемых контактных усилий, что влечет за собой существенную экономию меди, электротехнической стали и других материалов приводных устройств коммутационных аппаратов.

Путем увеличения площади рабочих поверхностей контактов можно в широких пределах повышать токовые нагрузки на контактах.

Разработанные жидкometаллические композиционные контактные материалы и контакты по техническому уровню превосходят отечественные и зарубежные аналоги.

Несмотря на достигнутые результаты в области исследований и разработок жидкometаллических контактов и контактных устройств при их применении возникает ряд вопросов, решение которых необходимо для создания высокоэффективных и надежных жидкometаллических контактных устройств.

К ним можно отнести необходимость обеспечения устойчивости жидкого состояния легкоплавкой составляющей контактного узла, обеспечение стабильности и низкого уровня контактного сопротивления, дальнейшую раз-

Характеристики композиционных жидкometаллических контактных материалов

Композиция	Тип каркаса	Плотность γ , $10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$	Объем жидкой фазы, %	Удельное электрическое сопротивление r , 10^{-8} Ом
Вольфрам-сплав галлия, индия и олова	Жесткий	13,4	45	9,7
Вольфрам-сплав галлия, индия и олова	Упругий	11,6	58	11,7
Вольфрам-галлий	Жесткий	13,3	45	9,4
Вольфрам-галлий	Упругий	11,5	58	10,1

работку теории и основ синтеза жидкometаллических контактных узлов, совершенствование технологий их изготовления, выбор материалов контактных узлов и разработку перспективных композиционных материалов.

Среди теоретических вопросов заслуживают внимания исследования термических и электродуговых явлений, направленные на уменьшение габаритов и повышение долговечности электрических аппаратов и устройств, использующих жидкometаллические контакты.

Положительные свойства жидкometаллических контактов диктуют необходимость разработки принципиально новых дугогасительных устройств и приводных механизмов жидкometаллических коммутационных аппаратов. Конечной целью практического использования жидкometаллических контактов должно быть создание коммутирующих и скользящих модулей, в том числе и для вакуумных камер.

Результаты экспериментальных исследований

На базе стандартной вакуумной камеры с твердометаллическими контактами Львовского завода «ЛЕВКОНТ» Институтом проблем материаловедения НАН Украины и ПО «Полярон» изготовлена вакуумная камера с композиционными жидкometаллическими контактами (вольфрамовый каркас, пропитанный эвтектическим сплавом галлия с индием и оловом). Длительные сравнительные испытания на нагрузочную способность показали, что номинальный длительный ток вакуумной камеры с композиционными жидкometаллическими контактами превышает длительный ток стандартной камеры в 1,5 раза при прочих равных условиях.

Кроме этого, в результате испытаний были выявлены возможные пути дальнейшего совершенствования вакуумных камер для низковольтных контакторов за счет более полного использования достоинств жидкometаллических композиционных контактов.

Список литературы

1. Брон О.Б. Проблемы контактов в сильноточном аппаратостроении//Электрические контакты. Пути повышения качества и надежности. Киев, 1985. С. 3—7.

2. Годжело А.Г., Дегтярь В.Г. Контакты электрических аппаратов. М.: МЭИ, 1980.

3. Дегтярь В.Г., Иванов А.В. Разработка и исследование сильноточных жидкокометаллических коммутационных аппаратов//Низковольтное аппаратостроение. Чебоксары: ВНИИР. 1979. С.110—115.

4. Дегтярь В.Г. Жидкокометаллические коммутационные аппараты//Тр.МЭИ. 1978. Вып. 381. С.43—52.

5. Дегтярь В.Г., Иванов А.В. Принципы построения сильноточных жидкокометаллических коммутационных аппаратов //Тр. МЭИ. 1979. Вып. 423. С.42—45.

6. Свойства контактных материалов из псевдосплавов с жидкокометаллическим наполнителем//В.Г.Дегтярь, А.В.Иванов, Л.И.Костенецкая и др.//Электрические контакты. Пути повышения качества и надежности. Киев: ИПМ АН УССР. 1981. С. 75—79.

Современные подходы к проектированию электромагнитных контакторов пускателей общепромышленного применения

**И.З.АХАЗОВ, В.Е.МАНДРАВИН, инженеры (АО "ВНИИР", г. Чебоксары),
Г.П.СВИНЦОВ, канд. техн. наук, (Чувашский ГУ)**

Изложен взгляд на конструкторский аспект проектирования контакторов магнитных пускателей общепромышленного применения, обеспечивающий расширение их функциональных, эксплуатационных возможностей, снижение материальных и трудовых затрат на изготовление и эксплуатацию.

Электромагнитные воздушные контакторы общепромышленного применения остаются одним из основных коммутационных элементов схем автоматики и управления. Потребность в них не только не снижается, а имеет тенденцию роста. Поэтому основным направлением их развития на ближайшие 10—15 лет по-прежнему остается снижение материальных и трудовых затрат на изготовление при одновременном улучшении эксплуатационных качеств. Одним из новых аспектов их развития является расширение функциональных возможностей.

Существенное снижение материальных затрат может дать расширение ряда номинальных токов, определяемых ГОСТ 2491-82 и ГОСТ 11206-75, за счет возможности более дифференцированного использования контакторов для управления нагрузками определенной мощности (в основном асинхронными двигателями с короткозамкнутым ротором).

В настоящее время отечественной промышленностью не выпускаются пускатели на номинальный ток 50 А, вследствие чего для управления двигателями мощностью 25 кВт приходится применять пускатели ПМА-4000 и ПМЛ-4000 на номинальный ток 63 А. Такая же картина и с пускателями на номинальный ток 32 А, из-за отсутствия которых в эксплуатации для управления двигателями мощностью 15 кВт применяются пускатели ПМА-3000, ПМЛ-3000 и ПМ12-040 на номинальный ток 40 А. Освоение производства пускателей на токи 32 и 50 А позволит получить значительную экономию ак-

тивных материалов (меди, электротехнической стали, серебра) при изготовлении пускателей. Целесообразным является ряд токов: 4; 6,3; 10; 16; 25; 32; 40; 50; 63; 80; 100; 125; 160; 250; 400; 630 А, что соответствует мощностям управляемых электродвигателей: 2; 3; 5,5; 7,5; 11,5; 15; 18; 25; 30; 37; 50; 60; 75; 125; 200, 315 кВт.

Для сравнения для категории применения АС3: фирма "Telemecanique" (Франция) [1] в настоящее время выпускает трехполюсные контакторы серии LC1-D, LPI-D на ряд номинальных токов: 4; 6,3; 9; 12; 18; 25; 32; 40; 50; 65; 80; 95 А и контакторы LC1-F — на токи: 115; 150; 185; 225; 265; 330; 400; 500; 630; 780 А; фирма "Siemens" (Германия) [2] выпускает контакторы серии 3TF на ряд токов: 4; 6,3; 9; 12; 16; 17; 32; 38; 45; 63; 75; 110; 170; 250; 400; 630; 820 А; фирма "Mitsubishi" (Япония) [3] выпускает контакторы серий S-K (SD-K) на токи: 9; 12; 16; 17; 22; 30; 40; 50; 62; 85; 105; 120; 150; 180; 250; 300; 400; 630; 800 А; фирма "Lovato" (Италия) [4] выпускает контакторы МС на токи: 6; 9 А, контакторы серии BF на токи: 9; 12; 16; 20; 25; 32; 38; 50; 65; 80; 95; 110; 150; 180; 250; 400; 500; 630 А.

При этом наметились вполне определенные тенденции в развитии конструкций контакторов — общие и специфические на различных отрезках этого ряда токов.

Общие черты в конструкциях контакторов

1. Этажная компоновка основных его частей (функциональных модулей) с нижним расположением приводного электромагнита, над ко-

торым размещается контактно-дугогасительная система (КДС). Это обеспечивает минимальную установочную площадь, что существенно для аппаратуры, предназначенной для установки в комплектные устройства, и предоставляет возможность быстрого обслуживания и профилактики КДС аппарата. Модули вспомогательных контактов устанавливаются "параллельно" КДС и приводу [1–4].

2. Использование простейшей прямоходовой кинематической схемы, когда траверса с контактами связана с якорем электромагнита непосредственно либо через ось (шпонку) [1–4].

3. Во многих контакторах предпочтение отдается однокатушечным приводным электромагнитам, преимущественно с Ш-образной конфигурацией магнитной цепи.

4. Типоисполнение контакторов, предназначенных для их совместной работы с электронными аппаратами и микропроцессорными устройствами, комплектуются ограничителями перенапряжений, возникающих при включении и отключении обмоток приводных электромагнитов. Ограничители устанавливаются на элементах конструкции аппарата, в частности и на жестких выводах катушек [1–4].

5. Все контакторы на номинальные токи из указанного ряда имеют исполнение по степени защиты IP20, что существенно повышает безопасность их обслуживания, исключая возможность случайного прикосновения к выводам аппарата, находящимся под напряжением [1–4].

6. Предусматриваются типоисполнения А, Б, В, рассчитанные на различные сроки службы контактов, что позволяет экономить остродефицитные серебросодержащие материалы.

Специфические особенности конструкций

1. Контакторы, реле-контакторы на номинальные токи 4; 6,3 А являются аппаратами наиболее массового применения. Поэтому конструкции этих аппаратов должны в максимальной степени удовлетворять требованиям по технологичности, обеспечивающим автоматизацию изготовления и сборки большинства деталей и узлов. Здесь является достаточно очевидным необходимость использования пластмасс с широким спектром физико-химических свойств, в частности удовлетворяющих требованиям пожаробезопасности, позволяющих изготавливать тонкостенные корпусные детали, дугогасительные камеры, каркасы катушек и сократить затраты за счет уменьшения разновидностей используемых материалов. Заметную экономию электротехнической стали может дать оптимизация конфигурации магнитной системы с учетом технических требований и минимизация отходов листовой стали при штамповке. Существенный выигрыш затрат обмоточной меди и

снижение потребляемой контакторами мощности сулит расширение ряда номинальных диаметров проводов. Заметную экономию цветных металлов: меди, латуни, алюминия может обеспечить малоотходная технология изготовления короткозамкнутых видов для приводных электромагнитов переменного напряжения.

Сопоставление электромагнитов постоянного и переменного напряжения относительно большой мощности [5] свидетельствует о значительно меньших затратах у вторых обмоточной меди и электротехнической стали. Эта разница уменьшается со снижением мощности электромагнита. Поэтому сократить затраты на производство позволяет возможность реализовать маломощные электромагнитные приводы постоянного и переменного напряжения примерно в одинаковых габаритных размерах [6] и встроить их в универсальный корпус минимальных размеров. Именно оптимизированный электромагнитный привод постоянного напряжения [7] позволил реализовать такую возможность в конструкции реле-контактора ПМ12-004 на номинальный ток 4 А.

В табл.1 приведены технико-эксплуатационные характеристики и конструктивные параметры реле-контакторов на номинальный ток 4 А ведущих фирм, производящих аппаратуру низкого напряжения.

2. В контакторах с номинальным током не более 63 А предусматривается возможность установки контактных приставок с номинальными токами 2,5–10 А, в том числе обеспечивающих и выдержку времени в диапазоне от 0,1 до 30 с и надежное функционирование при токах нагрузки от 10 мА и выше и напряжении в цепи 24 В. Последнее достигается за счет использования контактов с "притиранием", обеспечивающих очистку контактных поверхностей от пыли, грязи, окислов и пр. Установка всех приставок осуществляется над контактной системой. Другой характерной особенностью конструкций для указанного диапазона токов является возможность установки аппарата и на рейке с профилем в виде Δ (Р2-1 по ОСТ 16.0. 684.423-82) при помощи защелки.

