

# Электротехника

11 1994

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор **КОЧЕТКОВ В.Д.**

АЛЕКСАНДРОВ Г.Н., АРХАНГЕЛЬСКИЙ Ю.Н., БУЛАТОВ О.Г.,  
ГЛОВАЦКИЙ А.В., ИНЬКОВ Ю.М., КОВАЛЕВ Ф.И., КОЗЛОВ В.Б.,  
КОПЫЛОВ И.П., КОРОТКОВ Г.С., КУБАРЕВ Л.П., ЛУРЬЕ А.И.,  
МОСКАЛЕНКО В.В., ОБОЛЕНСКИЙ Н.А., ОРЛОВ Е.Г., ПЕШКОВ И.Б.,  
ПОДАРУЕВ А.И., ПОЗДЕЕВ А.Д., ПОПОВ А.Н., ПОПОВ В.В.,  
ПРЕСНОВ Ю.Л., СЛЕЖАНОВСКИЙ О.В. (зам. главного редактора),  
СУВОРОВ Н.И., ТРУБАЧЕВ С.Г., ЮНЬКОВ М.Г.

Редактор отдела **Кунавина О.В.**

Адрес редакции: 123242, Москва, Зоологическая ул., 11, комн. 212

Телефон: 254-11-52



ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ  
ГЛАВНОГО УПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ  
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ  
ПРОМЫШЛЕННОСТИ  
КОМИТЕТА ПО МАШИНОСТРОЕНИЮ РФ  
И АКАДЕМИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

Издается при содействии АО «Росэлпром»,  
АО «Прогрессэлектро», ассоциации  
инженеров силовой электроники  
и ассоциации «Автоматизированный  
электропривод»

ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1930 ГОДА

№ 11 НОЯБРЬ 1994

## СОДЕРЖАНИЕ

### ВЫСОКОВОЛЬТНАЯ ТЕХНИКА

- Волкова О.В., Корявин А.Р., Гольдштейн М.И. Влияние влажности воздуха на электрическую прочность опорных изоляционных конструкций ультравысокого напряжения . . . . .  
Быковец Ю.Я., Торопчин Ю.В., Чемерис В.С., Суворов Г.А. Элегазовый выключатель на напряжение 27,5 кВ для тяговых подстанций железных дорог . . . . .  
Вершинина С.И., Гуров С.В., Степанов Д.И. Новые вакуумные выключатели для комплектных распределительных устройств напряжением 10 кВ . . . . .  
Вершинина С.И., Степанов Д.И., Пивоваров А.Ф., Савзиханов Р.К. Комплекс устройств быстродействующего АВР . . . . .  
Ярошенко А.А. Определение начальных напряженностей в промежутках с микрощероховатостями в элегазе . . . . .  
Борин В.Н., Яковлев В.В. Перспективы разработки токопроводов с изоляцией сжатым воздухом . . . . .  
Ермолович Э.С., Филиппов В.Г., Лепехин Н.М., Спорыхин Н.А., Присеко Ю.С., Демьянчик А.С. Рентгеновское питающее устройство  
Елисеев Ю., Старков А. Комплекс программ для численного моделирования трехмерных задач электрофизики, электротехники и техники высоких напряжений . . . . .  
Демкин А.А. Разработка делительных конденсаторов дугогасительных устройств на основе полимерной пленочной изоляции, пропитанной элегазом . . . . .

### ТРАНСФОРМАТОРЫ

- Пестряева Л.М., Фишлер Я.Л. Основные направления компьютеризации трансформаторного производства АО «Уралэлектротяжмаш» 23

- Кузнецова Е.В., Морозова Т.И., Степаненко Н.А. Экспертная система диагностики состояния изоляции масляных трансформаторов 25

### ЭЛЕКТРОПРИВОД

- Аристов А.В., Аристов В.В. Регулировочные характеристики электропривода колебательного движения с машиной двойного питания 28

- Васильев Н.Ф., Логинов А.Л., Батаев А.В. Микропроцессорная система управления полноприводной электрической инвалидной коляской . . . . . 32

- Войнов И.В., Паншин В.А. Вентильтипный электродвигатель гусеничного движителя . . . . . 35

### НИЗКОВОЛЬТНАЯ ТЕХНИКА

- Зекцер Д.М. Анализ материоемкости низковольтных электрических аппаратов для электрораспределения и электроприводов . . . . . 37

- Шоффа В.Н., Игнатьев В.В., Хромов С.В. Спектр дребезга как информативный параметр для диагностики герконов . . . . . 41

### ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

- Новожилов А.Н. Токи асинхронного двигателя при статическом эксцентризите . . . . . 45

### ИССЛЕДОВАНИЯ И РАСЧЕТЫ

- Муравьева Т.Н. К оптимизации технологических режимов изготовления жаростойких обмоток . . . . . 49

- Аполлонский С.М., Острейко В.Н. Анизотропия материалов — резерв повышения эффективности электромагнитных экранов . . . . . 51

## Влияние влажности воздуха на электрическую прочность опорных изоляционных конструкций ультравысокого напряжения

О.В. ВСЛКОВА, А.Р. КОРЯВИН, М.И. ГОЛЬДШТЕЙН

ВЭИ, АО УЭТМ

Результаты многочисленных экспериментальных исследований по влиянию атмосферных условий на электрическую прочность внешней изоляции нашли отражение в последней Публикации МЭК 60-1 за 1989 г. В этом документе предложено вводить поправки на атмосферные условия с учетом разрядного напряжения и габаритов изоляции. В Публикации МЭК подчеркивается, однако, что предлагаются лишь ориентировочные значения поправок, поскольку ряд определяющих их параметров находится еще в стадии рассмотрения. В первую очередь это относится к поправкам для конструкций с межэлектродными расстояниями, соответствующими оборудованию класса ультравысокого напряжения (УВН).

В статье представлены результаты четырехлетних исследований по влиянию абсолютной влажности воздуха на электрическую прочность изоляционных конструкций УВН.

Исследуемая конструкция представляла собой экранированную опорную изоляционную колонку, установленную на подножнике высотой 3,5 м. Расстояние от расщепленного тороидального экрана до земли составляло 16,2 м. В ряде случаев испытания проводились при наличии принудительного распределения напряжения вдоль колонки.

Исследования выполнялись на открытом стенде НИИ УЭТМ при воздействии колебательных коммутационных импульсов положительной полярности с параметрами: 1000/1660, 2860/4270 и 3750/5000 мкс.

В общей сложности за четыре года было проведено свыше 80 серий опытов в различных атмосферных условиях. При этом температура окружающего воздуха изменялась от -30 до +28°C, давление — от 96,6 до 100,2 кПа, абсолютная влажность воздуха — от 0,2 до 22 г/м<sup>3</sup>.

Как известно, электрическая прочность внешней изоляции зависит от указанных факторов, причем влажность и температура взаимосвязаны. Согласно полученным измерениям эта связь описывается полиномом второй степени и хорошо согласуется с результатами наблюдений, выполненных в Сб-ПТУ профессором Г.Н. Александровым. Указанная взаимосвязь осложняет анализ опытных данных, вынуждая рассматривать отдельно поправки на плотность воздуха и его влаж-

ность. За все время проведения испытаний плотность воздуха варьировалась в пределах, при которых поправка на этот параметр в соответствии с последними рекомендациями МЭК изменялась в небольшом диапазоне от 0,995 до 1,011. Это давало основание рассматривать полученные результаты лишь в зависимости от влажности воздуха. Было прежде всего установлено, что 50%-е разрядные ( $U_{0,5}$ ) и выдерживаемые с вероятностью 0,9 ( $U_{0,1}$ ) напряжения связаны с абсолютной влажностью воздуха  $\gamma$  логарифмической зависимостью

$$U = A_1 + A_2 \ln \gamma, \quad (1)$$

где  $U$  — в МВ;  $\gamma$  — в г/м.

Значения коэффициентов  $A_1$  и  $A_2$  приведены в табл. 1.

Таблица 1

Длительность фронта импульса, мкс	Конструкция без принудительного распределения напряжения				Конструкция с принудительным распределением напряжения			
	$U_{0,5}$		$U_{0,1}$		$U_{0,5}$		$U_{0,1}$	
	$A_1$	$A_2$	$A_1$	$A_2$	$A_1$	$A_2$	$A_1$	$A_2$
1000	2,44	0,178	2,32	0,151	2,52	0,171	2,36	0,166
2860	2,42	0,107	2,28	0,114	2,43	0,140	2,30	0,135
3750	2,50	0,066	2,33	0,108	2,50	0,112	2,36	0,119

Функция (1) характеризуется быстрым подъемом напряжения в области  $\gamma < 5$  г/м (что соответствует отрицательным значениям температуры воздуха) и плавным ростом напряжения при больших значениях  $\gamma$ . При этом коэффициент  $A_2$ , определяющий степень влияния влажности, зависит от длительности фронта импульса, увеличиваясь по мере сокращения последнего.

Найденные для 50%-х разрядных напряжений поправочные коэффициенты на абсолютную влажность воздуха  $K_\gamma$ , выраженные в виде степенных функций, представлены в табл. 2.

Сопоставительный анализ показывает, что при  $\gamma < 5$  г/м (при отрицательных температурах воздуха) поправочные коэффициенты табл. 2 существенно превышают значения, рекомендуемые ГОСТ и МЭК. Ранее аналогичные выводы были

сделаны в работах В.М. Рудаковой (НИИПТ) при исследовании воздушной изоляции длиной 3—7 м. Таким образом, не нашло подтверждения существовавшее предположение о существенном снижении влияния влажности по мере роста длины изоляции.

Таблица 2

Длительность фронта импульса, мкс	Поправочный коэффициент	
	Конструкция без принудительного распределения напряжения	Конструкция с принудительным распределением напряжения
1000	$K_y = 1,17 \gamma^{-0,0659}$	$K_y = 1,16 \gamma^{-0,0627}$
2860	$K_y = 1,10 \gamma^{-0,0435}$	$K_y = 1,14 \gamma^{-0,0539}$
3750	$K_y = 1,06 \gamma^{-0,0250}$	$K_y = 1,11 \gamma^{-0,0420}$

В целом, известные и полученные в данной работе результаты хорошо согласуются с имеющимися представлениями о влиянии влажности на электрическую прочность изоляции. В частности, известно, что влажность в наиболее сильной степени сказывается на длине положительных стримеров и напряженности поля в них. Протяженность же стримеров зависит от конфигурации электрического поля конструкции, ее длины и формы воздействующего напряжения. Поэтому в общем случае и поправочный коэффициент  $K_y$  должен определяться этими факторами.

Вполне очевидно, что существующие нормативные документы требуют корректировки, для осуществления которой необходимо продолжить исследования, в первую очередь на изоляционных конструкциях высотой порядка 4—10 м. Особое внимание следует уделять испытаниям при отрицательных температурах окружающего воздуха.

## Элегазовый выключатель на напряжение 27,5 кВ для тяговых подстанций железных дорог

Ю.Я. БЫКОВЕЦ, Ю.В. ТОРОПЧИН, В.С. ЧЕМЕРИС

ВЭИ

Г.А. СУВОРОВ

Симферопольский электротехнический завод

В ВЭИ им. В.И. Ленина разработан элегазовый выключатель ВЭО-27,5-20/1250 У1, предназначенный для работы в фидерах контактной сети частотой 50 Гц на тяговых подстанциях и постах секционирования, а также для защиты и оперативных переключений установок емкостной компенсации реактивной мощности с номинальным напряжением 27,5 кВ. Климатическое исполнение — У, категория размещения — 1 по ГОСТ 15150-69. В качестве дугогасительной и изоляционной сред используется элегаз ( $SF_6$ ). Основные технические данные выключателя приведены в таблице.

Параметры	ВЭО-27,5-20/1250 У1 Россия	ВМУЭ-27,5Б-16/1250 УХЛ1 Россия	Fluar PFAM Merlin Gerin, Франция
Наибольшее рабочее напряжение, кВ	29	29	27,5
Номинальный ток отключения, кА	20 (25)*	16	20
Номинальный ток, А	1250 (1400 в течение часа)	1250	1600

Продолжение таблицы

Испытательное напряжение, кВ:	185	—	—
грозовой импульс	95	—	—
одноминутный			
Нижнее рабочее значение температуры окружающего воздуха, °С	-45	-60**	-25
Коммутационный ресурс:			
число отключений полного тока отключения;	30	12	—
число отключений тока 6,5 кА	400	21	—
Срок службы до среднего ремонта, лет	10	4	—
Механический ресурс	5000 исп. 10000	2000	исп. 10000
Габариты, мм:			
высота	2380	2500	2491
ширина	700	730	630
глубина	570	524	636
Масса, кг	380	341	360

\* Достигнуто при испытаниях.

\*\* С системой подогрева дугогасительной среды.

Выключатель представляет собой однополюсный коммутационный аппарат колонковой кон-

струкции, в верхнем изоляторе которого размещается автокомпрессионное дугогасительное устройство. Автокомпрессионное дугогасительное устройство имеет простую конструкцию без главных контактов и с неподвижным цилиндром. Внутри опорного изолятора проходит изоляционная тяга. Изоляционная колонка заполняется элегазом до избыточного давления 0,37 МПа. Колонка полюса выключателя установлена на шкаф, в котором располагается электромагнитный привод ПЭ-1.

Для предотвращения возникновения чрезмерных давлений внутри колонки выключателя в аварийных случаях предусмотрена предохранительная мембрана, которая разрывается при достижении давления 1,0 МПа.

Для поглощения остаточной влаги и очистки элегаза от продуктов разложения, образующихся под действием дуги, выключатель снабжен фильтром-поглотителем.

В шкафу управления смонтировано устройство подогрева (ТЭН) с терморегулятором для поддержания внутри его температуры не ниже  $-10^{\circ}\text{C}$ . Подогревающее устройство мощностью 800 Вт позволяет повысить температуру внутри шкафа от  $-45$  до  $-5^{\circ}\text{C}$  примерно за четыре часа.

Номинальное избыточное давление элегаза в дугогасительном устройстве — 0,25 МПа позволяет обеспечить работу выключателя до температуры  $-45^{\circ}\text{C}$ .