Сочленение пластмассового корпуса и узла дугогасительной камеры производится также упругими защелками, являющимися либо элементами корпуса и камеры, либо самостоятельными деталями (пружинно-фиксаторная технология сборки с безрезьбовыми креплениями).

Для гашения дуги целесообразно использование двукратного разрыва цепи пластинчатыми мостиковыми контактами, устанавливаемыми в окнах общей траверсы. При напряжении источника более 380 В для повышения эффективности дугогашения используются, как правило, П-образные ферромагнитные скобы, зак-

Таблица 1

Характеристики		ПМ12-004 (Россия)	С1-ЕС03 ТЕ [1] (Франция)	МСОА301АТ AGUT (Испания)	3TF20 "Siemens" [2] (Германия)
Номинальный рабочий ток (AC-3), А		4	6	4	5
Номинальное напряжение, В		380	380	380	660
Коммутационная износостойкость в AC-3, млн. циклов		1,0	1,0	1,0	0,8
Механическая износостойкость, млн. циклов		16,0	10,0	10,0	10,0
Потребляемая мощность ¹	S_h , В·А	23,0	40,0		15,0
	S_y , В·А	5,5	4,0		6,8
	P , Вт	4,0	4,0		3
Масса, кг		0,14	0,16	0,17	0,18
		0,17*	0,21	—	0,20
Компоновка		Этажная			
Привод		Ш	Ш	Ш	Ш
Габариты Ш×В×Г, мм		$44 \times 48 \times 59$ $44 \times 48 \times 89^{**}$	$44 \times 48 \times 56$ $44 \times 60 \times 96$	$45 \times 48 \times 56$ $45 \times 48 \times 78$	$45 \times 48^{***}$ $45 \times 48^{***}$

¹ S_h , S_y — мощность, потребляемая приводным электромагнитом переменного напряжения в режиме включения и удержания; P — мощность приводного электромагнита постоянного напряжения.

* — При управлении от источника постоянного напряжения.

** — С учетом контактной приставки.

*** — Не указывается в каталоге [2].

репляемые на камере и охватывающие торцевую область подвижных контактов и уменьшающие время горения дуги на контактах. Так, в контакторе магнитного пускателя ПМ12—040, рассчитанного на номинальный ток 40 А, на П-образной скобе предусмотрен "язычок", направленный в область столба дуги [8], что позволило увеличить эффективность дугогашения и уменьшить массогабаритные показатели дугогасительной камеры.

В конструкциях на токи до 63 А используется безвинтовое крепление выводов (шин) в корпусе контактора (фиксаторная технология сборки), что позволяет автоматизировать процесс сборки этого узла. В этой группе контакторов используется приводной электромагнит переменного напряжения с Ш-образным винтирующимся якорем, на среднем керне которого устанавливается коническая возвратная пружина, опирающаяся большим своим витком на каркас катушки. Это обеспечивает компактное выполнение привода, простое решение фиксации катушки. Амортизация электромагнита выполняется резиновыми вкладышами, установленными на пластинчатой консольной пластине, проходящей через ярмо.

В табл.2 приведены технико-эксплуатационные характеристики и конструктивные параметры трехполюсные контакторы магнитных пускателей на номинальный ток 40 А.

3. Трехполюсные контакторы на номинальные токи свыше 63 А выполняются на основе силуминового корпуса, обеспечивающего достаточную механическую прочность конструкции и выполняющего функции радиатора, рассеива-

вающего тепло, выделяемое в приводе. Токоведущий контур U-образной конфигурации обеспечивает поперечное электромагнитное дутье в области горения дуги и фиксируется винтами к общей пластмассовой колодке. В окнах колодки устанавливаются раздельные на каждый полюс траверсы с подвижными контактами, что обеспечивает их самоустановку на общей оси и снижает трение в направляющих движения.

Предпочтительны подвижные контакты корытообразного типа [1,2,9]. Внутри тонкостенного ферромагнитного каркаса закрепляется достаточно тонкая токоведущая пластина, концам которой припаиваются серебросодержащие контактные накладки. В торец контакта также припаивается ферромагнитная пластина, выполняющая функции дугогасительного рога. Такое выполнение подвижного контакта позволяет уменьшить его массу, вибрацию, увеличить жесткость, поверхность охлаждения, что и обеспечивает рост коммутационной способности и срока их службы.

В большинстве типов контакторов отечественного производства и производства иностранных фирм для уменьшения времени горения дуги на контактной накладке и уменьшения времени неподвижности дуги на входе дугогасительной решетки ее крайняя ферромагнитная пластина согнута в виде скобы, охватывающей U-образную часть шины и гальванически связанный с ней, а в направлении движения дуги предусматривается V-образный вырез. Перспективна конфигурация основных пластин со многими V-образными выступами и впадинами [2], в том числе со смещением расположения вершин этих

Таблица 2

Характеристики		Контакторы					
		отечественного производства			производства инофирм		
		ПМА 3000	ПМЛ 3000	ПМ12-040	LC1-D40 [1]	3TF45 [2]	BF-38 [4]
Номинальный рабочий ток (AC-3), А		40	40	40	40	38	38
Номинальное напряжение, В		660	660	660	660	660	660
Коммутационная износостойкость в AC-3, млн. циклов		2,5	2,0	2,0	1,7	1,0	1,6
Механическая износостойкость, млн. циклов		16	16	16	16	10	20
Потребляемая мощность, В·А	S_n	200	200	100	200	121	210
	S_y	25	20	9,5	20	16,5	18
Масса, кг		1,15	1,22	0,6	1,5	0,68	0,505
Компоновка		Этажная					
Тип привода		П	Ш	Ш	Ш	П	Ш
Габариты Ш×В×Г, мм		88×102×118	75×125×107	56,4×77×102	75×127×114	55×103×*	55×750×90

* В каталогах не указывается.

выступов на разных пластинах [2,3]. Обычно устанавливается 4 или 5 пластин около каждого из разрывов при напряжении коммутируемой цепи до 1000 В. Пластины устанавливаются в камере, в которой предусмотрены каналы выхода нагретого газа, охлаждаемого и дейонизируемого на

выходе концами пластин, выполняющими функции пламягасительной решетки. Камеры крепятся к колодке двумя подпружиненными и диагонально расположенным шпильками, что сокращает время обслуживания аппарата (пружинно-фиксаторная технология сборки).

Таблица 3

Характеристики		Контакторы					
		отечественного производства			производства инофирм		
		ПМА 6000	ПМЛ 6000	ПМ12-160	LC1-F150 [1]	3TF-52 [2]	S-K 150 [3]
Номинальный рабочий ток (AC-3), А		160	125	160	150	170	150
Номинальное напряжение, В		660	660	660	1000	1000	660
Коммутационная износостойкость в AC-3, млн. циклов		2,0	3,0	1,5	1,2	1,4	1,0
Механическая износостойкость, млн. циклов		16	10	10	10	10	5
Потребляемая мощность, В·А	I	530	500	515	550	910	320
	II	60	46	42	45	58	26
P _n , Вт	I	70,0	—	—	560	876	31
	II	70,0	—	—	4,5	11	31
Масса, кг	I	4,4	4,6	3,96	3,43	5,4	3,2
	II	8,3	—	—	3,0	—	4,3
Компоновка		Этажная					
Тип привода		П	Ш	Ш	Ш	П	Ш
Габариты Ш×В×Г, мм		143×193×192	156×141×155	137×175×162	164×170×165	147×190	120×160×145
I — Управление от источника постоянного напряжения.							
II — Управление от источника переменного напряжения.							

Предпочтительным является приводной электромагнит переменного напряжения с внешним якорем, обеспечивающий меньшие значения скорости соударения контактов и их вибрацию [10]. Уменьшение скорости движения и его разброса при различных фазах напряжения источника в момент подключения обмотки достигается при увеличении отношения индуктивного сопротивления к активному за счет повышения площади окна обмотки [11]. Это обстоятельство упрощает и согласование динамической тяговой и противодействующей характеристик привода (современные контакторы отечественного производства ПМ12-63, ПМ12-80, ПМ12-100, ПМ12-250). Конструкция обеспечивает быструю замену катушки.

Другим перспективным направлением в развитии приводов контакторов, пускателей является использование универсальных [1—4, 12] форсированных электромагнитных систем, пригодных для управления контакторами от источника постоянного и переменного напряжений.

Именно такой подход реализован в контакторах на номинальный ток выше 100 А, выпускаемых фирмами "Telemecanique", "Lovato". Это наряду с уменьшением материальных и трудовых затрат в производстве сулит сокращение эксплуатационных расходов за счет резкого уменьшения потребляемой ими мощности.

В табл.3 приведены основные технические параметры контакторов магнитных пускателей отечественного производства и производства инофирм, применяемых для управления двигателями мощностью 75 кВт.

Представленные в таблицах данные достаточно полно иллюстрируют положения, рассмотр-

ренные в статье, и свидетельствуют о том, что новая отечественная серия контакторов пускателей ПМ12 находится на уровне лучших образцов ведущих инофирм, а по ряду параметров и превосходит их.

Список литературы

1. Industrial Control and Automation Components. 1994—1995. TELEMECANIQUE.
2. Niederspannungs — Schaltgeräte und — Systeme. Sammelkatalog 1994/95. SIEMENS.
3. Magnetic motor and magnetic contactors series MS-K. S-K. MITSUBISHI.
4. LOVATO S.P.A. Componenti e sistemi per automazione. General catalogo. 1993.
5. Бугаев Г.А. Сопоставление электромагнитов постоянного и переменного тока//Электротехническая промышленность. Сер. Аппараты низкого напряжения. 1982. Вып. 6 (193). С. 18—19.
6. Софонов Ю.В., Свинцов Г.П., Ахазов И.З. Сравнение электромагнитов постоянного и переменного тока, работающих на одинаковую контактную нагрузку//Тезисы докладов. I Международная конференция по электромеханике и электротехнологии, г. Сузdalь, 1994. Ч. II. С. 202.
7. Ахазов И.З., Свинцов Г.П. Выбор размеров полюсов Ш-образного электромагнита постоянного тока//Изв.вузов. Электромеханика. 1994. № 3. С.19-23.
8. Пат. 1653017 РФ. Дугогасительная система/И.З.Ахазов, Э.Р.Гольцман, Д.П.Пономарев//Открытия. Изобретения. 1991. № 20.
9. Пат. 1773304 РФ. Контактный мостик/В.А.Тварнов, С.Е.Петрова, Т.А.Денисова//Открытия. Изобретения. 1992. № 40.
10. Софонов Ю.В., Свинцов Г.П. Влияние скорости движения подвижных частей на время вибрации контактов магнитного пускателя//Электротехническая промышленность. Сер. Аппараты низкого напряжения. 1983. Вып. 1 (104). С. 3-4.
11. Свинцов Г.П., Софонов Ю.В. К динамике приводных П-образных электромагнитов переменного тока//Изв. Вузов. Электромеханика. 1985. № 5. С. 72—78.
12. Клименко Б.В. Форсированные электромагнитные системы. М.: Энергоатомиздат, 1989.

К определению МДС срабатывания многоконтактного герконового реле

И.П.ИВАНОВ, канд.техн.наук (АО "ВНИИР", г. Чебоксары), Д.А.ОДИНЦОВА (ЧЭМК, г. Чебоксары),
Г.П.СВИНЦОВ, канд.техн.наук (Чувашский ГУ)

На основе экспериментального исследования получены зависимости МДС срабатывания двух-, четырех-, и шестиконтактных реле с герконами типа МКА 52202, которые учитывают влияние разброса МДС срабатывания герконов и их размещения внутри катушки реле.