По сравнению с маломасляным выключателем ВМУЭ-27,5Б-16/1250 УХЛ1 элегазовый обладает повышенной отключающей способностью, большим межревизионным сроком, коммутационным и механическим ресурсами (см. таблицу).

Необходимо отметить, что основные комплектующие выключателя: электромагнитный привод, фарфоровые изоляторы использованы из номенклатуры изделий, выпускаемых заводами СНГ.

Выключатель был подвергнут испытаниям на коммутационную способность, электродинамическую и термическую стойкость при протекании сквозных токов короткого замыкания, тепловым испытаниям при протекании номинального тока, испытаниям по проверке электрической прочности изоляции, механическим испытаниям и испытаниям на герметичность.

Испытания проводились в соответствии с ГОСТ и ТУ на выключатель.

**Испытания электрической прочности изоляции.** Проводились испытания внешней и внутренней продольной и опорной изоляции выключателя для класса напряжения 35 кВ. Испытания опорной изоляции проводились при двух положениях тяги: «включено» и «отключено». Изоляция выключателя выдержала все виды воздействий в сухом состоянии и под дождем без замечаний. Длина пути утечки внешней изоляции 108 см.

**Коммутационные испытания.** Испытания проводились в режимах отключения 100%  $I_{\text{o ном}}$ , 60%  $I_{\text{o ном}}$ , 30%  $I_{\text{o ном}}$ , отключение емкостного тока, отключение в цикле АПВ.

При испытании на отключение номинального тока отключения (100%  $I_{\text{o ном}}$ ) выключатель отключал токи до 22,5 кА при амплитуде восстановливающегося напряжения 74 кВ. Время горения дуги находилось в пределах 7—16 мс. При испытании последний положительный опыт был сделан после проведения 34 отключений тока 20 кА. При этом сумма квадратов тока составляет 13600 кА<sup>2</sup>. Это гарантирует проведение без ревизии отключение тока 20 кА — 30 раз (сумма квадратов тока равняется при этом 1200 кА<sup>2</sup>).

Выключатель успешно справился с отключением емкостного тока 300 А. Время горения дуги составляло от 1,5 до 10 мс. Во всех опытах не наблюдалось ни повторных зажиганий, ни повторных пробоев.

Были успешно проведены испытания в сложном цикле 0-0,4-ВО-5-ВО. Наибольшее значение амплитуды тока включения составило 65,6 кА, отключаемые токи достигали 26,5 кА.

Испытания в цикле АПВ показали работоспособность элегазового выключателя при очень небольшом времени паузы (5 с) между циклами ВО.

**Тепловые испытания.** Испытания проводились при длительном протекании тока 1250 А в течение 6 ч до достижения на выключателе установившихся температур. Затем ток был увеличен до 1400 А (требование ТУ) и поддерживался в течение одного часа. Температура на токоведущих элементах выключателя контролировалась с помощью термопар, а на шинах и в окружающей среде — термометрами. Температура окружающего воздуха при испытании составляла  $20^{\circ}\text{C}$ .

Наибольшее значение перегрева наблюдалось на главном подвижном (розеточном) контакте —  $52^{\circ}\text{C}$ , но продолжало оставаться ниже допустимого значения, которое составляет для контактных соединений из меди с покрытием никелем в элегазе —  $80^{\circ}\text{C}$  (ГОСТ 8024-84). Испытания показали возможность выключателя многократно выдерживать токи перегрузки вплоть до 1400 А.

**Испытания на герметичность.** При определении утечки элегаза выключатель, заполненный до избыточного давления 0,37 МПа, помещался в климатическую камеру объемом 8 м. Утечка элегаза определялась при температуре  $+40^{\circ}\text{C}$ ,  $+20^{\circ}\text{C}$ ,  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $-45^{\circ}\text{C}$ .

Утечка рассчитывалась по увеличению концентрации в перемешиваемом воздухе климатической камеры за измеренные промежутки времени. Анализ концентрации элегаза производился с использованием хроматографа фирмы «Хьюлетт Паккард» 5840 с электрозахватным детектором.

Результаты анализа показали, что утечка элегаза не превышает 2% массы элегаза в год при 20°C.

При улучшении качества поверхности резиновых уплотнений и соприкасаемых деталей утечка может быть снижена до 1% в год.

**Механические испытания.** Испытания на надежность по механическому ресурсу проводились путем выполнения 10000 циклов «ВО». Перед испытаниями и во время их контролировались время действия, скорость движения контактов, электрическое сопротивление токоведущей цепи.

Анализ результатов показывает, что до 5000 циклов «ВО» не было отказов в работе выключателя; в интервале от 5000 до 10000 было три отказа в приводном механизме выключателя, в том числе один износовый, что допускается ГОСТ.

После проведения 10000 циклов «ВО» в выключателе не было обнаружено каких-либо отклонений, а скоростные характеристики не изменились.

По результатам испытаний выключателю можно гарантировать механический ресурс 5000 циклов «ВО». Необходимо также отметить, что заводом-изготовителем проводятся работы по повышению износостойкости приводных механизмов до 10000 циклов «ВО» (при испытании до 20000 циклов «ВО»). Это позволит повысить механическую надежность выключателя.

Выпуск выключателя осваивается на Симферопольском электротехническом заводе. Предлагаемый рынок сбыта — электрифицированные железные дороги стран СНГ.

## Новые вакуумные выключатели для комплектных распределительных устройств напряжением 10 кВ

С.И. Вершинина, С.В. Гуров, Д.И. Степанов

ВНИЦ ВЭИ

Новые вакуумные выключатели предназначены для использования в электрических сетях с общим и специальным назначением. Под специальным назначением имеется в виду применение выключателей на предприятиях, которые имеют непрерывные технологические процессы производства с использованием мощных синхронных и асинхронных двигателей напряжением больше 1 кВ. Здесь применяется быстродействующее автоматическое включение резерва (БАВР) в случаях перерыва электропитания на вводной ячейке КЗУ и быстродействующего переключения нагрузки на другую линию с использованием быстродействующих вакуумных выключателей и специального пускового устройства БАВР.

Основные требования к выключателям БАВР — высокая скорость срабатывания, простота и надежность конструкции, универсальность в применении, технологичность в изготовлении, малое потребление энергии (при этом имеется необходимость первых включений без использования мощных сторонних источников энергии), низкая стоимость.

Анализ лучших вакуумных выключателей рассматриваемых параметров, производимых как в РФ (выключатели ВВЭМ-10-20/1600 НПО «ЭЛКО» г. Минусинск), так и за рубежом (например, выключатели ЗАФ(В) фирмы «Сименс» ФРГ), показывает, что они обладают рядом недостатков для использования в комплексах БАВР: малое быстродействие; сложность и низкая надежность

механической части конструкции; конструктивная несовместимость с КРУ отечественного производства для зарубежных выключателей; высокая цена и т. д.

Указанный анализ различных вакуумных выключателей показал, что необходимо создание нового вакуумного выключателя, который не имел бы перечисленных недостатков.

Во ВНИЦ ВЭИ разработаны макетные образцы вакуумных выключателей, которые удовлетворяют указанным требованиям. Здесь применяется, как более простой и надежный, электромагнитный привод, не требующий сложной и менее надежной кинематической части конструкции с пружинно-моторным приводом и редуктором. При этом возникающие проблемы первых включений без внешних источников энергии и больших бросков тока при включении и отключении решаются путем применения импульсного конденсатора сверхвысокой энергии ИКЭ, который медленно запасает эту энергию и быстро отдает ее электромагнитам. Электрическая схема, выполняющая указанную задачу, показана на рис. 1. Замыкание и размыкание цепей производится с помощью тиристорных ключей, что исключает использование быстро выхсяющих из строя силовых контакторов, повышает надежность схемы.

Задача повышения быстродействия при включении и отключении решается путем применения схемы электродинамического привода (ЭДП) с конденсаторами-накопителями повышенного на-

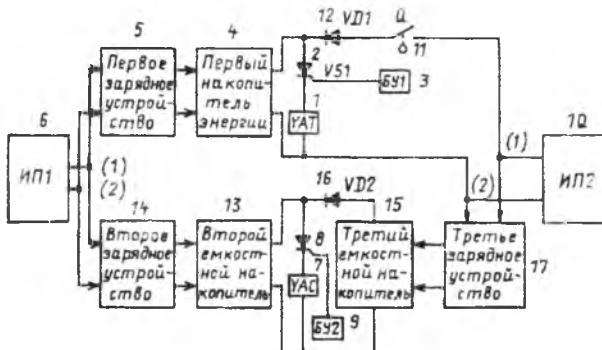


Рис. 1. Структурная электрическая схема выключателя

пряжения, включенными совместно с ИКЭ с развязкой через диоды. При этом сначала срабатывает и дает мощный толчок ЭДП, а затем окончательно завершает процесс включения импульсный конденсатор ИКЭ.

В случае отсутствия в сети электропитания 220 В запасенная энергия в ИКЭ позволит самостоятельно включить и при необходимости отключить выключатель.

На рис. 2 показан вид разработанного вакуумного выключателя на  $U_h=10$  кВ,  $I_h=1600$  А,  $I_{откл}=20$  кА.

Операционный механизм выполнен на высокоточных подшипниках сухого трения, имеет «мертвые положения» двувзвенников включения и отключения. Вместо вала применяется общая легкая прямая тяга, приводящая в движение контакты КДВ. Пружины поджатия находятся вне цепи движения.

Проблема перенапряжений при отключении трехфазной нагрузки отходящих линий подстанций решается путем применения ограничителей перенапряжения ОПНР-10 УХЛ1, включаемых в каждую фазу выключателя.

Основные временные характеристики выключателя следующие:

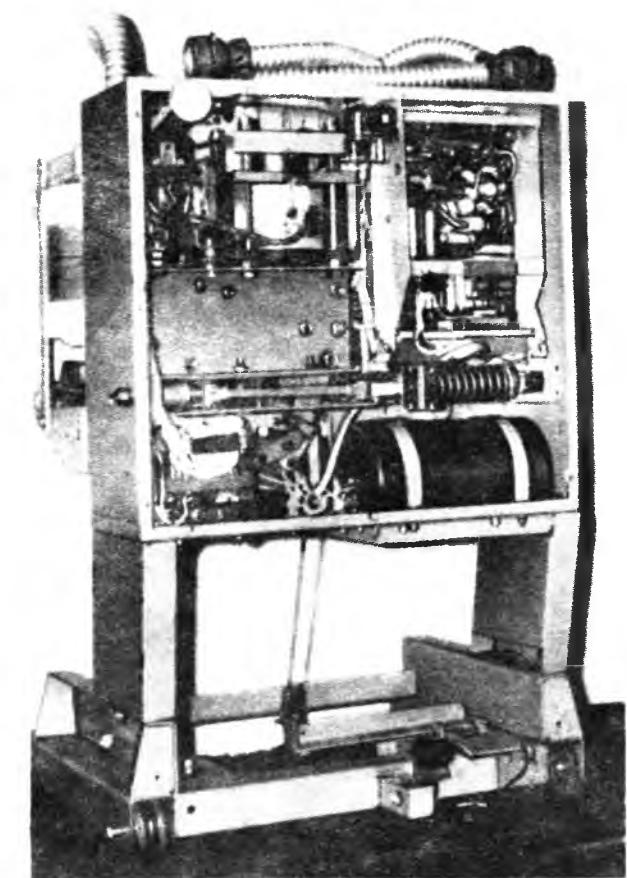


Рис. 2. Электромагнитный привод вакуумного выключателя на  $U_h=10$  кВ,  $I_h=1600$  А,  $I_{откл}=20$  кА

собственное время отключения  $t_{откл}=15$  мс;

собственное время включения в основном режиме  $t_{вкл}=46$  мс;

собственное время включения в специальном режиме  $t_{вкл}=25$  мс.

Общая потребляемая мощность выключателя составляет 300 Вт.

## Комплекс устройств быстродействующего АВР

С.И. ВЕРШИНИНА, Д.И. СТЕПАНОВ, А.Ф. ПИВОВАРОВ, Р.К. САВЗИХАНОВ

ВНИЦ ВЭИ

В настоящее время эффективность использования комплекса устройств быстродействующего автоматического включения резерва (БАВР) на подстанциях 6–10 кВ с синхронной нагрузкой доказана опытом практически двухгодичной эксплуатации на четырех предприятиях нефтехимии и нефтепереработки Самарской области.

На этих предприятиях комплекс устройств БАВР выполнен по традиционной схеме АВР и

включает два вводных и один секционный выключатели на базе быстродействующих вакуумных выключателей с электромагнитным приводом и электродинамическим устройством управления и быстродействующее пусковое устройство БЭ8302 двустороннего действия. Этот комплекс обеспечивает время полного цикла БАВР 0,1–0,11 с практически во всех возможных аварийных перерывах электроснабжения потребителей с синхронной двигателем

ной нагрузкой.

Основные технические характеристики комплекса следующие:

#### Вакуумные выключатели:

Номинальное напряжение, кВ ..... 10  
Номинальный ток, А ..... 1600  
Номинальный ток отключения, кА .. 20  
Полное время отключения, с ..... 0,02  
Собственное время включения, с .... 0,025  
Вид привода — электромагнитный с электродинамическим управлением (ЭДУУ)

#### Электродинамическое устройство управления (ЭДУУ):

Номинальное напряжение заряда конденсаторов, В ..... 850  
Энергия заряда конденсаторов, кДж ..... 1,2  
Время заряда, с ..... 15  
Время срабатывания ЭДУУ ..... 0,003

#### Пусковое устройство БЭ8302:

Время срабатывания пускового устройства по органу минимального напряжения, с ..... 0,035  
по блоку контроля угла, с ..... 0,055  
по реле направления мощности, с ..... 0,045  
Потребляемая мощность, Вт ..... 25

Данный комплекс устройств БАВР на указанных предприятиях размещен в существующих шкафах КРУ на выкатных тележках от масляного выключателя ВМПЭ-10-20/1600 или ВМГ133-10-20/630 и в релейных шкафах КРУ.

Для новых подстанций этот комплекс БАВР размещается в шкафах КРУ серии К104М производства завода «Электрощит» (г. Москва) или КРУ серии К59 наружной установки Куйбышевского завода.