Для расчета обмоточных данных герконового реле необходимо определить рабочую МДС обмотки F_p , которая больше МДС срабатывания F_{cp} реле в k_3 (коэффициент запаса) раз. Например, в [1] рекомендуется $k_3 = 1,5 \div 2$. В многоконтактных реле [2]

$$k_3 = k_F k_n, \quad (1)$$

где $k_F = 1,2 \div 2,0$ — коэффициент запаса по МДС, учитывающий разброс значений МДС

срабатывания герконов одного типа, колебание напряжения источника питания и изменение сопротивления обмотки при изменении ее температуры; $k_n = \sqrt[3]{n}$ — коэффициент, учитывающий взаимное влияние на срабатывание друг друга n герконов.

При наличии ферромагнитного экрана для определения k_3 вводится коэффициент эффективности экрана k_M , и тогда

$$k_3 = k_F k_n / k_M.$$

Значения коэффициентов k_n , k_M , установленные в процессе проектирования различных серий герконовых реле, приведены в [3].

Магнитодвижущая сила срабатывания F_{cp} , даже одноконтактного реле, зависит от размеров обмотки [2,3] и отличается от МДС срабатывания геркона F_r , измеренной в стандартной обмотке.

Существует выражение для коэффициента пересчета $k_{\text{пер}}$ МДС срабатывания одноконтактного реле, имеющего отличающуюся от стандартной длину обмотки [3]. Для некоторых типов герконов там же приведены значения коэффициентов, входящих в выражение для определения $k_{\text{пер}}$, а часть коэффициентов рекомендуется определять по кривым в [4]. В [5] приводятся результаты экспериментального определения $k_{\text{пер}}$ для многоконтактного реле на герконах типа КЭМ-2 с плоской обмоткой в виде графических зависимостей для реле с $n = 1; 2; 4; 8$.

Таким образом, имеется принципиальная возможность эмпирического установления связи между МДС реле F_p , МДС F_r герконов, геометрией обмотки (конфигурацией и размерами). Однако получение необходимых данных из различных источников информации и часто из графических зависимостей затрудняет решение этой задачи и мало приспособлено для использования ЭВМ.

Во ВНИИР разработаны промежуточные многоконтактные герконовые реле унифицированных серий РПГ16 и РПГ19, предназначенные для использования в системах управления и автоматики с источниками питания 12, 15, 24, 48, 60, 110 В постоянного и выпрямленного напряжения с пульсацией тока в обмотке порядка 6%. Реле РПГ19 заменяют реле серий РПГ4, РПГ10, РПГ14; реле РПГ16 — реле серий РПГ1, РПГ11, РПГ13.

При разработке этих унифицированных серий реле одним из основных требований являлось обеспечение минимальной их установочной площади, что позволяет существенно увеличить плотность установки аппаратуры в станциях управления. Для обеспечения этого требования герконы размещены внутри плоской катушки "в один ряд".

Для снижения потребляемой мощности и обеспечения защиты реле от влияния внешних магнитных полей на катушку надет П-образный ферромагнитный экран. Реле рекомендуется устанавливать так, чтобы стенка экрана соседнего реле обеспечивала полное экранирование каждого из реле в ряду. В качестве примера на рис.1 показана конструкция четырехконтактного реле серии РПГ19, где: 1 — герконы; 2 — катушка; 3 — экран; 4 — печатная

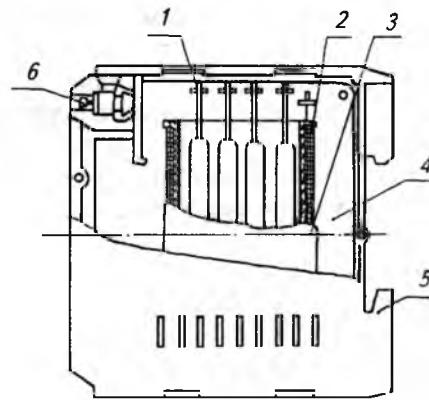


Рис.1. Конструкция реле серии РПГ19

плата; 5 — симметричный унифицированный пластмассовый корпус; 6 — винтовые зажимы для присоединения монтажных проводов. Конструкция реле позволяет устанавливать его как при помощи винтового крепления, так и на стандартную рейку [1]. Реле снабжены (рис.2) индикаторами $HL1$ напряжения на обмотке и помехограничивающими резисторами $R1$, $R2$ и диодом $VD1$ (перенапряжение при коммутации питания не превышает двукратного значения его номинального напряжения). Для расширения области применения реле в цепях управления [1] разработаны исполнения реле не только с герконами КЭМ1, но и с силовыми герконами типа МКА50201, МКС50201 и МКА52202.

Реле предназначены для коммутации нагрузок в режимах категорий применения DC-11, AC-11 по ГОСТ 17523-86 и DC-21, AC-21 по ГОСТ 12434-83. Потребляемая мощность реле в зависимости от конструктивных особенностей его исполнения — в пределах 0,12—6,3 Вт.

Расчетное определение МДС срабатывания F_{cp} герконового реле [6], особенно многоконтактного, является весьма сложной задачей. Связано это с трехмерной структурой магнитного поля геркона и системы герконов в многоконтактном реле.

Задача определения F_{cp} в виде математического выражения может быть решена проще на основе экспериментального исследования, орга-

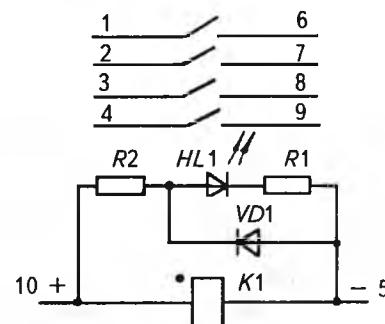


Рис.2. Электрическая схема четырехконтактного реле серии РПГ19

низованного с привлечением математического аппарата теории планирования эксперимента [7]. Выбор факторов применительно к серии реле РПГ16, РПГ19 определяется следующими соображениями. Длина обмотки выбирается [1,2,8] примерно равной длине баллона геркона, а толщина обмотки определяется заданными размерами установочной площади реле.

Зависимость F_{cp} от длины и толщины обмотки имеет экстремум [2], однако без резко выраженного характера.

По данным [9] вид размещения геркона в катушке может привести к изменению F_{cp} . Поэтому предварительно было исследовано влияние на F_{cp} взаимного положения герконов, герконов и катушки в многоконтактном реле с плоской катушкой. Вращение герконов вокруг собственной оси приводит к разбросу F_{cp} в пределах 2,5 и 1,5% соответственно для реле без экрана и с экраном. Смещение оси геркона вдоль оси катушки на ± 2 мм от симметричного их расположения не вызывает заметного изменения F_{cp} .

Однако существенным оказался разброс F_{cp} от положения герконов разной чувствительности (F_r) в "ряду". Например, для одного из сочетаний герконов максимальный разброс в четырехконтактном реле с экраном и без него составил 21,9 и 25,7%, соответственно. При этом максимальный разброс имеет место в случае, когда наиболее чувствительные герконы расположены на "краях" внутреннего периметра сечения катушки, а МДС срабатывания геркона в многоконтактном реле зависит от его положения в "ряду".

Таким образом, в случае "плоской" обмотки даже при использовании герконов с равными значениями F_r будет иметь место разброс F_{cp} от минимального F_{cpmin} до максимального F_{cpmax} .

Исследования проведены в соответствии с матрицей ортогонального центрально-композиционного плана второго порядка [7]. В качестве факторов выбраны МДС срабатывания F_{rmax} наименее чувствительного геркона типа МКА52202 в группе и максимальный относительный разброс ΔF_r чувствительности герконов в группе. При этом

$$\Delta F_r = (F_{rmax} - F_{rmin})/F_{rmax}, \quad (2)$$

где F_{rmin} – МДС срабатывания наиболее чувствительного геркона в группе, определяемая в стандартной обмотке геркона МКА52202.

Эксперименты по определению МДС срабатывания реле проведены на катушках 2, 4, 6 контактных реле серии РПГ19 с П-образным экраном $F_{cp,3}$ и без экрана F_{cp} . Для выбора пределов изменения факторов F_{rmax} , ΔF_r предварительно было исследовано значение МДС сра-

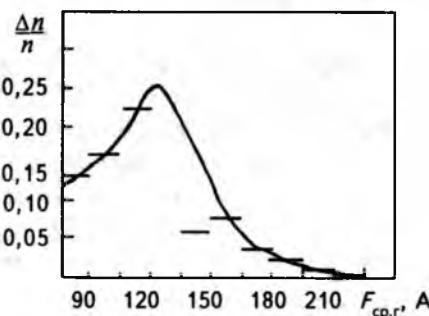


Рис.3. Гистограмма распределения МДС срабатывания геркона МКА 52202 ($n=160$)

батывания F_r 160 герконов в стандартной обмотке (число витков $w=10000$ и сопротивление $R=890\pm 70$ Ом).

Гистограмма распределения F_r приведена на рис.3. На основе данных рис.3 принято: $160 \leq F_{rmax} \leq 200$ А; $0,10 \leq \Delta F_r \leq 0,40$. Герконы размещались симметрично относительно продольной оси катушки, а наиболее чувствительные из них в четырех- и шестиконтактных исполнениях размещались на "краях" внутреннего периметра.

Для четырехконтактного реле в каждом из девяти опытов измерения проводились при наличии:

а) одного грубого ($F_r = F_{rmax}$ и трех чувствительных ($F_{ri} = F_{rmin}$));

б) одного чувствительного и трех грубых герконов.

При исследовании шестиконтактного реле два грубых геркона размещались в середине периметра катушки, а между ними и чувствительными герконами устанавливались герконы средней чувствительности ($F_{rmin} < F_r < F_{rmax}$) в каждом из девяти опытов. Для исследования подбирались герконы, отличающиеся по чувствительности не более чем на 2% от расчетного значения в соответствии с матрицей эксперимента.

В качестве функций цели использованы F_{cpmin} и F_{cpmax} , определенные по замыканию первого и последнего герконов в реле при достаточно медленном увеличении тока в обмотке управления реле.

Для упрощения формы представления результатов экспериментов здесь приведены аппроксимации относительного значения минимального и максимального МДС срабатывания реле.

$$F_{rmax} = F_{cpmax}/F_{rmax}; \quad F_{rmin} = F_{cpmin}/F_{rmin},$$

где в соответствии с (2) $F_{rmin} = (1-\Delta F_r)F_{rmax}$.

Функции цели F_r представляются в данном случае в виде ряда [7]

$$F_r = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{12} x_1 x_2, \quad (3)$$

где $x_1 = 0,05 F_{rmax} - 9$; $x_2 = 6,667 \Delta F_r - 1,667$.

Таблица

Наличие П-образного экрана	b_i	Количество герконов n					
		$n = 2$		$n = 4$		$n = 6$	
		F_{\max}	F_{\min}	F_{\max}	F_{\min}	F_{\max}	F_{\min}
С экраном	b_0	1,268	1,204	1,418	1,305	1,404	1,282
Без экрана	b_0	1,327	1,316	1,605	1,460	1,715	1,514
С экраном	b_1	0,037	-0,007	0,004	-0,002	-0,031	-0,013
Без экрана	b_1	0,033	-0,001	-0,003	-0,025	-0,046	-0,052
С экраном	b_2	-0,003	-0,004	0,027	-0,013	0,009	-0,011
Без экрана	b_2	-0,001	-0,012	0,048	0,013	-0,006	0,000
С экраном	b_{11}	-0,046	-0,038	0,008	-0,044	0,076	-0,019
Без экрана	b_{11}	-0,029	-0,062	0,040	-0,024	0,067	-0,050
С экраном	b_{22}	0,008	0,008	-0,011	-0,007	0,001	0,012
Без экрана	b_{22}	0,006	-0,004	0,001	-0,002	-0,011	0,009
С экраном	b_{12}	-0,012	-0,009	-0,015	0,026	-0,007	-0,001
Без экрана	b_{12}	-0,016	-0,004	-0,007	0,027	-0,002	-0,007

Результаты расчетов коэффициентов b_i ряда (3) приведены в таблице. Расхождение между экспериментальными и рассчитанными по (3) значениями функций цели не превышает в большинстве точек плана $\pm 3\%$; максимальное расхождение -5% .