Расчетные и экспериментальные исследования критического времени перерыва различных ответственных потребителей показали, что для более широкого внедрения комплекса устройств БАВР на подстанциях с асинхронной двигательной на-

грузкой 6—10 кВ, а также для подстанций 6—10/0,4 кВ с низковольтной двигательной нагрузкой 0,4 кВ суммарное время перерыва не должно превышать 0,07—0,075 с. В связи с этим на ВНИЦ ВЭИ им. В.И. Ленина в настоящее время ведутся работы по разработке более быстродействующего вакуумного выключателя с временем включения 0,015 с и временем отключения 0,012 с. По основным техническим характеристикам данный выключатель еще отличается от существующего быстродействующего вакуумного выключателя номинальным током отключения 31,5 кА.

Существующее быстродействующее пусковое устройство для БАВР выполнено на аналоговых интегральных микросхемах. Как показано выше, основное время БАВР уходит на определение момента возникновения нарушения электроснабжения 0,035—0,055 с. Для достижения суммарного времени БАВР 0,07—0,075 с время фиксации потери питания пусковым устройством необходимо уменьшить до 0,035 с при любых режимах аварии в цепи питания потребителей. Это возможно только при условии выполнения измерительного органа пускового устройства на новых принципах обнаружения потери питания. При этом данные органы должны иметь высокую помехозащищенность при различных коммутациях в силовых цепях подстанции. В настоящее время по данному пусковому устройству ведутся предварительные работы для создания макетного образца.

Очевидно, что внедрение БАВР на главных понизительных подстанциях (ГПП) может дать наибольший эффект потребителю. Однако данные подстанции, как правило, мощные, и на вводах и на секционировании установлены выключатели на номинальный ток 3200 А и ток отключения 31,5—40 кА. Поэтому перед ВНИЦ ВЭИ в 1994 г. стоит задача разработки быстродействующего вакуумного выключателя на номинальный ток 3200 А, ток отключения 31,5 А с временем включения 0,025 с и отключения 0,02 с.

## Вниманию авторов журнала!

Авторы статей, опубликованных в 1992 и 1993 гг. в журнале «Электротехника», могут получить причитающиеся им авторские экземпляры журналов в редакции.

# Определение начальных напряженностей в элегазовых промежутках с микрошероховатостями

А.А. ЯРОШЕНКО

ВЭИ

При проектировании изоляционных конструкций на основе сжатых газов необходимо учитывать эффект площади поверхности электродной системы, выражющийся в значительном отклонении разрядных характеристик от значений, определяемых законом подобия. Традиционно, эффект площади поверхности связывают с влиянием микронеоднородностей: микрошероховатостей на поверхности электродов и микрочастиц, обусловленных технологией изготовления электродной системы. Увеличение напряженной площади электродов ведет к повышению вероятности возникновения микронеоднородности с экстремальными характеристиками (высотой и формой), росту количества микронеоднородностей и частиц с характеристиками, близкими к экстремальным.

Поскольку большинство процессов, приводящих к разряду в промежутке носят статистический характер, то разрядные характеристики подчиняются статистическим законам. При достаточно высоких давлениях разрядные процессы в промежутках хорошо описываются экстремальными законами распределения, для которых важнейшим параметром является минимальная электрическая прочность [1]. Поэтому один из способов исследования эффекта площади поверхности — анализ уединенного микровыступа с экстремальными характеристиками.

В общем случае напряженность зажигания разряда и пробоя в промежутке с микронеоднородностями определяется двумя факторами: высотой и формой микронеоднородности. Очевидно, что размеры микронеоднородностей определяются материалом электродов, технологией изготовления и, в решающей степени, технологией сборки аппаратов. При существующей сегодня технологии сборки можно считать практически неизбежным существование микронеоднородностей высотой до 200 мкм. Форма этих неоднородностей зависит от целого ряда случайных факторов, и имеет место широчайший набор форм микронеоднородностей.

Основываясь на этом выводе, следует принять, что исследование влияния формы микронеоднородностей на разрядные характеристики в элегазе необходимо проводить для размеров микронеоднородностей порядка сотен микрон. Ранее исследований для микронеоднородностей таких размеров фактически не проводилось. Поскольку микрополя у вершины микронеоднородности такого типа носят сильно неоднородный характер,

то, вероятнее всего, пробивная напряженность будет отличаться от напряженности зажигания разряда, следовательно, необходимы исследования разрядных характеристик как в части пробивной напряженности, так и напряженности зажигания разряда. Последнее особенно актуально применительно к аппаратам постоянного тока, поскольку от наличия ионизационных процессов в газе у микронеоднородностей зависит «проводимость» газа — фактор, влияющий на разрядные характеристики при длительном приложении напряжения постоянного тока.

Были проведены экспериментальные исследования начальных напряженностей в элегазовых промежутках с микровыступами. Эксперименты проводились при воздействии напряжения постоянного тока при положительной и отрицательной полярностях в диапазоне давлений 0,2—1,2 МПа.

В качестве микровыступов использовались травленые швейные иглы. Предварительное травление игл позволило значительно уменьшить размеры кончика иглы (до радиуса порядка 2 мкм). Высота игл менялась в диапазоне 200—600 мкм.

Пример экспериментальных зависимостей начальных напряженностей от давления для игл высотой порядка 300 мкм представлен на рис. 1 и 2 (кривые 1). Полученные результаты могут оказаться полезными для проектирования силовых элегазовых аппаратов. Однако они относятся исключительно к  $SF_6$  в ограниченной области давлений и форм микрошероховатостей. Расширение же области исследуемых параметров микровыступов, давлений и газовых сред достаточно

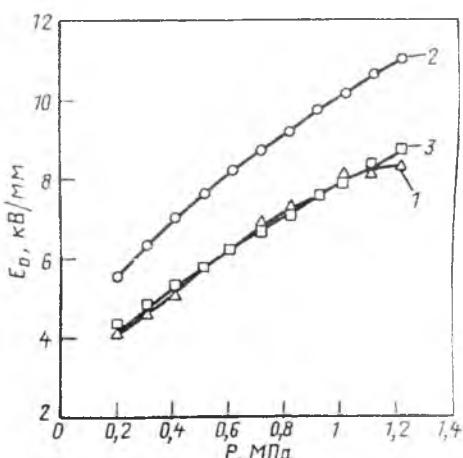


Рис. 1

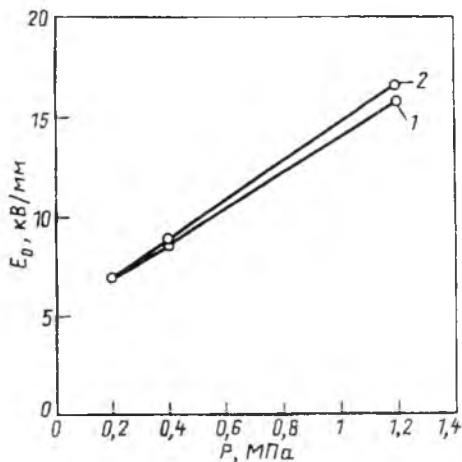


Рис. 2

трудоемко, требует больших затрат времени и средств. Поэтому, безусловно, необходима методика расчетного определения разрядных характеристик промежутков с микровыступами.

На рис. 1 и 2 также представлены расчетные значения начальных напряженностей для тех же игл, рассчитанные по стримерному критерию (кривые 2). Традиционный стримерный критерий для неоднородного поля формулируется следующим образом:

$$\int_0^{x_{kp}} \alpha_{\text{эфф}} dx = K,$$

где  $\alpha_{\text{эфф}}$  — эффективный коэффициент ионизации;  $x_{kp}$  — область промежутка, в котором  $E/P > 88,6$  В/(м·Па);  $K = \ln(N_{kp})$ ;  $N_{kp} = 10^8$  — критическое число электронов.

Чаще всего в расчетах используются следующие величины:  $\alpha_{\text{эфф}}/p = 0,027 \cdot (E/P - 88,6)$ ;  $K = 18$ .

Из рис. 1, 2 следует, что экспериментальные значения начальных напряженностей на отрицательной полярности (рис. 1) значительно ниже расчетных. На положительной полярности (рис. 2) экспериментальные значения достаточно близки к расчетным.

Следует отметить, что константы и аппроксимации, используемые в стримерном критерии, определяются неоднозначно. Была предпринята попытка добиться соответствия между расчетными и экспериментальными значениями начальных напряженностей  $E_h$  для отрицательной полярности прикладываемого напряжения, варьируя различные параметры этого стримерного критерия.

1. Была высказана гипотеза, что, варьируя коэффициент  $K$ , удастся добиться удовлетворительного согласования экспериментальных и расчетных значений.

2. Была предпринята попытка подобрать такой

ход кривой зависимости  $\alpha_{\text{эфф}}/p = f(p)$ , чтобы добиться минимальных различий между экспериментальными и расчетными значениями  $E_h$ .

3. В [2] отмечается, что для очень сильно-неоднородных полей в расчетах  $E_h$  по стримерному критерию возникают ошибки, связанные, по-видимому, с тем обстоятельством, что в таких полях электроны могут не достигать своего конечного распределения по энергиям, и этот эффект может наблюдаться, когда изменение поля на длине свободного пробега электронов достигает примерно 2,5%. Для проверки этой гипотезы в стримерный критерий подставлялась аппроксимация для  $\alpha_{\text{эфф}}$ , зависящая не только от  $E/P$ , но и от  $d(E/P)/dx$ .

4. Была создана модель развития лавины, учитывающая как электростатическое поле, создаваемое электродами, так и поле, обусловленное объемным зарядом хвоста лавины и ее головки.

5. Из-за чрезвычайно высокой напряженности поля у кончика иглы на разрядные процессы может оказывать существенное влияние автоэлектронная эмиссия. Была предпринята попытка учесть этот эффект, варьируя количество начальных электронов, стартующих с катода и принимающих участие в формировании лавины.

К сожалению, ни одна из предложенных гипотез не обеспечила удовлетворительного согласования расчетных и экспериментальных значений  $E_h$ .

Представленные гипотезы рассматривали единенную лавину и ее переход в стример. Было высказано предположение, что на процессы развития лавины влияют объемные заряды, оставленные в промежутке предшествующими лавинами, т.е. процесс развития разряда и формирования стримера рассматривался как следствие нескольких последовательных лавин.

6. Была создана расчетная модель, рассматривающая развитие лавины в поле, рассчитываемом как суперпозиция двух полей:

электростатического, создаваемого зарядами, распределенными по поверхности электродов (статическая составляющая поля);

электрического, созданного ионами (как положительными, так и отрицательными), оставшимися в промежутке после прохождения предшествующих лавин (динамическая составляющая поля).

Статическая составляющая поля предполагалась в процессе всего расчета неизменной. Поскольку подвижности электронов и ионов отличаются примерно на два порядка, то смещение ионов в процессе всего расчета (т.е. прохождения нескольких лавин) не учитывалось.

Было принято, что после прохождения первой лавины в результате некоторых вторичных процессов сразу (без задержки по времени) стартует

следующая лавина. Сами вторичные процессы в расчетной модели не учитывались. Новая лавина развивается уже в суммарном (статическом и динамическом) поле.

При определении начальных напряженностей рассматривались последовательно четыре лавины. На рис. 3 представлено изменение распределения напряженности поля вдоль центральной силовой

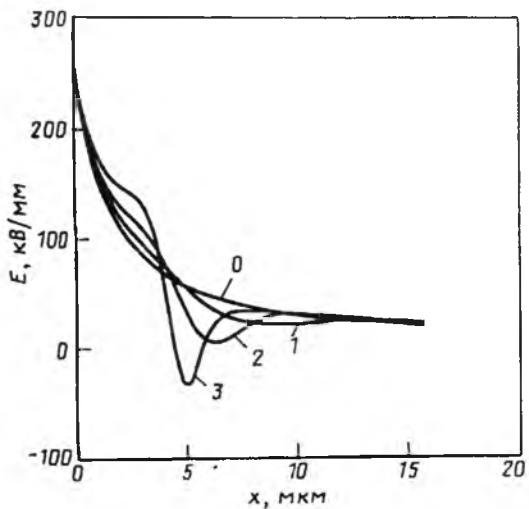


Рис. 3

линии при последовательном прохождении лавин. Положительный объемный заряд хвоста лавины усиливает поле в области, прилежащей к игле, а отрицательный объемный заряд, образованный электронами, прилипающими к нейтральным молекулам в области слабого поля, ослабляет его. В результате на начальной стадии развития лавина набирает больший заряд, но далее условия ее развития ухудшаются. На рис. 4 представлены кривые изменения максимального заряда, набираемого головкой лавины, в зависимости от средней напряженности в промежутке и от номера

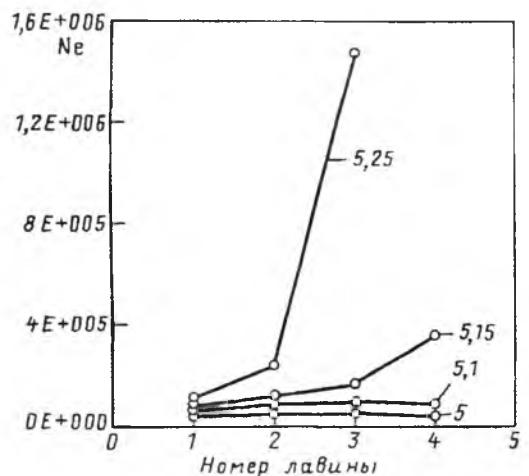


Рис. 4

лавины. Из рис. 4 следует, что до некоторой напряженности разрядные процессы в промежутке носят достаточно устойчивый характер: после прохождения 2-3 лавин внедренный в промежуток объемный заряд начинает препятствовать развитию последующих лавин, количество электронов в головке лавины уменьшается и разрядные процессы затухают. При достижении некоторой напряженности все последующие лавины набирают заряд, больший, чем их предшественницы, и, следовательно, происходит быстрое увеличение объемного заряда, внедряемого в промежуток. В то же время отрицательный объемный заряд препятствует развитию этих разрядных процессов в глубь промежутка.