Данные таблицы свидетельствуют о том, что в условиях проведенного эксперимента и при принятой форме представления его результатов наибольшее влияние на безразмерные функции цели оказывают количество герконов, наличие экрана, МДС срабатывания наименее чувствительного геркона. Поэтому в инженерной практике допустимо использование упрощенных полиномов для определения $F_{\text{срмакс}}$.

При аппроксимации зависимостей коэффициентов b_0 , b_1 , b_{11} от числа n герконов квадратичным трехчленом получено:

$$F_{\max} = 0,954 + 0,198n - 0,021n^2 + x_1(0,068 - 0,015n - 0,002n^2) - x_1^2(0,086 - 0,017n - 0,002n^2); \quad (4)$$

$$F_{\min} = 0,979 + 0,144n - 0,016n^2; \quad (5)$$

$$F_{\max} = 0,881 + 0,265n - 0,021n^2 + x_1(0,062 - 0,013n - 0,001n^2) - x_1^2(0,140 - 0,066n + 0,005n^2); \quad (6)$$

$$F_{\min} = 1,082 + 0,140n - 0,011n^2 + x_1(0,02 - 0,01n) - x_1^2(0,164 - 0,067n + 0,008n^2). \quad (7)$$

Выходы

Полученные результаты исследований могут быть использованы при оптимизации по потребляемой мощности реле серии РПГ16, РПГ19 и им подобных с применением герконов с различными интервалами МДС их срабатывания, а также при проектировании реле новых серий, например с числом контактов 3, 5, 7.

Список литературы

- Пучков А.С. Развитие конструкций низковольтных реле. М.: Высшая школа, 1980.
- Коробков Ю.С. Расчет магнитоуправляемых контактов. М.: МЭИ, 1982.
- Иванов И.П. Проектный расчет герконовых реле// Тр. ВНИИР. 1980. Вып. 11. С.12—16.
- Буль В.К., Шоффа В.Н. Реле на герметизированных магнитоуправляемых контактах. М.: МЭИ. 1977.
- Макарычев Ю.М., Рыжов С.Ю. САПР реле на герконах. М.: МЭИ, 1987.
- Шоффа В.Н. К расчету разомкнутых магнитных систем методом теории цепей// Электричество. 1982. № 1. С. 14—19.
- Ивоботенко В.А., Ильинский Н.Ф., Копылов И.П. Планирование эксперимента в электромеханике. М.: Энергия, 1975.
- Выбор электрических аппаратов для электропривода, электрического транспорта и электроснабжения промышленных предприятий/ Е.Г.Акимов, Ю.С.Коробков, А.В.Савельев и др. М.: МЭИ, 1990.
- Коробков Ю.С., Умеренков А.С., Шибанов В.К. Устройства автоматики на герконах. М.: МЭИ, 1983.

Автоматизированный контроль работы станка-качалки нефти

В.Я.ЧАРОНОВ, канд.техн.наук (АО "Татнефть", г. Альметьевск), Е.Г.ЕГОРОВ, канд.техн.наук (ЧГУ, г. Чебоксары), В.С.ГЕНИН, канд. техн.наук (ВНИИР, г. Чебоксары)

На примере экспериментальных данных показано, что из анализа высших гармоник ваттметрограммы контролируются обрыв ремней привода СКН, обрыв штанги, перегрузка двигателя СКН, балансировка СКН и др. Результаты контроля с помощью ваттметрограммы могут быть уточнены с помощью динамограммы. Разработан микропроцессорный блок комплексной защиты станка-качалки, работающий на основе контроля ваттметрограммы.

В течение более чем двух лет в нефтегазодобывающих управлениях Татарии ведется опытная эксплуатация системы телекоммуникаций работы нефтяных скважин с использованием линий электропередач напряжением 6(10) кВ в качестве физических линий связи (СТК РНК-ЛЭП). Станции управления станков-качалок нефти (СКН) позволяют по командам диспетчерского пункта производить включение и выключение приводного двигателя, регулирование скорости качаний головки балансира станка-качалки. Также ведутся контроль потребляемой двигателем активной мощности с получением ваттметрограммы работы двигателя, снятие динамограммы работы штангового глубинного насоса, контроль количества откачиваемой жидкости и др. [1] Одна из возможностей автоматизации контроля работы станка-качалки с помощью ПЭВМ диспетчерского пункта СТК РНК — ЛЭП связана с использованием ваттметрограммы [2]. Ваттметрограмма представляет собой зависимость потребляемой приводом СКН активной мощности от времени в течение цикла качания головки балансира.

Скважинный контроллер станции управления (СУ) СКН системы телекоммуникаций работы нефтяных качалок позволяет получить ваттметрограмму в виде набора замеров порций активной электроэнергии, потребляемой приводом СКН за установленную дискрету времени в течение фиксированного интервала времени, сопоставимого с циклом качания головки балансира СКН. По запросу с ПЭВМ диспетчерского пункта нефтепромысла данные могут быть переданы со станции управления СКН на диспетчерский пункт, затем обрабатываться и сохраняться в базах данных. Типичный вид ваттметрограммы на экране дисплея для СКН, оборудованного регулируемым электроприводом РЭП СКН [3], изображен на рис.1. Параметры и гармонический анализ для СКН показаны в табл.1,2.

Для устранения погрешностей дискретизации получаемой ваттметрограммы, случайных выбросов и помех производится сглаживание дискретных отсчетов. Использовались методы скользящего осреднения и медианной фильтрации [4,5]. Достоинством метода скользящего осред-

нения является простота его алгоритмической реализации. Метод медианной фильтрации позволяет устраниТЬ выбросы большой амплитуды, но если эти выбросы оказываются частыми, то он бессилен, да и сама задача восстановления полезного сигнала в этом случае теряет смысл.

При рассмотрении ваттметрограмм девяти скважин за 1996—1997 гг. получено, что резуль-

Скважина: 30379 Дата: 02.02.97 Время: 15:50

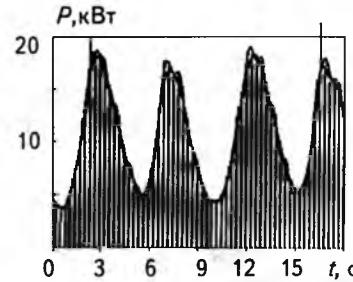


Рис.1. Типичный вид ваттметрограммы работы сбалансированного СКН, оборудованного регулируемым электроприводом РЭП СКН

Таблица 1
Данные для рис.1

Параметр	Исходные данные	Медианная фильтрация	Скользящее осреднение
Качания, 1/мин	6,2	6,2	6,2
P_{\min} , кВт	3,3	3,7	3,7
P_{\max} , кВт	21,4	18,5	18,7
$P_{ср}$, кВт	10,4	10,4	10,4
$I_{ср,кв}$, А	17,6	17,5	17,4
Небаланс, %	1,2	13,8	7,2

Таблица 2
Данные для рис.1

Номер гармоники	Амплитуда $A[l]$, кВт	$A[l]/A[0]$
0	10,4	1,00
1	1,6	0,15
2	6,4	0,61
3	0,6	0,06
4	1,1	0,10
5	0,3	0,03
6	0,2	0,02
7	0,3	0,03
8	0,0	0,00
9	0,1	0,01

Данные для рис.2

Параметр	Исходные данные	Медианная фильтрация	Скользящее осреднение
Качания, 1/мин	5,1	5,1	5,0
P_{\min} , кВт	0,0	0,0	0,0
P_{\max} , кВт	28,4	25,5	27,0
$P_{ср}$, кВт	9,9	9,8	10,2
$I_{ср.кв}$, А	21,6	21,3	22,0
Небаланс, %	91,0	92,2	89,2

Таблица 3

Таблица 4

Данные для рис.2

Номер гармоники	Амплитуда $A[i]$, кВт	$A[i]/A[0]$
0	10,2	1,00
1	14,1	1,38
2	3,0	0,30
3	1,5	0,14
4	0,4	0,04
5	0,5	0,05
6	0,2	0,02
7	0,2	0,02
8	0,2	0,02
9	0,1	0,01

таты расчетов с применением методов скользящего осреднения и алгоритма медианной фильтрации отличаются не более чем на 5 %. Предполагая безразрывность и монотонность участков кривой ваттметрограммы, с учетом аппаратной и программной реализации методов ее получения, можно сделать вывод о том, что для сглаживания ваттметрограмм в СТК РНК-ЛЭП практически целесообразнее применить метод скользящего осреднения. Апроксимация сглаженной кривой ваттметрограммы производится с использованием сплайн-интерполяции кривой кубическими многочленами [5].

Определение периода последовательности отсчетов ваттметрограммы выполняется с использованием метода периодограммы [6]. После этого из рассмотрения кривой ваттметрограммы как периодической функции $f(x)$ с периодом T , удовлетворяющей условию Дирихле, и разложения ее в ряд Фурье выполняется гармонический анализ ваттметрограммы [5,6].

По сглаженной кривой ваттметрограммы определяются:

- длительность цикла качания головки балансира;
- минимальная, максимальная и средняя мощности за время цикла качания головки балансира;
- небаланс СКН;
- амплитуды гармоник ваттметрограммы и др.

На рис.2 и 3 показаны ваттметрограммы, полученные после обрыва штанги СКН (рис.2) и последовавшим за этим обрывом ремней (рис.3). На рис.4 и 5 приведены ваттметрограммы рабо-

Скважина: 30379 Дата: 23.01.97 Время: 08:58

P , кВт

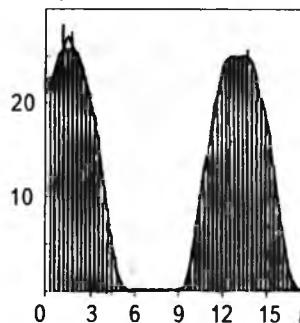


Рис.2. Ваттметрограмма работы СКН после обрыва штанги

Скважина: 30379 Дата: 23.01.97 Время: 14:16

P , кВт



Рис.3. Ваттметрограмма работы СКН после обрыва ремней

Скважина: 30379 Дата: 02.02.97 Время: 10:49

P , кВт

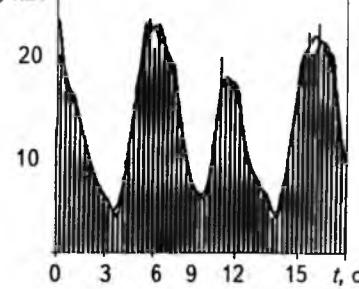


Рис.4. Ваттметрограмма работы СКН после повышения динамического уровня жидкости в скважине

Скважина: 30379 Дата: 24.05.97 Время: 20:49

P , кВт

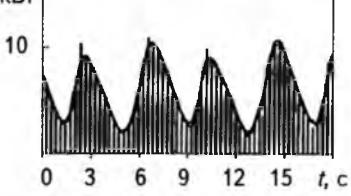


Рис.5. Ваттметрограмма работы СКН с пониженной частотой качаний головки балансира

ты этого СКН после ремонта скважины при различных скоростях качания головки балансира. Из них видно, как меняется при этом потребляемая СКН активная мощность и вид ваттметрограмм. В табл.3—10 представлены также значения определяемых по ваттметрограмме параметров с использованием методов скользящего осреднения и медианной фильтрации.