На рис. 5 представлены значения начальных напряженностей, рассчитанные описанным спо-

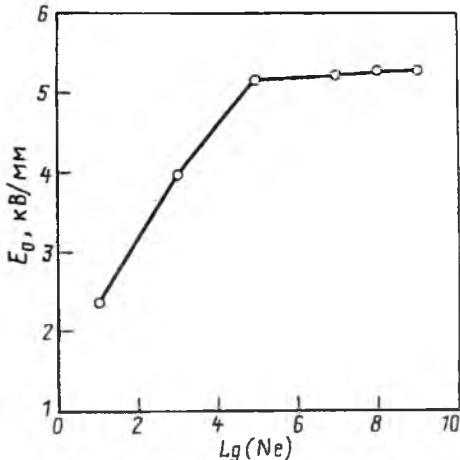


Рис. 5

сбом, в зависимости от пороговой величины количества электронов в головке лавины, выби-раемой в качестве критерия перехода разряда в стримерный. Из рис. 5 следует, что при  $N_{kp} > 10^8$  начальные напряженности остаются практически неизменными, и, следовательно, начальной напряженностью можно считать такую, при которой качественно изменяется характер разрядных процессов в промежутке, и исключить из расчетной модели неопределенную константу  $K$ .

На рис. 6 представлены значения начальных напряженностей в зависимости от количества рассматриваемых последовательных лавин. Из графика на рис. 6 следует, что при количестве лавин, превышающем четыре, начальные напряженности практически не меняются, что и было исполь-зовано при создании расчетной модели. Все пред-ставленные результаты получены на одной и той же игле высотой 330 мкм при давлении  $P = 0,4$  МПа.

На рис. 1 (кривая 3) приведены расчетные



Рис. 6

значения начальной напряженности, рассчитанные новым, модифицированным способом расчета. Полученные значения хорошо согласуются с экспериментальными. Из 18 исследованных игл только у 4 различие между расчетными и экспериментальными значениями превышало 10%, что можно объяснить погрешностями в проведении эксперимента. Но в любом случае, рассчитанные по предложенной методике начальные напряженности были ближе к экспериментальным значениям, чем рассчитанные по классической стримерной теории.

## Выводы

1. Предложена методика расчета начальных напряженностей в сильнонеоднородных полях на отрицательной полярности, основанная на базовых характеристиках газовой среды и общепринятых зависимостях развития газового разряда, поэтому есть основания предполагать, что она окажется применимой и для других газовых сред. Согласование расчетных и экспериментальных значений  $E_h$  следует признать хорошим.

2. На положительной полярности значения начальных напряженностей, рассчитанных по традиционному стримерному критерию, достаточно хорошо совпадают с экспериментальными результатами.

## Список литературы

1. T. Nitta, N. Yamada, Y. Fujiwara. Array Effect Of Electrical Breakdown In Compressed SF<sub>6</sub> // IEEE Trans. 1974. PAS-93. № 2. Р. 623–629.
2. Мик Дж., Крэго Дж. Электрический пробой в газах. М., 1960.

## Перспективы разработки токопроводов с изоляцией сжатым воздухом

В.Н. БОРИН, В.В. ЯКОВЛЕВ

ВЭИ

Известны проблемы прокладки ЛЭП 220–750 кВ и прежде всего в технически экстремальных условиях:

- глубокие энерговоды в крупные города, энергоемкие промышленные зоны с высокой степенью загрязнения;
- прокладка кабельных вставок на участках с большим перепадом высот, при необходимости резких поворотов с малым радиусом, в условиях низких отрицательных температур;
- преодоление значительных водных преград со сложными геоусловиями;
- для воздушных ЛЭП СВН — большие зоны отчуждения, вредные воздействия излучений и электромагнитных полей на живые организмы, борьба с загрязнением изоляции;
- для кабельных линий — ограниченная пропускная способность, недопустимость больших перепадов высот (для маслонаполненных кабелей) ограниченность рабочего диапазона температур окружающей среды.

Предлагается техническое решение этих про-

блем благодаря применению токопроводов с газовой изоляцией как альтернативы открытым ЛЭП и кабельным линиям.

Токопроводы с газовой изоляцией характеризуются значительной пропускной способностью (в несколько раз выше, чем у кабелей с изоляцией маслом).

Для них характерна также существенно меньшая емкость на единицу длины, пожаро- и взрывобезопасность. Токопроводы с газовой изоляцией проще реализуют резкие изгибы при трассировке. Отчуждаемая ими площадь составляет не более 10% соответствующей площади воздушных ЛЭП.

Токопроводы не имеют ограничения по номинальному напряжению, что позволяет решить вопросы экологии, связанные с воздействием электрических полей и излучений на живые организмы.

В общем случае можно рассматривать в качестве основной изоляции для таких токопроводов элегаз или его смесь с другими газами, базируясь на имеющихся разработках КРУЭ. Однако опыт

производства и эксплуатации элегазового оборудования показал как преимущества, так и недостатки применения элегаза.

К определенным трудностям в использовании элегаза следует отнести необходимость обеспечения достаточно высокой степени герметичности оборудования, необходимость специального оборудования для сбора, хранения элегаза, его регенерации (разложения элегаза в результате горения дуги). Как правило, нижний предел рабочей температуры для элегазового оборудования  $-40^{\circ}\text{C}$ , что ограничивает его использование в северных районах. Применение элегаза в протяженных токопроводах означает использование значительного количества элегаза, необходимость капитальных вложений в развитие производства элегаза. Накопление значительных масс элегаза может также представить опасность с точки зрения экологии.

Все указанные проблемы позволяет решить предлагаемый токопровод с использованием в качестве изоляционной среды сжатого воздуха высокого давления. При проработке предлагаемого технического решения просматривался вариант применения сжатого воздуха с рабочим давлением 4 МПа (хотя уровень давления может уточняться в процессе разработки).

Вопросы электрической прочности сжатого воздуха рассматривались ранее применительно к воздушным выключателям 110–1150 кВ. Известно [1], что при давлении воздуха порядка 1 МПа и выше на электрическую прочность воздуха в очень сильной степени влияет наличие различного рода неоднородности и загрязнения. Это предопределяет значительный разброс в значениях пробивной напряженности. От чистоты поверхности электродной системы, качества подготовки и чистоты сжатого воздуха фактически зависит эффективность сжатого воздуха как изоляционной среды.

На рис. 1 приведены зависимости пробивной напряженности от давления воздуха, откуда видно, что при наличии фильтра механической очистки в системе подачи сжатого воздуха значения пробивной напряженности существенно повышаются. Исследования [2] показали также, что дополнительная тщательная подготовка электродной системы и длительная продувка очищенным сжатым воздухом позволяют достичь высоких значений пробивной напряженности. Тем не менее, даже в этом случае они составляют лишь 65% значений, определяемых в соответствии с законом подобия газового разряда.

Значения пробивной напряженности для такого же электродного устройства в атмосфере элегаза при давлении 0,4 МПа примерно соответствуют значениям пробивной напряженности при давлении сжатого воздуха 4,0 МПа (при наличии фильтра).

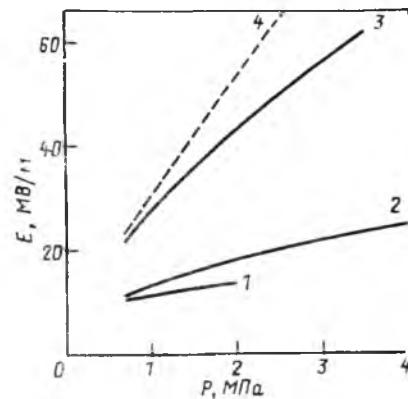


Рис. 1. Зависимость  $E(P)$  (напряжение промышленной частоты):  
1 – без фильтра; 2 – с фильтром; 3 – с фильтром и длительной продувкой; 4 – закон подобия газового разряда

Однако в случае протяженных токопроводов площадь электродной системы значительно превышает ту, при которой ранее выполнялись исследования изоляции сжатым воздухом. Очевидно, что в данном случае необходимо учитывать эффект площади поверхности электродной системы. Для элегазовой изоляции эффект площади, т. е. зависимость пробивной напряженности от эффективной площади электродной системы, экспериментально исследован в широком диапазоне значений площади электродов, предложены различного вида экстраполяции этой зависимости в область больших значений эффективной площади. Для воздуха подобных данных в настоящее время нет, однако при прогнозировании значений пробивной напряженности сжатого воздуха с учетом эффекта площади правомерно воспользоваться теми же подходами, что для элегазовой изоляции.

Традиционно эффект площади поверхности связывают с влиянием микрошероховатостей на поверхности электродов и микрочастиц, обусловленных технологией изготовления электродной системы. Увеличение площади электродов ведет к повышению вероятности возникновения микронеоднородностей с экстремальными характеристиками (высотой и формой), росту количества микронеоднородностей и частиц с характеристиками, близкими к экстремальным.

При давлениях газа выше атмосферного значения пробивных напряженностей в промежутках с относительно однородным электростатическим полем хорошо описываются экстремальными законами распределения, для которых важнейшим параметром является минимальная электрическая прочность (пробивная напряженность) [3]. Одним из способов исследования эффекта площади поверхности является анализ уединенного микропространства с экстремальными характеристиками.

Очевидно, что размеры микронеоднородностей

определяются материалом электродов, технологией их изготовления и технологией сборки аппаратов. При существующей сегодня технологии сборки элегазовых аппаратов и значениях пробивной напряженности, реально достигаемых в аппаратах, можно считать, что наличие микро-неоднородностей высотой более 100–150 мкм маловероятно. Форма этих неоднородностей зависит от целого ряда случайных факторов. Для устройств с изоляцией сжатым воздухом можно полагать, что уровень технологии изготовления и подготовки будет аналогичен тому, который достигнут для элегазового оборудования.

Основываясь на этом выводе, исследования влияния микронеоднородностей на разрядные характеристики в сжатом воздухе были проведены для размеров микронеоднородностей порядка сотен микрон. Были проведены измерения как напряженностей начала коронного разряда, так и пробивных напряженностей. На рис. 2, 3 приведены результаты этих исследований. Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют о том, что практически во всем исследуемом диапазоне давлений и высот микронеоднородно-

стей начальные напряженности, полученные при положительной полярности острия, превосходят таковые при отрицательной полярности. Для пробивных напряженностей характерны обратные соотношения при положительной и отрицательной полярности острия. Как и следовало ожидать, в области малых высот микровыступов, начальные и пробивные напряженности сближаются. По данным рис. 1 в случае отсутствия фильтра очистки от механических частиц возможно нахождение частиц с максимальным размером 1–2 мм и значения пробивной напряженности при давлении воздуха 1 МПа составляют порядка 12 кВ/мм. Это значение удовлетворительно согласуется с полученными в данной работе значениями пробивной напряженности для высот микровыступов 500 мкм и более (рис. 2).

Однако токопроводы будут характеризоваться весьма значительной эффективной площадью электродной системы. Ориентировочно на 1 км токопровода эффективная площадь составит несколько квадратных метров. Для таких площадей, очевидно, следует ориентироваться на несколько большие размеры микронеоднородностей, чем в случае изоляционных узлов аппаратов.

Начальные напряженности используются в качестве основы для выбора рабочих градиентов в токопроводе, поскольку от наличия ионизационных процессов в газе у микронеоднородностей зависит «проводимость» газа — фактор, влияющий на разрядные характеристики изоляторов при длительном приложении напряжения.

Основываясь на изложенных соображениях, можно считать реально достижимыми значения пробивной напряженности 15–17 кВ/мм и начальной напряженности 4–5 кВ/мм.

Поддерживающие токоведущую жилу изоляторы токопровода с изоляцией сжатым воздухом выбираются то тем же критериям, что в случае элегазовых аппаратов. К ним относятся: достижение известных рабочих напряженностей в теле изолятора, минимизация нормальной к поверхности диэлектрика составляющей электрического поля.

Токопровод может быть как в однофазном исполнении, так и в трехфазном. В первом случае он представляет собой токоведущую трубу, расположенную по оси стальной заземленной трубы. Токоведущая труба фиксируется при помощи изоляторов из эпоксидного компаунда. Изоляторы негерметичны и выполняют только функцию поддержки токоведущей трубы.

Известно, что в однофазных токопроводах будут протекать обратные токи по внутренней поверхности стальной заземленной трубы. Поскольку глубина проникновения тока в стальной трубе составит не более 1 мм, потери электроэнергии в корпусе токопровода могут быть довольно за-

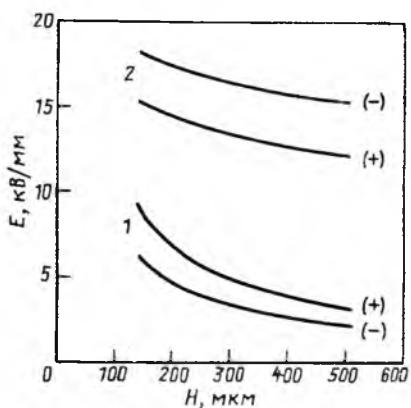


Рис. 2. Зависимость  $E(H)$  (постоянный ток, давление 1 МПа): 1 — начальная напряженность коронного разряда; 2 — пробивная напряженность

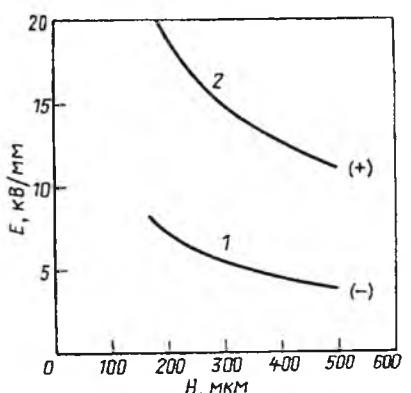


Рис. 3. Зависимость  $E(H)$  (постоянный ток, давление 4 МПа): 1, 2 — то же, что и на рис. 2

метны. Однако они могут быть существенно уменьшены, если по внутренней поверхности заземленного корпуса проложить несколько токоведущих шин (предлагается три), которые возьмут на себя основную долю обратного тока. Использование обратных шин приводит к тому, что в токопроводе может быть сформирована выемная часть как самостоятельная конструкция. Выемная часть представляет собой токоведущую трубу, два изолятора и закрепленные на этих же изоляторах три шины для протекания обратного тока. Однофазный токопровод должен надежно заземляться на концах. Особых требований к заземлению вдоль трассы токопровода не предъявляется, поскольку на внешней поверхности трубы ток практически отсутствует.