Ваттметрограмма, представленная на рис.5, соответствует пуску СКН после ремонта. Уровень жидкости в скважине при этом достаточно высокий, этим и объясняется небаланс СКН —

Данные для рис.3

Таблица 5

Параметр	Исходные данные	Медианная фильтрация	Скользящее осреднение
Качания, 1/мин	4,8	4,8	4,8
P_{\min} , кВт	3,3	3,7	3,7
P_{\max} , кВт	4,1	4,1	4,0
$P_{ср}$, кВт	3,8	3,8	3,8
$I_{ср.кв.}$, А	5,8	5,8	5,8
Небаланс, %	10,8	9,8	11,6

Данные для рис.5

Таблица 9

Параметр	Исходные данные	Медианная фильтрация	Скользящее осреднение
Качания, 1/мин	3,8	3,8	3,8
P_{\min} , кВт	1,9	1,9	2,1
P_{\max} , кВт	10,9	10,5	10,2
$P_{ср}$, кВт	5,9	5,9	5,9
$I_{ср.кв.}$, А	9,9	9,8	9,8
Небаланс, %	0,3	2,4	6,3

Данные для рис.3

Таблица 6

Номер гармоники	Амплитуда $A[i]$, кВт	$A[i]/A[0]$
0	3,8	1,00
1	0,0	0,00
2	0,0	0,01
3	0,1	0,02
4	0,0	0,01
5	0,0	0,01
6	0,0	0,01
7	0,0	0,01
8	0,0	0,00
9	0,0	0,00

Данные для рис.5

Таблица 10

Номер гармоники	Амплитуда $A[i]$, кВт	$A[i]/A[0]$
0	5,9	1,00
1	1,0	0,17
2	3,3	0,57
3	0,2	0,04
4	0,6	0,10
5	0,2	0,03
6	0,1	0,02
7	0,1	0,01
8	0,0	0,00
9	0,0	0,00

присутствующая на ваттметрограмме разница в максимальных значениях пиков мощности, соответствующих подъему штанги и подъему балансира, сбалансированного в установившемся режиме работы СКН (см. рис.1). Таким образом, с помощью ваттметрограммы можно косвенно судить об изменении динамического уровня жидкости в скважине. Однако небаланс

может свидетельствовать и о запарфинивании скважины.

Определяемые в результате выполняемых расчетов характеристики для рассмотренных на представленных рисунках ваттметрограмм приведены в табл.11, где $N_{\text{кач}}$ — количество циклов качаний головки балансира в минуту; P_{\min} , P_{\max} , $P_{ср}$ — соответственно минимальное, максимальное и среднее значения активной мощности за время цикла качания головки балансира; Небаланс — отношение разности двух соседних пиков мощности, соответствующих подъему балансира и подъему полированного штока, к большему из них.

Анализ приведенных в табл.11 результатов, показывает, что при отклонениях режима работы СКН от нормального гармонический состав кривой ваттметрограммы заметно изменяется. Уже из анализа вида ваттметрограмм очевидно, что с изменением режима работы СКН заметно меняется значение средней за период активной мощности — постоянной составляющей. При обрыве штанги резко увеличивается соотношение постоянной составляющей и высших гармоник (прежде всего, первой и второй) и постоянной составляющей, а при обрыве ремней — уровень гармоник резко падает.

Полученные результаты свидетельствуют, что для надежного выявления такого рода неисправностей в работе скважины, как обрыв штанги и обрыв ремней достаточен контроль постоянной составляющей и двух (первой и второй) гармоник.

Рассмотрение ваттметрограмм работы СКН разных скважин, отличающихся типом и глу-

Данные для рис.4

Таблица 7

Параметр	Исходные данные	Медианная фильтрация	Скользящее осреднение
Качания, 1/мин	5,9	5,9	5,9
P_{\min} , кВт	3,3	3,7	3,8
P_{\max} , кВт	22,2	21,4	21,1
$P_{ср}$, кВт	11,9	11,9	11,9
$I_{ср.кв.}$, А	20,2	20,1	19,9
Небаланс, %	19,4	15,9	22,4

Таблица 8

Данные для рис.4

Номер гармоники	Амплитуда $A[i]$, кВт	$A[i]/A[0]$
0	11,9	1,00
1	3,3	0,28
2	6,8	0,57
3	0,7	0,06
4	1,3	0,11
5	0,1	0,01
6	0,4	0,03
7	0,3	0,02
8	0,1	0,01
9	0,1	0,00

Таблица 11

Характеристики ваттметрограмм

Рис.	$N_{\text{кач}}$ 1/мин	P_{\min} кВт	P_{\max} кВт	$P_{\text{ср}}$ кВт	Небаланс, %	Амплитуды гармоник, кВт			
						1-й	2-й	3-й	4-й
1	6,25	3,71	18,7	10,4	7	1,6	6,4	0,6	1,1
2	5	0	27	10,2	89	14,1	3	1,5	0,4
3	4,76	3,71	3,98	3,82	12	0,014	0,025	0	0
4	5,88	3,84	21,1	11,9	22	3,3	6,8	0,7	1,3
5	3,8	2,1	10,2	5,9	6	1,1	3,3	0,2	0,6
—	4,17	3,84	13,6	8,37	13	1,1	4,3	0,4	1,0
—	6,7	3,0	16,6	9,4	17	2,3	5,4	0,3	0,9
—	9,1	2,5	21,0	9,6	28	3,6	6,1	1,4	0,4

биной установки насоса, динамическим уровнем жидкости, скоростью качаний головки балансира и др., показывает, что значения указанных в табл.11 параметров для них существенно различаются. Учитывая, что ваттметрограммы скважин имеют индивидуальный характер, авторы считают, что практическая реализация автоматизированного контроля работы СКН с помощью компьютера возможна путем сопоставления рассчитываемых по ваттметрограмме параметров с их значениями для эталонной ваттметрограммы, получаемой после ремонта или изменения режима работы скважины. При этом необходимо контролировать:

- количество циклов качаний головки балансира в единицу времени;
- постоянную составляющую кривой ваттметрограммы и амплитуду ее гармоник относительно постоянной составляющей.

Анализ отклонения контролируемых характеристик получаемой ваттметрограммы от соответствующих параметров образцовой ваттметрограммы позволит сделать вывод об исправности СКН.

Из [2] известно, что из ваттметрограммы принципиально возможно получение динамограмм параллелограммного типа, характерных для скважин глубиной 1000–2000 м, работающих с числом качаний головки балансира до 12–18 в минуту. Но поскольку при этом сложно сохранить важные для анализа работы штангового глубинного насоса особенности [7], то средства СТК РНК-ЛЭП предусматривают получение по запросу диспетчерского пункта динамограммы скважины с использованием датчика усилия на полированном штоке и датчика положения. Вид динамограммы на экране дисплея диспетчерского пункта СТК РНК-ЛЭП изображен на рис.6. Так же как и ваттметрограммы динамограммы могут сохраняться в архивах для дальнейшего анализа. На рис.7 показано наложение на полученную динамограмму эталонной (на рисунке изображена пунктиром), а на рис.8 – наложение на нее теоретической динамограммы.

На рис.9 показано наложение ваттметрограммы на развернутую по времени, одновременно с ней полученную динамограмму. Начала обоих графиков соответствуют нижней мертвоточке балансира СКН, отмеченной на кривой динамограммы точкой. При этом приемный клапан штангового насоса закрыт, на полированый шток действует только нагрузка от веса штанг, погруженных в жидкость, а насосные трубы имеют максимальное растяжение под весом содержащейся в них жидкости. Нагрузка на полированный шток при этом близка к минимальной за цикл работы СКН, соответственно близка к минимальной потребляемая приводным двигателем СКН активная мощность.

В начале движения полированного штока вверх штанги начинают воспринимать вес жидкости нефтепрессорных труб (НКТ), нагрузка на шток возрастает. Во время восприятия нагрузки длина штанг увеличивается пропорционально увеличению нагрузки, а длина НКТ уменьшается, так как часть веса жидкости, которую приняли на себя штанги, снимается с труб. Нижний конец НКТ вместе с насосом движется вверх, растяжение штанг равно разности перемещений штока и плунжера с насосом. Начальному участку хода штока вверх соответствует линия восприятия нагрузки динамограммы. Поскольку нижней мертвоточке балансира СКН соответствует верхнее положение

Скважина: 30379 Дата: 16.06.97 Время: 07:32

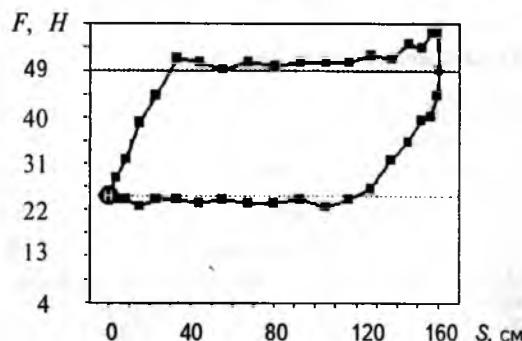


Рис.6. Динамограмма работы ШГН

противовеса СКН, момент, создаваемый последним, сначала близок к нулю, а затем возрастает по закону, близкому к синусоидальному, и нагрузка по подъему штока приходится в основном на приводной двигатель СКН. Этим объясняется относительно резкий рост потребляемой двигателем мощности на начальном участке штока вверх.

Отрезок от 2 до 6 с графика на рис.9 соответствует относительно постоянной нагрузке на шток при перемещении плунжера вверх, равной с учетом некоторых допущений сумме веса штанг жидкости и веса жидкости над плунжером насоса [7]. Момент, создаваемый противовесом СКН, сначала растет, затем уменьшается, но продолжается возврат запасенной им энергии. Мощность, потребляемая приводным двигателем СКН, на отрезке 2–6 с (рис.9)

Характеристики скважины для рис. 6

Паспортные данные

Масса штанг, кг	2785
Глубина спуска, м	1000
Диаметр плунжера, мм	56
Ход штока, см	160

Результаты измерений

Качания, 1/мин	5
$F_{\min}, \text{Н}$	22,42
$F_{\max}, \text{Н}$	56,2
$F_{\text{н.м.т}}, \text{Н}$	24,53
$F_{\text{в.м.т}}, \text{Н}$	49,16

Результаты расчета

Масса жидкости, кг	24,63
Плотность смеси, г/см ³	1
Эффективный ход плунжера, см	114
Потеря хода, см	45,6
Производительность насоса, м ³ /сут	17,7

Характеристики скважины с динамограммой по рис. 7, 8 те же, а эталонная динамограмма (рис.7):

Качания, 1/мин	3,85
$F_{\min}, \text{Н}$	1468
$F_{\max}, \text{Н}$	5901
$F_{\text{н.м.т}}, \text{Н}$	2312
$F_{\text{в.м.т}}, \text{Н}$	5479

Параметры скважины для рис.9

Качания, 1/мин	4,55
Ход, см	160
$F_{\min}, \text{Н}$	31,05
$F_{\max}, \text{Н}$	54,74
$F_{\text{н.м.т}}, \text{Н}$	33,16
$F_{\text{в.м.т}}, \text{Н}$	49,47
$P_{\min}, \text{kВт}$	1,65
$P_{\max}, \text{kВт}$	11,1
$P_{\text{ср}}, \text{kВт}$	5,95
$I_{\text{ср.кв}}, \text{А}$	10,1
Небаланс, %	5,8

Скважина: 30379 Дата: 16.06.97 Время: 07:32

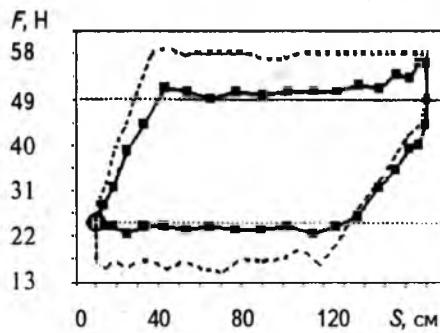


Рис.7. Динамограмма работы ШГН с наложенной на нее образцовой динамограммой

Скважина: 30379 Дата: 16.06.97 Время: 07:32

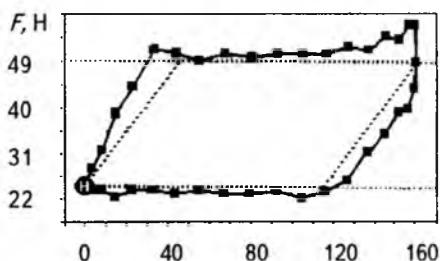


Рис.8. Динамограмма работы ШГН и наложенная на нее теоретическая динамограмма

Скважина: 30379 Дата: 19.06.97 Время: 13:01

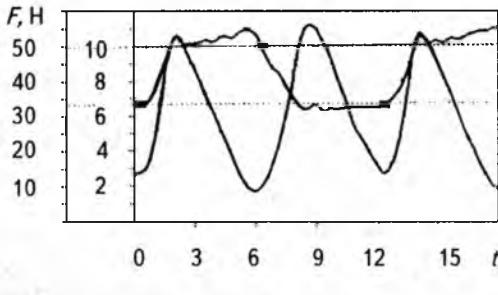


Рис.9. Наложение ваттметрграммы на развернутую во времени динамограмму

снижается до минимума, соответствующего положению балансира в нижней мертвоточке.