Трехфазное исполнение токопровода предусматривает размещение трех токоведущих труб внутри заземленного корпуса в вершинах равностороннего треугольника. Поэтому конструкция поддерживающих изоляторов в этом случае несколько сложнее. В трехфазных токопроводах нет необходимости применять шины для обратного тока, конструкция выемной части упрощается, однако появляется проблема заземления электродов изоляторов (внутренняя поверхность заземленной стальной трубы должна покрываться эмалью или иным покрытием). В связи с этим усложняется технология соединения секций между собой на месте установки. Конструктивно сложнее решаются оконцевания такого токопровода.

Для напряжений 220–500 кВ токопровод будет иметь диаметр 300–600 мм в однофазном исполнении и вдвое больший для трехфазного токопровода. В таблице приведены сравнительные данные по техническим параметрам (расчет) токопроводов 330 и 500 кВ.

Стоимость 1 км токопровода 500 кВ с изоляцией сжатым воздухом составит 0,4–0,5 стоимости токопровода с элегазовой изоляцией или маслонаполненного кабеля, а с учетом пропускной способности эффект от применения токопровода с изоляцией сжатым воздухом увеличивается. Следует также отметить существенное снижение (более чем в 10 раз) ежегодных эксплуатационных расходов по сравнению, например, с токопроводами с элегазовой изоляцией.

Контроль за состоянием изоляции в токопро-

Параметр	500 кВ		330 кВ	
Количество фаз	1	3	1	3
Диаметр корпуса, мм	500	1100	400	900
Давление воздуха, МПа	4	4	4	4
Предельная нагрузочная способность, кА	5,5	6,5	4,5	
Потери ( $I=1$ кА), кВт/км				
в корпусе	140	40	165	
суммарные	165	65	90	
Термическая стойкость, кА				
1 с		250	250	
5 с		50	50	
Емкость фазы, пФ/м		40	47	
Индуктивность фазы, мкГн/м	0,14		0,12	

воде сводится к контролю за давлением воздуха и его влажности. При токопроводе должна быть создана станция подготовки сухого воздуха. Динамическая сушка совмещается с автоматической адсорбционной для достижения необходимого уровня сухости воздуха (обеспечение минимальной температуры эксплуатации  $-45$  или  $-60^{\circ}\text{C}$ ). Станция должна иметь два режима работы: максимальная производительность для продувки токопровода в целях просушки и номинальная производительность для поддержания требуемого уровня сухости в эксплуатации.

Таким образом, существует проблема протяженных токопроводов в электроэнергетике, а имеющийся в ВЭИ научно-технический задел свидетельствует о ее реализуемости в рамках существующих технологий. Для постановки на производство и эксплуатацию предлагаемых токопроводов необходимы крупномасштабное макетирование и опытная эксплуатация.

#### Список литературы

1. Сысоев М.И., Яковлев В.В. Внутренняя изоляция воздухонаполненных коммутационных аппаратов при повышенных давлениях // Электротехника. 1970. № 3.
2. А.с. 477469 СССР. Способ повышения электрической прочности газонаполненных изоляционных конструкций / М.И. Сысоев, В.В. Яковлев // Открытия. Изобретения. 1975. № 26.
3. Nitta T., Yamada N., Fujiwara Y. Area Effect of Electrical Breakdown in Compressed SF<sub>6</sub> // IEEE Trans. on PAS. 1974. Vol. 93, № 2. P. 623–629.

# Рентгеновское питающее устройство

Э.С. ЕРМОЛОВИЧ, В.Г. ФИЛИППОВ, Н.М. ЛЕПЕХИН,  
Н.А. СПОРЫХИН, Ю.С. ПРИСЕКО, А.С. ДЕМЬЯНЧИК

ВНИЦ ВЭИ, г. Истра

Рентгеновское питающее устройство (РПУ) представляет собой специализированный источник питания, обеспечивающий электропитание рентгеновских трубок медицинских диагностических комплексов, включая ангиографические, сканирующие и компьютерные томографы.

РПУ обеспечивает формирование высоковольтного прямоугольного импульса для питания анодной цепи рентгеновской трубки и питание переменным током ее цепи накала.

В современных РПУ для ограничения радиационной нагрузки на пациента и обеспечения повторяемости условий съемки регулируемый по амплитуде и длительности импульс анодного питания имеет короткие фронты, незначительные пульсации на полке, высокую точность поддержания заданного значения амплитуды напряжения в широком диапазоне изменения нагрузки (тока трубки) и напряжения первичного источника питания. Большая мощность источника анодного напряжения дает возможность улучшить качество снимков путем сокращения их длительности. Широкий диапазон изменения длительности анодных импульсов и мощности в сочетании с малыми пульсациями на полке делают РПУ универсальным.

Для снижения уровня требований к мощности питающей сети в РПУ применены молекулярные конденсаторы как промежуточный накопитель энергии. Выходная мощность 50 кВт обеспечивается при питании от однофазной сети с потребляемой мощностью не более 2 кВт. Рентгенодиагностический комплекс с таким РПУ может быть использован в отдаленных медицинских учреждениях и даже в частной лечебной практике.

Предусмотрена возможность комплектации РПУ мощным сетевым трехфазным выпрямителем, если использование промежуточного накопителя экономически невыгодно.

## Техническая характеристика

Режим работы ..... Импульсный  
Параметры импульса:

длительность переднего  
фрона импульса, мс ..... Не более 1  
длительность импульса, с ..... 0,002—6  
мощность в импульсе, кВт ... До 50

Питание цепи анод—катод .....	Двуполярное относительно заzemленной средней точки
Напряжение в цепи анод—катод, кВ .....	40—125
Ток в цепи анод—катод, мА .....	1—800
Режим работы .....	Повторнократковременный
Время работы источника канала, с	
подканал .....	Непрерывно
форсированный режим .....	1
рабочий режим .....	6
Максимальная мощность источника накала, Вт:	
в режиме подканала .....	50
в форсированном режиме .....	150
в рабочем режиме .....	100

Главная цепь РПУ состоит из промежуточного накопителя энергии с зарядным устройством, среднечастотного преобразователя и трансформаторно-выпрямительного блока. С промежуточного напряжения 220 В питание подается на преобразователь, где преобразуется в напряжение средней частоты (5—10 кГц) и после повышения, выпрямления и сглаживания пульсаций в ТВБ поступает на рентгеновскую трубку для питания ее анодной цепи.

Источник питания накала представляет собой регулируемый генератор переменного тока, подключаемый через изолирующие трансформаторы, расположенные в ТВБ, к накалу рентгеновской трубки.

Формирование анодных импульсов осуществляется включением (передний фронт), регулированием (полка) и выключением (задний фронт) преобразователя. Длительность переднего фронта определяется скоростью зарядки высоковольтных конденсаторов и емкостей высоковольтных кабелей подключения трубки. Длительность заднего фронта определяется пассивным разрядом емкостей на нагрузку.

Режим работы анодного источника (главной цепи) повторно кратковременный: после кратковременного включения следует пауза.

Интенсивность накала может плавно регулироваться. Регулируемым параметром блока накала является ток накала на первичной стороне изолирующих трансформаторов накала (на выходе блока накала). Предусмотрены три режима блока накала: непрерывный длительный (поднакал), кратковременный, предшествующий рабочему режиму (форсированный режим) для быстрого вывода температуры накала на заданный уровень, рабочий на время включения анодного источника.

Основным элементом промежуточного накопителя энергии являются два молекулярных конденсатора, подключаемых к первичному источнику питания через зарядное устройство. В накопителе запасается энергия, достаточная для одного снимка. Повторная зарядка накопителя происходит за время не более 50 с.

Среднечастотный преобразователь состоит из двух мостовых резонансных инверторов на тиристорах с диодами встречного тока: по одному для питания анода и катода рентгеновской трубы. На стороне постоянного тока инверторы соединяются параллельно. В диагонали переменного тока через коммутирующие резонансные конденсаторы включаются первичные обмотки повышающих трансформаторов трансформаторно-выпрямительного блока.

Резонансный инвертор в РПУ работает как устройство дозируемой передачи энергии из источника (силового блока питания) в высоковольтные сглаживающие устройства (высоковольтные фильтрующие конденсаторы трансформаторно-выпрямительного блока и емкости высоковольтных кабелей). Процесс формирования анодных импульсов представляет собой чередующиеся этапы зарядки этих сглаживающих устройств и их пассивной разрядки на нагрузку. Уровень пульсаций напряжения на полке анодных импульсов определяется параметрами этапов зарядки—разрядки: дозой энергии, длительностью зарядки, интенсивностью разрядки (током нагрузки). Инвертор содержит также дополнительную тиристорную ветвь, позволяющую осуществить регулирование дозы энергии путем управления фазой импульсов ее тиристоров.

Анодный и катодный инверторы работают со сдвигом по фазе на четверть периода. После двухполупериодного выпрямления частота пульсаций питающих напряжений анодной и катодной цепей вдвое превышает частоту работы инверторов, а сдвиг их фазы составляет полпериода частоты пульсаций. Поэтому частота пульсаций напряжения анод—катод превышает частоту преобразования в 4 раза.

Предельная мощность инвертора определяется

наибольшей частотой преобразования и энергомощностью коммутирующего (дозирующего) конденсатора. За один период преобразования коммутирующий конденсатор дважды: при включении первой и второй пары тиристоров перезаряжается от положительного до отрицательного напряжения и обратно.

Трансформаторно-выпрямительный блок предназначен для формирования напряжений питания рентгеновской трубы и измерения параметров анодных импульсов. ТВБ состоит из двух высоковольтных формирователей (по одному для питания анода и катода трубы), изолирующих трансформаторов накала (для питания накала большого и малого фокусов трубы), датчиков тока и напряжения в цепях анодного и катодного высоковольтных формирователей.

Высоковольтный формирователь представляет собой однофазный повышающий трансформатор, включенный на выпрямитель со сглаживающими конденсаторами, собранный по схеме удвоения. Анодный и катодный формирователи на стороне постоянного тока соединены последовательно через измерительные шунты, образуя среднюю точку главной цепи анодного источника питания. Средняя точка заземлена.

В качестве датчиков напряжения используются компенсированные экранированные омические делители напряжения.

Источник питания накала представляет собой транзисторный генератор переменного синусоидального тока повышенной частоты (5 кГц) и регулируемой амплитуды. Выбор синусоидальной формы тока накала позволяет упростить управление током накала благодаря простой пропорциональной связи между амплитудой и действующим значением.

Источник питания накала состоит из сетевого выпрямителя, транзисторного ключа, широтно-импульсного модулятора и фильтра. В бестрансформаторном сетевом выпрямителе однофазное напряжение 220 В, 50 Гц преобразуется в постоянное напряжение 300 В, которое транзисторным ключом преобразуется в последовательность прямоугольных импульсов частотой 5 кГц. Ширина импульсов регулируется так, что отношение длительности импульса к периоду последовательности изменяется от 0 до 0,5. Последовательность прямоугольных импульсов подается на фильтр низкой частоты, где из нее выделяется первая гармоника. Амплитуда первой гармоники зависит от относительной ширины импульсов и путем изменения этой ширины может изменяться от нуля до наибольшего значения. Соответствующее управление ключом осуществляется широтно-импульсным модулятором, который в контуре обратной связи настраивает относительную ширину импульсов так, чтобы поддержать заданный параметр

— значение тока анода.

**Аварийные и переходные режимы.** Короткое замыкание в нагрузке для инвертора выбранного типа не вызывает сверхтоков. Резонансный перезаряд коммутирующего конденсатора в режиме короткого замыкания развивается так же, как и в нагрузочном режиме, а ток в инверторе ограничен характеристическим сопротивлением резонансного контура. В рентгеновской трубке при ее пробое из-за ограниченного значения и пульсирующего характера тока создаются условия для восстановления ее электрической прочности и продолжения экспозиции после пробоя. Потеря накала трубки приводит к прекращению анодного тока. Однако анодное напряжение удерживается при этом на уровне задания регулятором среднечастотного преобразователя, и перенапряжений на трубке не появляется.

В инверторах преобразователя возможен режим сквозного горения, представляющий собой короткое замыкание для накопителя и зарядного устройства. Отрицательные последствия такого аварийного режима сводятся к минимуму регулятором зарядного устройства.

Сверхтоки в схеме источника питания накала ликвидируются плавким предохранителем.

**Конструкция.** Стойка преобразователей выпол-

нена в виде шкафа, собираемого из алюминиевых уголковых профилей. С боков и сверху шкаф закрыт плоскими металлическими шторками. Изнутри слева и справа по бокам шкафа устанавливаются вертикально по всей его высоте два короба, к которым крепятся блоки стойки преобразователей. В самой нижней части шкафа располагается силовой блок питания, над ним — среднечастотный преобразователь, затем источник питания накала. В верхней части шкафа предусматривается место для блока управления. Межблочные соединения осуществляются в коробах: силовые — в правом, сигнальные — в левом. В правом коробе размещаются также силовые коммутационные аппараты.

Блоки управления силового блока питания, среднечастотного преобразователя и источника питания крепятся к этим силовым блокам.

Элементы трансформаторно-выпрямительного блока монтируются на раме, погружаемой в бак с трансформаторным маслом. На крышке бака размещаются высоковольтные разъемы для подключения анодного и катодного кабелей и клеммник для подключения силовых низковольтных и измерительных цепей. На клеммнике располагаются также шунты для измерения тока трубы, элементы нижних плеч делителей.

---

## Комплекс программ для численного моделирования трехмерных задач электрофизики, электротехники и техники высоких напряжений

Ю. ЕЛИСЕЕВ, А. СТАРКОВ

ВНИЦ ВЭИ, г. Истра

Во ВНИЦ ВЭИ разработан и успешно применяется комплекс программ, ориентированный на решение трехмерных задач электрофизики, электротехники и техники высоких напряжений.

**Накоплен значительный опыт при решении следующих задач:**

1. Расчет всевозможных характеристик трехмерного электростатического поля в аппаратах и устройствах высокого напряжения (ВН). Выравнивание поля, оптимизация, оценка электрической прочности с учетом, где это необходимо, «напряженной площади» или «напряженного объема».