После начала движения полированного штока вниз нагрузка на него уменьшается: вес жидкости постепенно переходит на трубы, длина штанг сокращается, трубы удлиняются. Прохождению полированым штоком расстояния, равного сумме сокращения штанг и удлинения труб, и снятия с него нагрузки, на свернутой динамограмме отображаемой линией снятия нагрузки, на рис.9 соответствует интервал от 6 до 8 с. В это время одновременно со снижением нагрузки на полированный шток происходит подъем противовеса СКН, что в сумме приводит к возрастанию мощности, потребляемой приводным двигателем СКН.

Во время дальнейшего движения полированного штока вниз движется вниз и плунжер, нагрузка на шток прекращает снижаться и равна весу штанг в жидкости, но после достижения своего максимального значения момент,

создаваемый противовесом СКН, снижается. В итоге происходит снижение потребляемой приводным двигателем СКН мощности, которая вновь достигает частного минимума вблизи нижней мертвоточки балансира СКН.

Наложение ваттметрограммы на развернутую по времени, одновременно с ней полученной, динамограмму позволяет привязать точки ваттметрограммы к фазам работы скважины и более корректно ее анализировать.

Следует отметить, что для динамометрирования скважину необходимо оснастить датчиками положения (перемещения) штанги и нагрузки на полированном штоке. Достоинством использования ваттметрограммы для контроля работы стабильно работающих скважин является то, что в отличие от динамометрирования получение ваттметрограммы не связано с применением специальных датчиков, для этого достаточно контролировать только электрических величин: тока и напряжения с вычислением на основе их мгновенных значений активной мощности.

На основе изучения экспериментальных ваттметрограмм, с учетом алгоритмов контроля работы СКН, реализованных в блоке управления и защиты станции управления СУС-01 [1], разработаны алгоритмы и программные средства микропроцессорного блока комплексной защиты станка-качалки (БКЗ-СКН) в составе станции управления СКН СТК РНК-ЛЭП. БКЗ-СКН построен на базе блока аналогового ввода СУ с микроконтроллером K1816BE39. Путем контроля ваттметрограммы БКЗ-СК контролирует обрыв ремней привода СКН, обрыв штанги, перегрузку двигателя СКН. Как и СУС-01, БКЗ-СК дополнительно обеспечивает выключение станка-качалки при обрыве фаз, при максимальных перегрузках двигателя ($P_{акт} > 70\% P_{ном}$), при снижении напряжения питающей сети ($U \leq 0,7 U_{ном}$) с запретом включения до восстановления напряжения до $U = 0,85 U_{ном}$, при недопустимом понижении или повышении давления в выкидном трубопроводе, вызванном, например, неисправностью насоса и т.д.

Применение микропроцессорного устройства в сравнении с электронными реле и другими устройствами защиты позволяет значительно повысить качество защиты. Существующие устройства и реле защиты реагируют, как правило, на пороговые значения контролируемых параметров. В электротепловых реле перегрузки, например, — это температура обмотки защищаемого двигателя, контролируемая путем физического моделирования нагрева, в электронных аппаратах защиты на базе аналоговых схем или дискретной логики — это значение контролируемой электрической величины и т.д. Микропроцессор позволяет использовать для

решения задач контроля, управления и защиты более развитые и сложные модели объектов, учитывающих, например, развитие и динамику контролируемого процесса. В БКЗ-СК это используется, например, для определения аварийных состояний СКН.

Наряду с выполнением функций защиты БКЗ-СК при использовании в составе СУ СТК РНК-ЛЭП обеспечивает выдачу телеметрической информации на диспетчерский пункт нефтепромысла.

Опытная эксплуатация системы телекоммуникации работы нефтяных качалок в течение полутора лет в АО "Татнефть" показала, что СТК РНК-ЛЭП практически полностью обеспечивает выполнение действующих требований техники безопасности в части дистанционного контроля работы скважин с диспетчерского пункта нефтепромысла, ее развитие и внедрение целесообразны и перспективны.

Список литературы

1. Чаронов В.Я., Генин В.С., Кирюшин В.В. Система телекоммуникаций работы нефтяных качалок с ЛЭП 6(10) кВ в качестве линий связи. Альметьевск: Изд. "ТатАСУнефть", 1997.
2. Алиев Т.М., Тер-Хачатуров А.А. Автоматический контроль и диагностика скважинных штанговых насосных установок. М.: Недра, 1988.
3. Регулируемый электропривод станка-качалки нефти (РЭП-СКН). Листок-каталог ЛК 08.46.06-96. М.: Информэлектро, 1996.
4. Турчак Л.И. Основы численных методов. М.: Наука, 1987.
5. Бахвалов Н.С. Численные методы. М.: Наука, 1975.
6. Отнес Р.К., Эноксон Л. Прикладной анализ временных рядов. Основные методы. М.: Мир, 1982.
7. Белов И.Г. Исследование работы глубинных насосов динамографом. М.: ГНТИ нефтяной и горнотопливной литературы, 1960.

Чаронов Владилен Яковлевич — главный энергетик АО "Татнефть", академик МАНЭБ. В 1970 г. окончил Куйбышевский политехнический институт им. Куйбышева по специальности электроснабжение промышленных предприятий и городов. В 1995 г. в Санкт-Петербургском государственном горном институте защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук на тему "Разработка концепции автоматического управления электроснабжением нефтегазодобывающих комплексов и технических требований к электрооборудованию".

Генин Валерий Семенович — заведующий лабораторией отдела низковольтного аппаратостроения ОАО "ВНИИР", старший научный сотрудник. В 1976 г. окончил электротехнический факультет Чувашского государственного университета. В 1987 г. в МЭИ защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук на тему "Усовершенствование методики и аппаратуры для испытаний магнитных пускателей на коммутационную износостойкость".

Некоторые технические вопросы замены серебряных и серебросодержащих контактов медными

Д.М.ЗЕКЦЕР, канд.техн.наук, чл.-кор. ИАУ

Рассмотрены технические Вопросы замены серебряных и серебросодержащих контактов медными и наоборот с целью сопоставительного анализа технической конкурентоспособности отечественных и аналогичных зарубежных коммутационных аппаратов. Приведены конкретные примеры решения этих вопросов на отечественных серийных аппаратах.

В настоящее время серебро больше всех металлов применяется для слаботочных и сильноточных контактов в чистом виде, в виде сплавов или различных композиций (металлокерамических). Объясняется это его особыми свойствами: низким удельным электрическим сопротивлением, высокой теплопроводностью, хорошими технологическими свойствами, устойчивым контактным сопротивлением и разрушением при нагреве током оксидов серебра. После фотоматериалов электрические коммутационные аппараты занимают второе место по использованию серебра.

Однако потребление серебра больше его добычи, мировые запасы ограничены и быстро иссякают. В связи с остродефицитностью и высокой стоимостью серебра интенсивно работают над экономией серебра путем создания плакированных контактов для слаботочных аппаратов (рабочий слой — серебро, а несущий слой — медь) и медных адекватных контактов для сильноточных аппаратов, где плохо проводящие окислы меди могут пробиваться большими токами, и когда токи сваривания небольшие и отсутствует повышенная влажность атмосферы.

Таким образом, контакторы серий КТ6000, КТП6000, КМ26, К24 и др. имеют медные контакты вместо серебряных или серебросодержащих контактов, как у зарубежных аналогов. Некоторые автоматические выключатели на токи до 31,5 А и путевые выключатели также имеют один или оба медных контакта. Такая замена, к сожалению, создает ряд технических проблем. Основные вопросы, связанные с такой заменой, рассматриваются в данной статье.

При использовании медных контактов вместо серебряных при условии сохранения того же номинального коммутируемого тока, напряжения нагрузки, категории применения, режима работы (ПВ) и т.д. необходимо увеличивать контактное нажатие, так как мы сталкиваемся с увеличением переходного сопротивления контактов. Это приводит к увеличению размеров и массы приводного электромагнита контактора из-за увеличения контактного нажатия и силы сваривания по сравнению с серебряными контактами, а также соответственно размеров и массы конструкционных элементов: контактных пружин, вала, скоб, изоляционных рячагов и т.д.

Методология сопоставительного анализа зарубежных и отечественных контакторов была разработана доктором техн.наук Б.В.Клименко (Харьковский государственный политехнический университет) и автором статьи для оценки технической и экономической конкурентоспособности (зарубежные фирмы, например, "Siemens" установила надбавки к цене в зависимости от массы серебра контактов контакторов и пускателей), а также для оценки конструкции и характеристик контактора в функции от выбранного материала контактов. Рассмотрим основные вопросы для конкретных контакторов с решением соответствующих примеров.

При замене контактов на медные должно сохраняться превышение температуры удаленной контрольной точки контакта

$$(a + bR_{n.c})I_{n.c}^2 = (a + bR_{n.m})I_{n.m}^2, \quad (1)$$

где $R_{n.c}$ — переходное сопротивление серебряного контакта; $R_{n.m}$ — переходное сопротив-

ление медного контакта; $a = \frac{\rho}{K_t p S} I^2$ — характеризует превышение температуры, обусловленное потерями в токопроводе;

$$b = \frac{R_n}{\sqrt{\lambda K_t S}} I^2 l - \sqrt{\frac{hP}{\lambda S}} x \text{ — характеризует пре-}$$

вышение температуры из-за потерь в контакте; x — местоположение контрольной точки, отстоящей от контакта на расстоянии x ; при $x=0$ имеет место максимальный прирост температуры, обусловленный номинальным током; $I_{n.c}$ — номинальный ток серебряных контактов; $I_{n.m}$ — номинальный ток медных контактов; P , S — периметр и площадь поперечного сечения токопровода; ρ , λ — удельное сопротивление и коэффициент теплопроводности материала токопровода; K_t — коэффициент теплоотдачи.

Если обозначить через коэффициент ζ_k долю нагрева удаленной контрольной точки, обусловленную потерями в контактах от общего превышения температуры, то

$$\zeta_k = \frac{\theta_{k.m}}{\theta} = \frac{bR_{n.m}}{a + bR_{n.m}}, \quad (2)$$

где $\theta = \theta_{t.m} + \theta_{k.m} = \theta_{t.c} + \theta_{k.c}$ (дюоуловые потери в токопроводе и потери в контакте) можно получить отношение номинальных токов медных и серебряных контактов

$$\frac{I_{n.m}}{I_{n.c}} = \sqrt{1 - \zeta_k \left(1 - \frac{R_{n.c}}{R_{n.m}} \right)}. \quad (3)$$

Известно, что переходное сопротивление зависит от контактного нажатия [1]

$$R_n = \frac{\varepsilon}{F^v}, \quad (4)$$

где F — контактное нажатие; ε — эмпирический коэффициент, зависящий от контактного материала; v — эмпирический коэффициент, зависящий от формы контактирующих поверхностей.