2. Расчет частичных емкостей системы проводников в трехмерной конструкции, включающей диэлектрики. Проводники могут быть любой формы, в том числе и в виде тонких незамкнутых

оболочек.

3. Расчет трехмерного поля при наличии поверхностного, объемного линейного или точечного зарядов. Разработка расчетных моделей для исследования процессов развития разряда с учетом геометрии окружения. Расчет поля геометрических «объектов» в заданном внешнем поле, например, в поле «объемного» заряда заданной формы и с заданным распределением плотности заряда.

4. Расчет параметров электрических схем замещения устройств ВН (делителей напряжения, нагрузки генераторов ВН и т. д.) и элементов аппаратов ВН (обмотки трансформатора, ввода и т. д.). Исследование переходных процессов в электрических схемах при воздействии импульса заданной формы и величины. Расчет поля в самый «неблагоприятный» для изоляции устройства

ВН момент времени. Исследование путей компенсации влияния на импульс паразитных (геометрических) емкостей.

5. Выбор оптимальной схемы источника высоковольтных импульсов исходя из параметров формируемого импульса и технических требований к формирователю. Расчет схем при наличии коммутаторов, линий с распределенными параметрами и нелинейных элементов.

На основе разработанного комплекса программ для решения конкретных задач формируются проблемно-ориентированные программы с графическим представлением расчетной модели на экране компьютера и выводом результатов в виде эпюор, картин изолиний и силовых линий, таблиц и т.д. Такие проблемно-ориентированные программы, разработанные в соответствии с требованиями заказчика, используются, в частности, во ВНИЦ ВЭИ, ВЭИ, МЭИ и АО «Изолятор».

В качестве примеров использования разработанного комплекса программ в статье приведены краткие характеристики некоторых из сформированных на его основе проблемно-ориентированных программных комплексов.

**Программный комплекс «EMK15»** предназначен для расчета собственных и взаимных частичных емкостей тел-электродов в трехмерной конструкции. Имеющиеся в конструкции границы раздела сред (поверхности проводников, тонкие оболочки, границы раздела диэлектриков) представляются в расчетной модели набором из типовых поверхностей. В качестве последних выбраны шесть поверхностей: сферическая, коническая (в частном случае — цилиндрическая), тороидальная, круг, параллелограмм (прямоугольник) и прямоугольный треугольник. Принадлежность поверхности к конкретному телу определяется по номеру тела. Базовый вариант EMK15 позволяет использовать в расчетной модели до 100 поверхностей, задавать до 15 тел-электродов, учитывать наличие до трех плоскостей симметрии. Формирование расчетной модели (подготовка исходных данных) осуществляется в режиме диалога без графического представления на экране дисплея. Результаты расчета выводятся в виде таблицы значений частичных емкостей.

Комплекс «EMK15» позволяет рассчитывать емкости в сложных трехмерных конструкциях, однако требует квалифицированного пользователя, имеющего опыт в численном моделировании и знакомого с методом интегральных уравнений [1, 2].

**Программный комплекс «SASEM»** предназначен для исследования реакции «заземлителя» на воздействие тока молнии 1,2/50 мкс или тока КЗ промышленной частоты. «Заземлитель» представляет собой расположенную в земле сетку из тонких цилиндрических проводников. В узлах по

периметру сетки, перпендикулярно ее плоскости, расположены вертикальные заземлители в виде тонких цилиндрических проводников. Кроме данных заземлителей в любых других узлах сетки могут быть расположены дополнительные заземлители.

При проведении расчета задаются число узлов прямоугольной сетки по ее сторонам, размер ячейки сетки, глубина залегания сетки, удельное сопротивление земли (земля может быть из двух слоев с разным сопротивлением), а также расположение, длина и диаметр дополнительных заземлителей. По результатам расчета трехмерного электростатического поля определяются значения сопротивлений в электрической схеме замещения «заземлителя» и исследуется его реакция на воздействие тока молнии или тока КЗ промышленной частоты. Импульс тока может быть подведен к одному или нескольким узлам схемы (до 6). В нескольких узлах схемы (до 6) можно рассчитанное значение сопротивления заменить заданным (это будут узлы возврата тока). Выходные данные (напряжения в узлах схемы, токи в ветвях между узлами, токи в землю) можно просмотреть при помощи какого-либо графического пакета, например, GRAPHER. Пользователь также может просмотреть рассчитанные значения сопротивлений, эквивалентное сопротивление «заземлителя», значения напряженности поля и значения индуктивности прутка сетки на единицу длины «при высокой частоте».

**Программные комплексы «WWOD», «OTWOD», «MFIS»** предназначены для расчета характеристик трехмерного электростатического поля в трансформаторе в месте установки высоковольтного ввода («WWOD»), вблизи перемычки между соседними фазами («OTWOD») и в межфазовой изоляции («MFIS»). Ввод значений геометрических параметров исследуемых промежутков осуществляется в удобном для пользователя виде с графическим представлением сечений конструкции на экране компьютера. В расчетных моделях представлены все влияющие на характеристики поля элементы конструкции. В каждом комплексе задается порядка 30 геометрических и физических параметров.

Комплекс «WWOD» рассчитывает распределение напряженности поля  $E$  по электростатическому экрану ввода, по уравнительным обкладкам и изоляции на них, по отводу ввода и его изоляции, по фарфору ввода и другим элементам конструкции. Результаты счета представлены в виде эпюры напряженности, эпюры  $E_{ср}$  вдоль силовых линий в масляных каналах внутри ввода, картин эквипотенциалей и силовых линий, значения «напряженной площади» для электростатического экрана.

Комплекс «OTWOD» рассчитывает характеристи-

стики поля в промежутке «перемычка—соседние фазы—бак трансформатора». Результаты счета представлены в виде эпюор напряженности и картин эквипотенциалей в задаваемых пользователем сечениях, значения «напряженной площади» для изоляции перемычки и значения «напряженного объема» масла вблизи перемычки.

Комплекс «MFIS» рассчитывает распределение  $E$  по соседним обмоткам (фазам) трансформатора, по емкостным и прессующим кольцам, по баку трансформатора и другим элементам конструкции. Результаты расчета представлены в виде эпюоры  $E$  вдоль границ раздела сред в межфазовой изоляции, картин эквипотенциалей и силовых линий. Пользователь может также задать форму и расположение диэлектрического барьера и посмотреть картину силовых линий и эпюору  $E_{ср}$  в масляном канале между твердой изоляцией емкостного кольца и барьером.

Для указанных программных комплексов картины поля и эпюры напряженностей можно распечатать. Несмотря на сложность расчетных моделей, расчет поля и эпюры  $E$  на РС АТ 486 не превышает 15 мин.

Программный комплекс «LETAP» предназначен для расчета характеристик трехмерного электро-

статического поля летательного аппарата, находящегося вблизи Земли (до 10 км) во внешнем электрическом поле, например, в поле грозового облака. Геометрия летательного аппарата описывается более чем тридцатью параметрами, что позволяет в значительных пределах изменять форму его корпуса, крыльев, носовой и хвостовой частей. Ввод параметров осуществляется с графическим представлением на экране дисплея. Результаты расчета представлены в виде эпюор напряженности в двух сечениях, картин эквипотенциалей и силовых линий. С целью исследования молниепоражаемости летательного аппарата рассчитывается эпюра  $E_{ср}$  вдоль силовых линий заданной длины. Для удобства пользователя на картину поля можно наложить масштабную сетку.

#### Список литературы

1. Методы расчета электростатических полей / Н.Н. Миролюбов, М.В. Костенко, М.Л. Левинштейн и др. М.: Высшая школа, 1963.
2. Колечицкий Е.С., Елисеев Ю.В. Экономичный алгоритм расчета трехмерных электрических полей // Изв. вузов. Энергетика. 1986. № 2.

---

## Разработка делительных конденсаторов дугогасительных устройств на основе полимерной пленочной изоляции, пропитанной элегазом

А.А. ДЕМКИН

ВЭИ

В настоящее время в качестве делительных конденсаторов для элегазовых выключателей используются конденсаторы с пропиткой изоляционными жидкостями, которые имеют достаточно большую емкость, позволяющую получить необходимое распределение напряжения по разрывам и обеспечивающую отключающую способность выключателя. Однако такие конденсаторы имеют ряд существенных недостатков. Прежде всего у них есть собственный корпус, что приводит к значительному увеличению габаритов дугогасительного модуля (для баковых выключателей и выключателей КРУЭ на 25—30%, а для отдельно стоящих выключателей почти в два раза). Кроме того, конденсаторы с пропиткой изоляционными жидкостями требуют надежной герметизации, а также компенсационных устройств, обеспечивающих нормальную работу при изме-

нениях температуры.

Все эти недостатки можно устранить, если вместо изоляционных жидкостей пропитывать конденсаторы для элегазовых выключателей самим элегазом. Тогда конденсатор может быть помещен внутри дугогасительного модуля и стать его составным элементом. При этом конденсатор можно расположить coaxialno с межконтактным промежутком и улучшить распределение электрического поля в нем. Как показали предварительные расчеты, максимальную напряженность поля можно уменьшить на 15—25%. Для отдельно стоящего выключателя можно также улучшить распределение электрического поля на поверхности изоляционного корпуса. Кроме того, такие конденсаторы имеют меньшую массу и являются пожаровзрывобезопасными и экологически чистыми.

Как показали исследования, наиболее перспективно решение создания конденсатора с полимерной планочной изоляцией, пропитанной шестифтористой серой, либо с комбинацией пленочной и бумажной изоляции, пропитанной  $SF_6$ .

**Исследование электроизоляционных характеристик полимерной пленочной изоляции, пропитанной элегазом.** На рис. 1 показан эскиз модели, на которой исследовали электроизоляци-

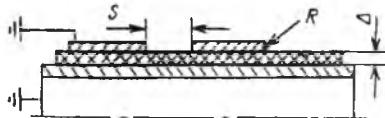


Рис. 1. Исследуемая модель

онные свойства полимерной пленочной изоляции, пропитанной элегазом. Она представляла собой заземленный алюминиевый цилиндр диаметром 24 мм, на который наматывалась пленочная изоляция. Сверху пленочной изоляции находились два электрода: высоковольтный и заземленный, выполненные из медного эмалированного провода или из алюминиевой фольги с загнутыми краями. При такой конструкции испытуемая модель имела электрическое поле, близкое к полю в конденсаторе, выполненном в виде последовательных обкладок.

Исследования проводились на полимерных пленочных материалах из полиэтилентерефталата, политетрафторэтилена и полиимида. Диапазон давлений элегаза составлял 0,1—0,6 МПа, толщина изоляции 0,12—2,2 мм, радиус скругления высоковольтного электрода 0,05—1,25 мм, расстояние между электродами на поверхности 5—30 мм.

Исследования включали в себя изучение характеристик частичных разрядов (ЧР) (напряжение зажигания и гашения, изменение уровня кажущегося заряда и среднего тока ЧР с ростом напряжения и во времени), а также кратковременной и длительной прочности. Кроме того, была исследована импульсная прочность данной изоляции при воздействии грозового импульса обеих полярностей.

Основные результаты работ по исследованию влияния различных факторов на напряжение зажигания ЧР, а также методика расчета были представлены в [1]. На рис. 2 показаны данные расчета (заштрихованные области) и эксперимента (точки) зависимости напряжения зажигания ЧР от толщины изоляции при различных давлениях элегаза (0,2; 0,4; 0,6 МПа). Зона расчетных значений определена из условия, что коэффициент плотности намотки (отношение суммарной толщины пленок к общей толщине изоляции) составлял 0,7—1,0. Можно видеть, что

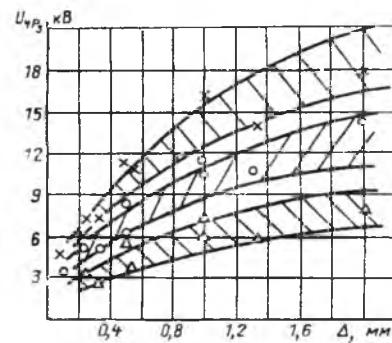


Рис. 2. Зависимость напряжения зажигания ЧР от толщины изоляции: — расчет;  $\Delta$ ,  $\circ$ ,  $*$  — эксперимент при 0,2; 0,4; 0,6 МПа

расчет хорошо согласуется с экспериментом. При расчете изоляции нужно учитывать, что ЧР, возникающие при воздействии перенапряжений, не должны приводить к необратимым изменениям в изоляции и должны погаснуть после окончания действия перенапряжений. На рис. 3 представлены зависимости отношения напряжения зажигания

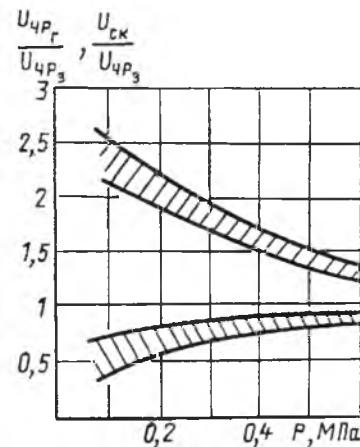


Рис. 3. Зависимость отношения напряжения гашения ЧР к напряжению зажигания и напряжения появления скользящих разрядов к напряжению зажигания от давления элегаза

ЧР к напряжению гашения и напряжения появления скользящих разрядов к напряжению зажигания. Можно заметить, что с ростом давления элегаза зависимости приближаются к 1. Кроме того, известно, что отношение напряжения гашения к напряжению зажигания зависит от материала [2], что, по-видимому, объясняется различными физическими свойствами материалов. Из этих данных можно сделать предварительный вывод, что при расчете изоляции, работающей при давлениях 0,5—0,6 МПа, определяющим будет требование отсутствия пробоя или перекрытия при воздействии перенапряжений, так как начальные разряды очень быстро переходят в скользящие, а при давлениях 0,1—0,2 МПа основным будет требование отсутствия ЧР при воздействии

рабочего напряжения. Изложенные данные были получены при воздействии напряжения промышленной частоты. Начальные напряжения при воздействии импульсного напряжения по данным литературы в 1,4–1,8 раз выше.