При неизменных F и v выражение (3) имеет вид:

$$\frac{I_{n.m}}{I_{n.c}} = K_m = \sqrt{1 - \zeta_k \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_m} \right)}. \quad (5)$$

На рис.1 приведены графики зависимости $K_m = f(\zeta_k, \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_m})$, построенные по формуле (5),

чтобы сохранить нагрев контрольных точек в продолжительном режиме.

Для обеспечения одинакового нагрева медных и серебряных контактов при прохождении одного и того же номинального тока уравнение (5) позволяет определить увеличение размеров медного контакта.

Рассмотрим в качестве примера расчет уменьшения номинального тока контактора КТ6040 по сравнению с зарубежным аналогом:

$$\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_m} = \frac{0,06}{0,12} = 0,5; \quad \zeta_k = 0,7 \text{ для отечественного}$$

контактора. Согласно рис.1 для $\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_m} = 0,5$ и $\zeta_k = 0,7$ коэффициент $K_m = 0,8$. Следовательно, $\frac{I_{n.m}}{I_{n.c}} = 0,8$, т.е. номинальный ток необходимо

уменьшить на 20%, если размеры медного и серебряного контактов одинаковы.

Сила сваривания металлокерамических контактов на 30—40% меньше силы сваривания медных контактов при одном и том же токе, и поэтому для обеспечения разрыва медных контактов и сохранения переходного сопротивления требуется более сильный электромагнит.

На основании выражения (4) можно получить соотношение нажатий контактов из разных материалов при сохранении переходного сопротивления

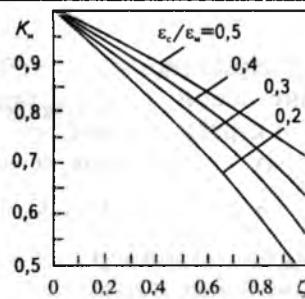


Рис.1.

$$\frac{F_2}{F_1} = \left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \right)^{1/v}, \quad (6)$$

где индекс 1 относится к медным контактам, индекс 2 — к металлокерамическим контактам; эмпирический коэффициент $v = 0,5$ для точечного контакта, $0,5—0,8$ — для линейного контакта и 1 — для плоскостного [1].

Так как $\varepsilon_2 / \varepsilon_1 = 0,5$, то для линейных контактов $F_2/F_1 = 1/2,7$, т.е. для обеспечения одного и того же переходного сопротивления для металлокерамических контактов требуется усилие примерно в 2,7 раза меньше (для контактов принято $v = 0,7$).

В соответствии с [2] масса электромагнита

$$m = Kd_c^3, \quad (7)$$

где d_c — определяющий размер — диаметр сердечника.

Диаметр сердечника связан с моментом M и углом поворота якоря α_0 следующей зависимостью [2]

$$d_c = \sqrt[4]{K_a M \alpha_0^2}, \quad (8)$$

где K_a — коэффициент, зависящий от соотношений размеров электромагнита.

Отсюда при $\alpha_0 = \text{const}$

$$\frac{m_{32}}{m_{31}} = \left(\frac{F_2}{F_1} \right)^{3/4} = \left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \right)^{3/4v}. \quad (9)$$

Зависимости $m_{32}/m_{31} = f(\varepsilon_2/\varepsilon_1, v)$ приведены на рис.2.

Масса конструкционных элементов изменяется таким образом, чтобы не изменились деформации этих элементов. Согласно [3]

$$\frac{m_{k2}}{m_{k1}} = \sqrt{\frac{F_2}{F_1}} = \left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \right)^{1/2v}. \quad (10)$$

Зависимости $m_{k2}/m_{k1} = f(\varepsilon_2/\varepsilon_1, v)$ показаны

на рис.3.

Масса контактора складывается из масс контактно-токоведущей и дугогасительных систем $m_{t.d}$, электромагнитной системы m_s и конструкционных элементов m_k :

$$m = m_{\text{т.д}} + m_3 + m_k.$$

Вводя безразмерные коэффициенты K_3 и K_k , представляющие собой, соответственно, отношения масс электромагнитной системы m_3 и конструкционных элементов m_k к m , получаем:

$$m_1 = m_{\text{т.д}} + m_1 K_3 + m_1 K_k.$$

Соответственно, например для контактора с металлокерамическими контактами

$$m_2 = m_{\text{т.д}} + m_{32} + m_{k2} = m_{\text{т.д}} + \\ + m_{31} \frac{M_{32}}{M_{31}} + m_{k1} \frac{M_{k2}}{M_{k1}}.$$

С учетом (9) и (10) получим:

$$m_2 = m_{\text{т.д}} + m_{31} \left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \right)^{3/4v} + m_{k1} \left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \right)^{1/2v} = \\ = m_{\text{т.д}} + m_1 K_3 \left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \right)^{3/4v} + m_1 K_k \left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \right)^{1/2v}.$$

Если учесть, что

$$m_{\text{т.д}} = m_1 (1 - K_3 - K_k),$$

то выражение для соотношения масс, например, контакторов с металлокерамическими и медными контактами:

$$\frac{m_2}{m_1} = 1 + K_3 \left[\left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \right)^{3/4v} - 1 \right] + K_k \left[\left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \right)^{1/2v} - 1 \right]. \quad (11)$$

Индекс 1 относится к медным контактам, индекс 2 — к металлокерамическим.

Анализ контакторов серии КТ6000, КТП6000, КТ7000, КТП7000, КТ6600 и др. показывает, что масса электромагнитной системы достигает 30 и 50% общей массы, соответственно, для управления переменным и постоянным током, а масса конструктивных элементов примерно 30 и 20%.

На рис.4 приведено семейство зависимостей $m_2/m_1 = f(K_3, K_k)$ для $\varepsilon_2/\varepsilon_1 = 0,5$.

Согласно рис. 4 для этого контактора масса может быть уменьшена на 31,5% при замене медных контактов серебросодержащими металлокерамическими. Коэффициенты K_3 и K_k определены по конструктивным чертежам ($K_3 = 0,455$; $K_k = 0,196$).

В таблице приведены параметры некоторых отечественных контакторов.

Тип контактора	I_n , А	m , кг	m_3 , кг	m_k , кг	K_3	K_k
КТ6043Б	400	42,5	11,6	11,0	0,273	0,259
КТ6053Б	630	57,0	14,7	16,8	0,258	0,295
КТП6043Б	400	56,0	25,5	11,0	0,455	0,196

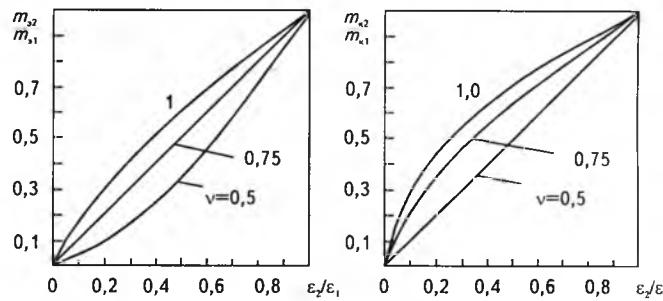


Рис.2.

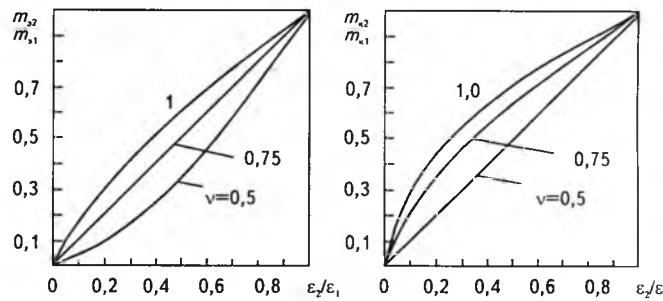


Рис.3.

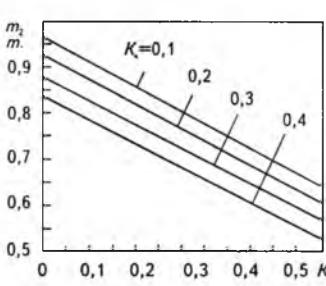


Рис.4.

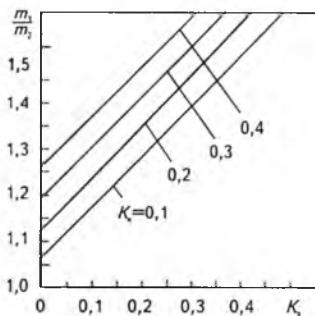


Рис.5.

Выражение (11) и методология пересчета контактов могут быть использованы для любого контактора, пускателя, путевого выключателя и др. с учетом изменения коэффициентов K_3 и K_k в зависимости от типа коммутационного аппарата.

Иногда требуется определить, как изменилась бы масса аналога, если бы в этом контакторе металлокерамические контакты были заменены медными. В этом случае расчет необходимо вести по аналогичной формуле:

$$\frac{m_1}{m_2} = 1 + K_3 \left[\left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \right)^{3/4v} - 1 \right] + K_k \left[\left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \right)^{1/2v} - 1 \right].$$

На рис.5 приведены зависимости

$$\frac{m_1}{m_2} = f_2(K_3, K_k) \text{ при } \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = 2$$

Значение функции, определенной по рис.5, показывает, как увеличилась бы масса контактора-аналога при переходе от металлокерамических серебросодержащих контактов к медным.

Список литературы

1. Таев И.С. Электрические аппараты. Общая теория. М.: Энергия, 1977.
2. Любчик М.А. Силовые электромагниты аппаратов и устройств автоматики постоянного тока. М.: Энергия, 1968.
3. Клименко Б.В., Зекцер Д.М., Богатырева Т.Г. Методика математического моделирования сопоставимости отечественных электромагнитных контакторов и соответствующих зарубежных аналогов. Харьков, 1983.

IGBT — биполярные транзисторы с изолированным затвором фирмы «International Rectifier»

А. Райхман (ЗАО "Компэл")

Широко применяющиеся в мире для коммутации значительных мощностей IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) повсеместно вытесняют биполярные транзисторы и схемы Дарлингтона из таких областей, как устройства управления приводами, бесперебойные источники питания, сварочные аппараты и т.д. Они, как правило, имеют сравнимую или меньшую мощность рассеяния, более высокие рабочие частоты и упрощенную схему запуска. В целом IGBT обладают существенными достоинствами перед остальными полупроводниковыми приборами на высоких напряжениях (больше 300 В), больших токах (десятки ампер) и при среднем быстродействии порядка нескольких килогерц (рис.1). Кроме того, отсутствие или наличие встроенного диода дает потребителю гибкость в выборе быстровосстанавливющегося диода для решения своей конкретной задачи.

Целью настоящей статьи является знакомство широкого круга потребителей с номенклатурой и параметрами IGBT, выпускаемых фирмой "International Rectifier", поскольку выбор транзистора, который должен работать в схеме с заданным током коллектора, достаточно сложен.

Дело в том, что ток через транзистор очень сильно зависит от температуры перехода и корпуса, а также от рабочей частоты. Достаточно сказать, что в справочных данных на каждый прибор приводятся значения тока для 25°C и для 100°C, причем токи могут от-

личаться почти в два раза. Облегчая работу разработчика, фирма выпускает подробные каталоги с необходимыми параметрами и графическими зависимостями для различных режимов работы, а также многочисленные рекомендации по применению, подробно показывающие физические процессы, происходящие в приборе, и методики расчета наиболее рациональных режимов работы схемы.

Фирма выпускает множество типов IGBT, которые можно классифицировать по следующим параметрам:

- 1) рабочее напряжение
500, 600, 900 и 1200 В;
- 2) размер кристалла, который определяет ток через транзистор
2, 3, 4, 5; Очень приблизительно ему можно сопоставить значение тока для температуры 25°C — 20, 30, 40 и 50 А;
- 3) рабочая частота до
1 кГц — стандартные приборы;
3...10 кГц — быстрые;
10...30 кГц — ультрабыстрые;
- 4) тип корпуса
TO-220AB или TO-247AC;
- 5) наличие встроенного обратного диода или его отсутствие.