Для изоляционных конструкций типа конденсаторных обкладок характерно резко неоднородное поле на краю обкладок и при воздействии импульсных перенапряжений разряд происходит в виде перекрытия по поверхности членочной изоляции. Исследования импульсной электрической прочности проводились при воздействии грозового импульсного напряжения. В качестве источника был использован ГИН с элегазовой изоляцией на напряжение 200 кВ и емкостью в ударе 1000 пФ.

Как показали первые опыты, традиционные методики, применяемые при исследованиях газовой изоляции, для данных испытаний непригодны. На рис. 4 показана характерная зависимость напряжения перекрытия от числа при-

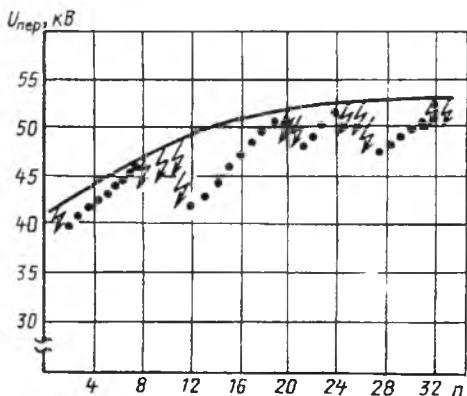


Рис. 4. Зависимость напряжения перекрытия от числа приложенных импульсов:  
• — без перекрытия; ■ — с перекрытием

ложенных импульсов. Можно отметить явное увеличение напряжения перекрытия при многократном приложении импульсов, близких по амплитуде к пробивным. Особенно это проявляется при расстояниях между электродами ( $S$ ) 10 мм и больше, когда напряжения перекрытия повышаются на 15–30% по сравнению с полученными при малом числе приложенных импульсов. Это можно объяснить появлением на поверхности пленочной изоляции зарядов той же полярности, что и приложенный импульс, которые искажают первоначальное распределение электрического поля. Поэтому была принята следующая методика проведения эксперимента: на образец подавался импульс, близкий по амплитуде к пробивному, если происходил пробой, напряжение понижалось на 3%, если нет, то повышалось на 3%. После трех приложений импульсов образец вынимался из камеры и проводилось снятие статического заряда. За пробивное принималось минимальное

значение напряжения перекрытия.

Некоторые результаты проведенных исследований даны на рис. 5–8. Их можно обобщить следующим образом.

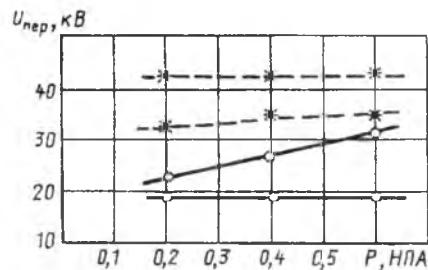


Рис. 5. Зависимость напряжения перекрытия от давления элегаза (фольга  $\Delta=0,5$  мм):  
○ —  $S=5$  мм, — отрицательная полярность; \* —  $S=30$  мм, — положительная полярность

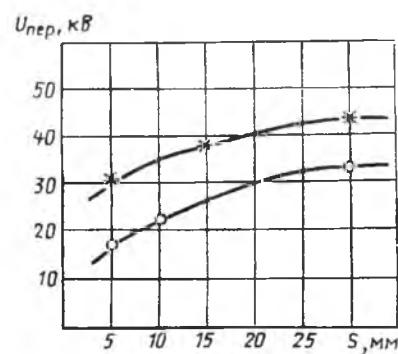


Рис. 6. Зависимость напряжения перекрытия от длины изоляционного промежутка (фольга  $\Delta=0,5$  мм,  $P=0,6$  МПа):  
\* — отрицательная полярность; ○ — положительная полярность

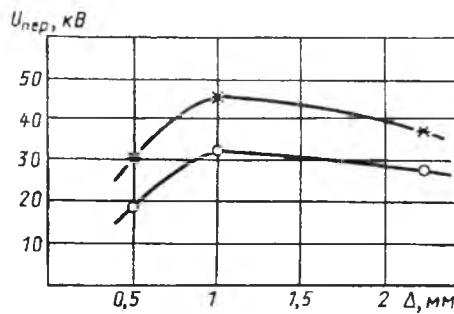


Рис. 7. Зависимость напряжения перекрытия от толщины изоляции (фольга,  $S=5$  мм,  $P=0,6$  МПа):  
\* — отрицательная полярность; ○ — положительная полярность

Напряжение перекрытия при воздействии импульса положительной полярности ниже, чем при воздействии импульса отрицательной полярности. Снижение достигает 40%.

В процессе исследований суммарно было приложено более 7000 импульсов напряжения, 1260 из них завершились перекрытием изоляции. Все разряды произошли на фронте волны. Это говорит о том, что определяющим воздействием при рас-

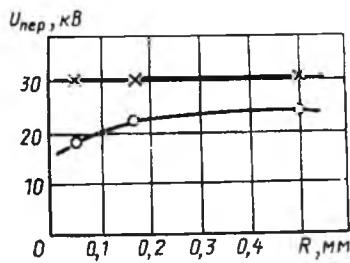


Рис. 8. Зависимость напряжения перекрытия от радиуса скругления электрода ( $S=5$  мм,  $\Delta=0,5$  мм;  $P=0,6$  МПа): \* — отрицательная полярность; ° — положительная полярность

чете изоляции будет срезанный грозовой импульс.

Повышение давления элегаза влияет на напряжение перекрытия только при воздействии импульсов отрицательной полярности и крайне незначительно при воздействии напряжения промышленной частоты, при воздействии импульсов напряжения положительной полярности давление элегаза практически не влияет на напряжение перекрытия.

Увеличение длины изоляционного промежутка ( $S$ ) приводит к росту напряжения перекрытия. В общем виде зависимость напряжения перекрытия от длины может быть представлена формулой:

$$U = kS^a,$$

где  $a, k$  — константы.

Подобным образом ведет себя зависимость напряжения перекрытия от толщины изоляции. Однако, когда толщина становится соизмеримой с длиной промежутка ( $\Delta/S=0,3$ ), при электродах из фольги отмечено снижение напряжения перекрытия, что можно объяснить изменением механизма разряда, вместо скользящего он становится чистым разрядом в газе.

Разработка и испытания макета конденсатора были проведены для выключателя 500 кВ.

Основываясь на данных, полученных при ис-

следованиях электроизоляционных свойств полимерной пленочной изоляции, пропитанной элегазом, был разработан конденсатор для бакового элегазового двухразрывного выключателя на класс напряжения 500 кВ.

Конденсатор представляет собой единый блок с изоляционным цилиндром дугогасительного устройства выключателя, имеющим следующие размеры: наружный диаметр — 284 мм, длина — 530 мм. На этот цилиндр непосредственно наматывается конденсатор, емкость которого 500 пФ, что удовлетворяет как с точки зрения деления напряжения по разрывам, так и с точки зрения обеспечения отключающей способности. При необходимости емкость может быть увеличена. Удельная емкость конденсаторов с полимерной пленочной изоляцией, пропитанной элегазом, находится в пределах 22—25 нФ/м<sup>3</sup>.

Испытания полномасштабного макета конденсатора показали правильность выбранной методики расчета изоляции таких конденсаторов.

## Выводы

В результате работ по изучению электроизоляционных свойств полимерной пленочной изоляции, пропитанной элегазом, были получены данные, позволяющие проводить расчет такой изоляции в различных высоковольтных конструкциях: конденсаторах, трансформаторах, вводах.

Полученные данные были подтверждены испытаниями полномасштабного макета конденсатора для элегазового выключателя на класс напряжения 500 кВ.

## Список литературы

1. Varivodov V., Demkin A. An approach to the design of SF<sub>6</sub>-film insulation system / 6th Inter Symp. on High Voltage Engineering. New Orleans. 1989.
2. Atkins J.M., Reed C.W., Walker G.W. The influence of temperature on partial discharge and breakdown behavior in model gas transformer windings / IEEE Inter. Symp. on Electrical Insulation. Montreal. 1984.

## Основные направления компьютеризации трансформаторного производства АО «Уралэлектротяжмаш»

Л.М. ПЕСТРЯЕВА, Я.Л. ФИШЛЕР

АО «Уралэлектротяжмаш»

Уже в начале 80-х годов возникло понимание того, что обеспечение высокого качества продукции, повышение производительности труда, сокращение сроков подготовки производства заказываемых покупателем изделий, а тем самым обеспечение хорошей конкурентоспособности изделий зависят от способности предприятия быстро и надежно принимать, обрабатывать и передавать информацию. Очевидно, что модернизация производства или организация нового немыслимы без разработки концепции передачи информации.

Эта задача особенно актуальна для трансформаторного производства АО «Уралэлектротяжмаш» (УЭТМ), специализированного на разработке и поставке сухих и масляных трансформаторов в очень широком диапазоне мощностей и других технических параметров. Характер производства индивидуальный и мелкосерийный. АО «УЭТМ» разрабатывает и производит свыше 75 типов сухих трансформаторов мощностью от 10 до 10000 кВ·А на высшие напряжения до 50 кВ, масляных трансформаторов мощностью от 2500 до 125000 кВ·А на высшие напряжения до 220 кВ с регулированием и без регулирования напряжения под нагрузкой для преобразовательной техники и нужд энергетики.

Номенклатура изделий трансформаторного производства охватывает свыше 130 типов, несколько тысяч типоисполнений, отличающихся электрическими параметрами, схемными и конструктивными решениями.

В принципе концепция имеет в виду создание локальных сетей ЭВМ, связывающих между собой все пункты подготовки производства технологического процесса и непосредственно производственного, что позволяет минимизировать потоки информации, исключает лишние связи, делает систему прозрачной, сокращает циклы производства и способствует улучшению его организации.

Такую задачу крайне трудно реализовать на крупных предприятиях, у которых информационная система была построена на принципах централизации, т. е. в виде единого на завод координационно-вычислительного центра.

В конце 80-х годов в трансформаторном производстве АО УЭТМ была начата реализация кон-

цепции организации производства трансформаторов на основе единой интегрированной базы данных и локальной сети ЭВМ.

В основу принятой информационной системы трансформаторного производства были положены следующие критерии:

достоверность информации (может быть обеспечена только при наличии у создателя (владельца) информации достаточной технической возможности для ее переработки и передачи);

простота внесения информации и возможность получения информации на каждом рабочем месте без посредника;

наличие достаточно большой оперативной памяти, так как необходимо перерабатывать большой объем информации в номинальные сроки по САПР (куда входит конструкторская, технологическая, экономическая информация), а также по АСУ производством (куда входит информация о движении материалов, деталей, узлов, изделий), на основании которой осуществляется оперативное планирование ежедневное, подекадное, месячное и годовое, а также контроль исполнения.

Указанным критериям отвечает локальная сеть ЭВМ трансформаторного производства, представленная на рис. 1.

Центральным местом зарождения информации САПР и АСУ является конструкторская служба. Объем одновременно перерабатываемой информации здесь велик, поэтому нужна головная ЭВМ с большой оперативной памятью. При этом следует учитывать целесообразность получения и хранения в этой машине такой информации, как расчет заготовительного веса деталей, суммарного расхода материалов на изделие, маршруты, расчет трудоемкости, себестоимости.

Целесообразно использовать для этой цели ЭВМ с оперативной памятью на уровне современных ЕС.

В результате исчезают потоки информации, существующие при централизованной системе: между конструкторами и технологами и другими службами предприятия, что способствует повышению качества документации, сокращению численности конструкторской, технологической, экономической служб, а также аппарата управления, высвобождению инженерно-технических работни-

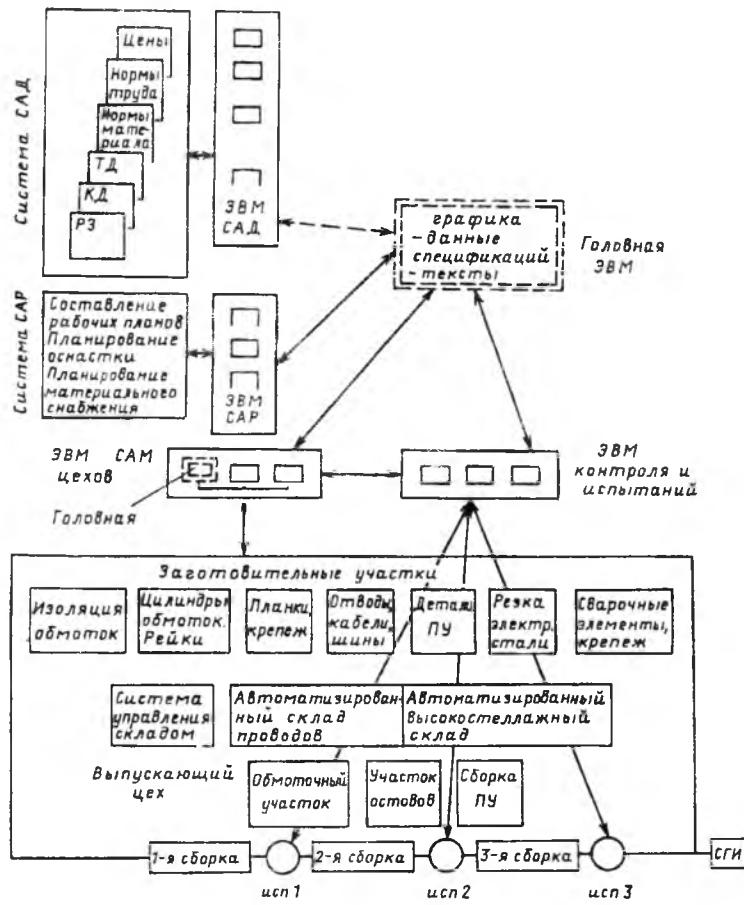


Рис. 1. Интегрированная с помощью ЭВМ информационная система производства трансформаторов: РЗ — расчетная записка; КД — конструкторская документация; ТД — технологическая документация; СГИ — склад готовых изделий

ков для решения чисто инженерных задач.

Кроме центральной ЭВМ в конструкторских подразделениях используются также АРМы и персональные ЭВМ. Их типы и количество периодически уточняются и корректируются.