В общем виде обозначение IGBT транзисторов приведено на рис.2.

Фирма постоянно работает над улучшением качества IGBT. Так, недавно вышло новое, четвертое поколение приборов с увеличенной до 50 кГц рабочей частотой. Они полностью взаимозаменяемы с существующими и имеют маркировку (по аналогии с приведенным примером выше) IRG4PC30UD.

Нынешним летом выйдут первые образцы IGBT с рабочей частотой до 150 кГц, которые в некоторых случаях смогут заменить полевые транзисторы и будут конкурентоспособны с последними по цене. Обозначение новых приборов будет следующим: IRG4PC30W.

Среди широкого разнообразия приборов отдельным классом стоят IGBT — модули, которые являются функционально законченными устройствами и используются для коммутации токов в десятки и сотни ампер в ключах и инверторах, в мощных источниках электропитания и при управлении двигателями, при сварке индукционным нагревом и

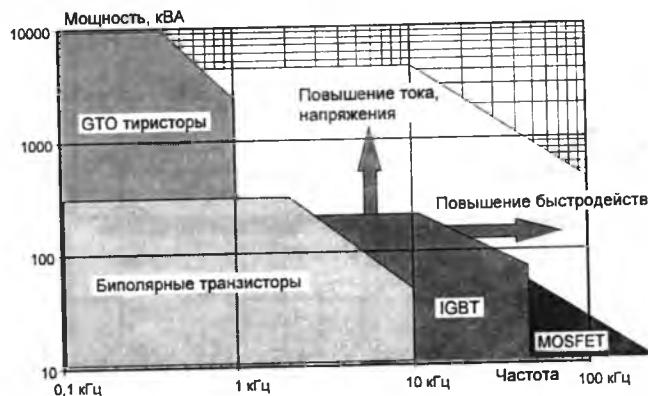
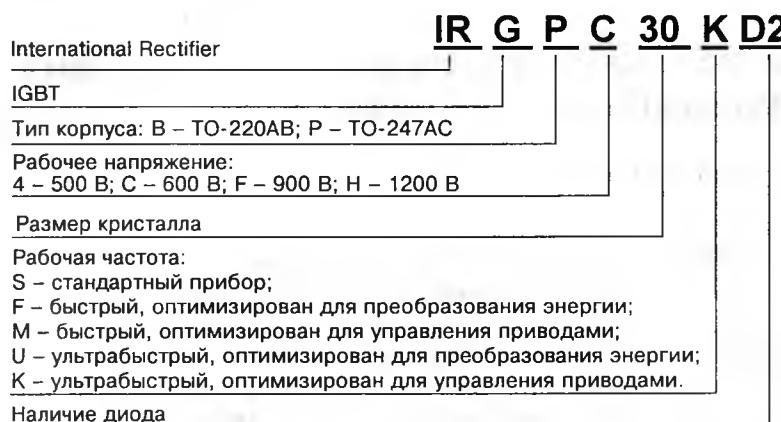


Рис.1. Области применения силовых полупроводниковых приборов и направления развития IGBT транзисторов



т.д. Основными достоинствами модулей являются значительные рабочие токи при компактной конструкции, большая рассеиваемая мощность, удобство монтажа и простота использования.

К IGBT-модулям относятся следующие группы приборов:

1) силовые ключи со встроенными диодами, рассчитанные на напряжение 600 В и токи до 800 А типа IRGDDN600M06, IRGRDN600M06;

2) инверторы нижней стороны силовой части схемы с напряжением 600, 1200 В и токами 100...200 А типа IRGKIN150M06 (рис.3);

3) инверторы верхней стороны силовой части схемы с напряжением 600, 1200 В и токами 100...200 А типа IRGNIN150M06 (рис.4);

4) полумосты с напряжением 600, 1200 В и токами 40...400 А типа CPU165MU, IRGTINI50M06 (рис.5);

5) трехфазные мосты с напряжением 600 В и токами 10...30 А типа CPU165MU (рис.6).

Возникает вопрос, а как же управлять столь мощными приборами? Как обеспечить быстрое переключение выходных токов, соответствующее работе логики управляющей схемы?

Фирма "International Rectifier" выпускает специальные интегральные схемы драйверов серии IR21XX, которые, по сути дела, являются интерфейсными схемами, обеспечивающими формирование оптимальных сигналов управления на затворы транзисторов из задающих сигналов ТТЛ или КМОП логики. Интегральные схемы драйверов запи-

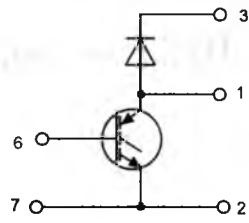


Рис.3. Инвертор нижней стороны силовой части схемы

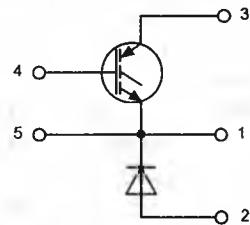


Рис.4. Инвертор верхней стороны силовой части схемы

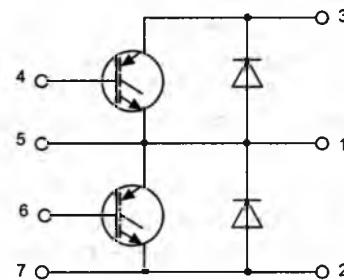


Рис.5. Полумостовая схема

тываются от напряжения 15 В и не требуют громоздкой обвязки навесными элементами.

Следует отметить, что прямое управление IGBT с выходов драйвера допускается, если коммутируемый ток не превышает 60...70 А. В противном случае, необходимо использовать сильноточный буфер, рекомендованный фирмой.

Остается добавить, что подробную техническую информацию, рекомендации по применению и сами компоненты можно приобрести в ЗАО "Компэл" – у официального дистрибутора фирмы "International Rectifier".

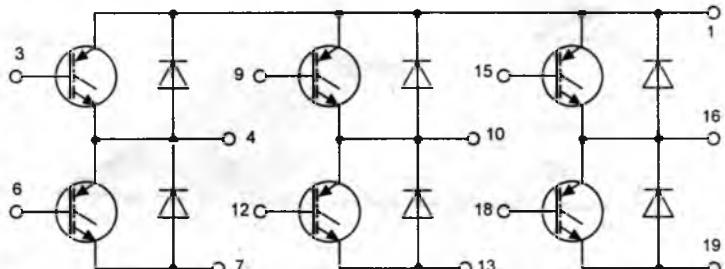


Рис.6. Трехфазная мостовая схема

ЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ ДЛЯ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

ЗАО "КОМПЭЛ" более четырех лет специализируется на продаже электронных компонентов для разработки, производства и ремонта электронного оборудования.

На складах фирмы постоянно в наличии **более 10000 наименований различных электронных компонентов: микросхем, транзисторов, конденсаторов, реле и других изделий зарубежного и отечественного производства.**

Являясь дистрибутором в России ряда зарубежных производителей электронных компонентов, ЗАО "КОМПЭЛ" имеет возможность регулярно поставлять продукцию этих фирм по низким ценам.

International Rectifier одна из фирм, официальным дистрибутором в которой является ЗАО "КОМПЭЛ", производит:

- Полевые транзисторы и модули;
- IGBT- транзисторы и модули;
- Быстрые защитные диоды;
- Диоды Шоттки ;
- Интегральные схемы управления транзисторами (драйверы);
- Микроэлектронные реле.
- Силовые модули

International Rectifier является признанным лидером в области производства мощных микроэлектронных приборов на мировом рынке. Компания комплексно рассматривает вопросы преобразования энергии, для чего выпускает законченный ряд компонентов. Их ассортимент достаточен для создания вторичных источников питания, устройств электронного пуска люминесцентных и галогеновых ламп, сварочного оборудования, схем управления электрическими двигателями, приводами, механизмами и т.д.

Продукция компании аттестована по международному стандарту ISO 9000 (ГОСТ 40. 9001-88).

В настоящее время ЗАО "КОМПЭЛ" имеет самый большой склад продукции **International Rectifier** в России, включающий в себя более 500 наименований и осуществляет техническую поддержку, обеспечивая по всей номенклатуре каталогами, справочными листами и рекомендациями по применению.

**109044 МОСКВА, А/Я 19
тел.(095) 243-5478, 921-1725
факс (095) 923-6442, 243-5546
E-mail: compel@compbb.msk.ru**

Редактор отдела О.В. Кунавина
Научный редактор Л.А. Романова
Литературный редактор А.М. Мескина

Сдано в набор 24.11.97. Подписано в печать 10.12.97. Формат 60×88 1/8
Бумага офсетная № 1. Печать офсетная. Печ. л. 8. Заказ 28

Макет выполнен и отпечатан в АО «Электропривод»
107078, Москва, ул. Садовая-Спасская, 1/2, к. 3
Вологодская областная универсальная научная библиотека



Страховая Компания «ЛиСТ и К°»

Индекс
71111

Лицензия №1816

Учреждена предприятиями электротехнической промышленности.

Открытое Акционерное Общество Страховая Компания «ЛиСТ и К°» создано 26 августа 1992 года — свидетельство о регистрации №015.038.

Состав совета директоров:

1. Лаврентьева Валентина Николаевна — Ген. директор ОАО СК «ЛиСТ и К°»
2. Гловацик Анатолий Васильевич — Ген. директор «Росэлпром» г. Москва
3. Куимов Игорь Евгеньевич — Ген. директор «Элинар» г. Наро-Фоминск
4. Лебедев Владимир Иванович — Ген. директор «Электроизолит» г. Хотьково
5. Туманов Михаил Алексеевич — Президент «Изолит-Восток» г. Москва

Собственный капитал Компании составляет 6,0 млрд. рублей.

Размер страховых резервов составляет 3,0 млрд. рублей.

За пять лет своей деятельности Компания провела пять эмиссий акций.

Среди акционеров — 22 юридических и 160 физических лиц.

Страховая Компания «ЛиСТ и К°» продолжает свое развитие и расширяет сферу услуг, предоставляемых нашим клиентам. Компания сотрудничает с 40 надежными страховыми компаниями, перестраховывая крупные страховые риски.

Страховая Компания «ЛиСТ и К°» предлагает на рынке страхования самый сбалансированный и самый оптимальный пакет услуг, обеспечивая надежную защиту от всех рисков.

Компания всегда отвечает по своим обязательствам.

Страховая Компания «ЛиСТ и К°» проводит:

- страхование транспорта и автогражданской ответственности;
- страхование грузов;
- страхование имущества юридических лиц — здания, оборудование, интерьер помещений, товары на складе и т.п.;
- страхование имущества физических лиц, дач, квартир, домов, отделки помещений;
- страхование от несчастных случаев;
- страхование аудиторской ответственности;
- страхование дополнительной пенсии.

За пять лет своей деятельности Компания объединила более 5 000 страхователей.

Страховая Компания «ЛиСТ и К°» имеет устойчивое финансовое положение, работает стабильно.

Финансово-инвестиционная деятельность Компании — рациональное размещение денежных средств и гибкие решения в области инвестирования — обеспечивают высокую прибыль акционерам.

Как правило, клиенты Компании становятся нашими акционерами, приобретая акции новой эмиссии. В 1998 г. Компания планирует провести шестую эмиссию акций и расширить круг акционеров.

Репутация и успешное развитие Страховой Компании «ЛиСТ и К°» объясняются неуклонным стремлением к высшему качеству и максимальному профессионализму.

Для вызова консультанта по страхованию обращаться по тел. 168-47-33, 168-33-02.

107076, г. Москва, ул. Краснобогатырская, 90.

Вологодская областная универсальная научная библиотека

www.booksite.ru