Производственные подразделения также получают свою головную ЭВМ — сосредоточение всей оперативной информации по ходу производства, включая информацию о технологической оснастке и движении материальных потоков. Естественно, она связана с головной ЭВМ отдела главного конструктора и с ЭВМ отдела материально-технического снабжения, а также с ЭВМ цехов.

Таким образом, в головной ЭВМ сосредоточена информация, позволяющая осуществлять планирование, учет и контроль. Кроме того, имеется возможность получать полные отчеты о материалах, трудозатратах и экономике производства в целом.

Головная ЭВМ трансформаторного производства связывается с головной ЭВМ АО «УЭТМ», обрабатывающей интегрированную информацию по АО в целом.

Реализация 1-й очереди разработанной и принятой в трансформаторном производстве концеп-

ции осуществляется на базе 13 персональных компьютеров (ПК), распределенных по службам производства: ОГК, ОГТ, ПЭО и испытательные станции. Список документов, получаемых на ЭВМ производства, представлен ниже.

#### Перечень документов, выпускаемых на ЭВМ трансформаторного производства

1. Ведомость специфицированных норм материалов.
2. Ведомость покупных изделий.
3. Карта потребности в покупных изделиях на заказ.
4. СПТ — спецификация технологическая.
5. Маршрутно-технологическая карта.
6. Потребности и фактические расходы обмоточной меди, электротехнической стали и других основных материалов на планируемые объемы производства изделий.
7. Протоколы испытаний, паспорта.
8. Расчет себестоимости и цены изделия.
9. Другие плановые и аналитические документы.

В настоящее время в банке данных (БД) находится информация по 1500 исполнениям сухих

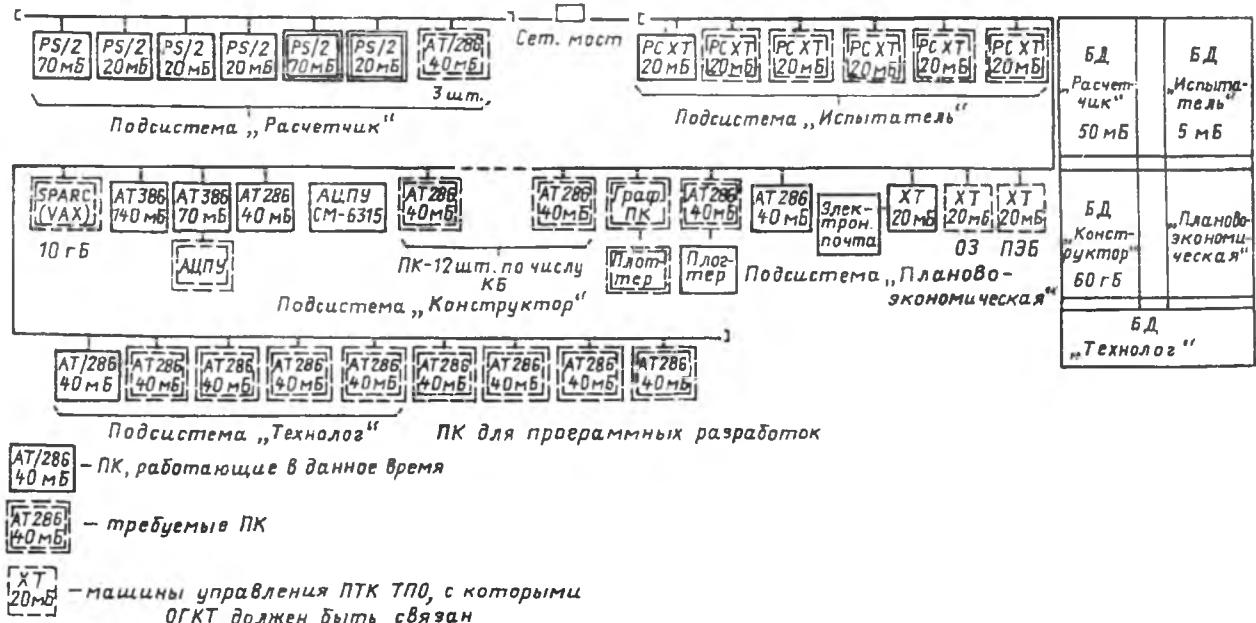


Рис. 2. Схема сети ПЭВМ трансформаторного производства

и масляных трансформаторов, позволяющая быстро и надежно подготавливать производство в соответствии с календарными планами.

2-я очередь предполагает увеличение ПК в службах и соединение их в сеть. Схема сети ПЭВМ приведена на рис. 2.

# Экспертная система диагностики состояния изоляции масляных трансформаторов

Е.В. КУЗНЕЦОВА, Т.И. МОРОЗОВА, Н.А. СТЕПАНЕНКО

ВЭИ

В 1987 г. в ВЭИ была закончена разработка автоматизированной диагностической системы, основанной на результатах хроматографических анализов газов, растворенных в масле. Система позволила передать ЭВМ функции постановки диагноза состояния внутренней изоляции трансформаторного оборудования. В основу диагностики были положены результаты исследований, проведенных в ВЭИ, рекомендации МЭК.

За прошедшее время система использовалась для диагностики изоляции 108 трансформаторов и 123 реакторов напряжением от 110 до 1150 кВ.

Пятилетняя эксплуатация информационно-диагностической системы дала возможность выхода на качественно новую ступень обработки поступающей информации о работе оборудования и происходящих в нем процессах путем создания на ее базе экспертной системы.

Основная задача, решаемая новой диагности-

ческой системой,— существенное повышение надежности постановки диагноза и рекомендаций по дальнейшей эксплуатации оборудования. Краткая блок-схема экспертной системы изображена на рисунке:



Экспертная система состоит из четырех ос-

терфайса объяснений.

Учитывая большой материал базы данных о результатах заводских испытаний, ремонтах, режимах эксплуатации, результатах профилактических испытаний и т. п. контролируемого оборудования, экспертная система позволяет повысить надежность определения вида и места возникновения дефекта. За счет базы знаний в экспертной системе появилась возможность использовать новые критерии отбраковки и данные разборок поврежденного оборудования, увеличилась вероятность правильной постановки диагноза по одному отдельно взятому хроматографическому анализу масла. Чем больший опыт будет заложен в базу знаний, тем более надежные и точные диагнозы будут поставлены.

Экспертная система включает в себя три различных блока диагностики: диагностику состояния внутренней изоляции оборудования на основе хроматографических анализов растворенных в масле газов, диагностику на основе измерений характеристик изоляции оборудования и диагностику состояния изоляции высоковольтных маслонаполненных вводов.

В качестве критерии для диагностики состояния изоляции оборудования на основе хроматографических анализов растворенных в масле газов используются установленные уровни характерных газов, скорости их нарастания, а также характерные отношения концентраций пар газов. В табл. 1 приведены обобщенные предельные уровни концентраций газов в масле бездефектного оборудования.

Таблица 1

Оборудование	Уровень концентраций газов в масле бездефектного оборудования, мкл/л					
	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
Трансформатор с:						
открытым расширителем	150	95	50	30	10	2200
азотной защитой	200	90	50	30	10	1500
пленоочной защитой	200	170	50	30	10	1500
Реактор	200	170	50	30	10	1500

Табл. 2 содержит характеристические отношения концентраций газов для разграничения тепловых и электрических повреждений.

В табл. 3 и 4 указаны скорости нарастания газообразных продуктов разложения (ГПР) для газопоглощающих и газовыделяющих масел.

В диагностике используется ряд дополнительных критериев, характеризующих различные виды повреждений. Для уточнения вида тепловых повреждений используются данные табл. 5.

Таблица 2

Повреждения	Критерий отношения концентраций газов					
	CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>
Электрические	<1	<1	<0,2	>0,5	<0,5	>2
Тепловые	>1	>1	>0,2	<0,5	>0,5	Не показательно

Таблица 3

Повреждение	Скорость нарастания концентрации ГПР для газопоглощающего масла, мкл/л за 100 ч					
	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
ЧР в масле и ползущий разряд	80	20	11	1,25	6	10
Без дефектов	1	0,2	0,2	0,02	0,02	Не показательно

Таблица 4

Повреждение	Скорость нарастания концентрации ГПР для газовыделяющего масла, мкл/л за 100 ч					
	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
ЧР в масле и ползущий разряд	130	20	15	1,25	30	10
Без дефектов	1	1	1	0,02	1	Не показательно

Таблица 5

Причина повреждения	Критерии для уточнения тепловых повреждений		
	CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> /CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>
Перегревы:			
до 150°C	>1 и <3	<1	<1
150°–200°C	>1	>1	<1
200°–300°C	>0,1 и <1	>1	<1
Общий перегрев проводников	>0,1 и <1	<1	>1 и <3
Циркуляционные токи в обмотке	>1	<1	>1 и <3
Нагрев в контактах, циркуляционные токи в стержне или баке	>1	<1	>1

Дополнительным подтверждением теплового дефекта является также соотношение O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> и содержание C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> (табл. 6).

Таблица 6

Защита масла	Дополнительные критерии, характеризующие тепловое повреждение		
	O <sub>2</sub> /N <sub>2</sub>		C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , мкл/л
	Эксплуатация до 1 года	Эксплуатация более 1 года	
Открытый расширитель	< 0,45	< 0,33	100
Азотная	< 0,5	< 0,12	100
Пленочная	< 0,23	< 0,246	100

Для выявления нарушения прочности твердой изоляции используются дополнительные критерии:

1. CO/CO<sub>2</sub> ≥ 1 (разрушение вследствие воздействия повышенной температуры).

2. C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> > 4C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> предыдущего уровня (разрушение вследствие воздействия ползущего разряда).

В базу знаний экспертной системы введены не только указанные критерии и рекомендации МЭК, но также успешный зарубежный опыт. Используются японская методика TCG, методика «треугольника Дювала», метод Роджерса. В диагностику включена графическая информация, базирующаяся на возможности установления дефекта по характерному газу в пробе.

Таким образом, оценка состояния внутренней изоляции оборудования ведется при помощи много критериальных систем, учитывающих множество различных параметров, что позволяет существенно повысить надежность устанавливаемого диагноза и соответствующей рекомендации по дальнейшей эксплуатации диагностируемого оборудования.

В блоке диагностики на основе измерений характеристик изоляции оборудования используются результаты профилактических испытаний трансформаторов и реакторов, а именно: tg δ изоляции обмоток, сопротивление изоляции обмоток и сопротивление короткого замыкания.

Полученные данные определенным образом обрабатываются и сравниваются либо со значениями, указанными в паспорте трансформатора, либо с результатами предыдущих измерений, и на этой основе делается вывод.

Диагностика, проведенная по результатам профилактических испытаний, позволяет установить степень увлажненности изоляции оборудования, а также выявить возможную деформацию и изменение взаимного расположения обмоток при

внешних и внутренних замыканиях в трансформаторе. Эти данные оказываются полезными, когда по результатам хроматографического анализа газов затруднительно дать однозначное заключение о характере выявляемого дефекта. При использовании данных измерения характеристик изоляции возможна выдача более действенной рекомендации по дальнейшей эксплуатации оборудования.

Диагностика высоковольтных маслонаполненных вводов построена на использовании результатов хроматографических анализов газов, растворенных в масле, и данных измерений характеристик внутренней и внешней изоляции вводов, а именно: tg δ и емкости изоляции. В диагностику включены также характеристики масла: tg δ, пробивное напряжение, влагосодержание и кислотное число.

При диагностике вводов за основу была взята база данных ВЭИ, содержащая информацию о граничных концентрациях газов, скоростях их нарастания и характеристических отношениях концентраций пар газов, растворенных в масле вводов. Также использованы рекомендаций завода «Изолятор», в которых указаны граничные значения контролируемых параметров изоляции вводов, tg δ масла и комплекс условий, по которым необходимо провести отбраковку вводов.

В процессе расширения базы знаний экспертной системы планируются уточнение норм и методов отбраковки вводов, введение графической информации, базирующейся на характерном газе, и сопоставление абсолютных величин газовых компонентов, что позволит повысить надежность как промежуточных, так и окончательных диагнозов, а также на более ранней стадии выявить вводы, находящиеся в критическом состоянии.

В процессе работы с экспертной системой пользователь может получить объяснения того или иного вывода, сделанного ПЭВМ, проследить цепочку умозаключений, приведших к определенному диагнозу. Для работы непосредственно с базой данных предусмотрена система запросов, дающая оперативный доступ к накопленной информации.

Все промежуточные или окончательные результаты диагностики могут быть получены на дисплее или выведены на принтер в виде графиков и протоколов состояния изоляции оборудования.

Экспертная система диагностики реализована на СУБД Clipper, она функционирует на IBM PC AT.

В различных отраслях науки и техники все

## Регулировочные характеристики электропривода колебательного движения с машиной двойного питания

А.В. АРИСТОВ, В.В. АРИСТОВ, кандидаты техн. наук

большее применение находят электроприводы колебательного движения (ЭКД), в которых в качестве исполнительного элемента используются обычные электродвигатели вращательного и поступательного движения, работающие в колебательном режиме непосредственно [1]. Такие системы позволяют на базе асинхронных машин создавать управляемые колебания с частотами  $10^{-3}$ — $10^4$  Гц, амплитудами  $10^{-5}$ — $1$  М или  $10^{-3}$  рад, что для ряда традиционных электродинамических, гидравлических и других видов вибкоприводов является недостижимым. Несмотря на все свои положительные качества, асинхронные колебательные электроприводы имеют ряд присущих им недостатков, в частности: динамическое смещение нейтрали колебаний, низкие энергетические показатели при отсутствии позиционной нагрузки или электромагнитной связи по положению, значительные величины ударных токов в процессе пуска [2].

Одним из наиболее перспективных путей улучшения динамических и энергетических характеристик данного класса безредукторных электроприводов следует считать применение в качестве силового элемента в составе ЭКД машины двойного питания (МДП). Функциональная схема такого ЭКД показана на рис. 1. Она включает электромеханический преобразователь (ЭМП), представляющий собой МДП с двумя взаимно перпендикулярными обмотками 1, 2 на статоре и 3, 4 на роторе и систему управления (СУ), в

состав которой входят преобразователь частоты (ПЧ) и регуляторы напряжения (РН). СУ реализует фазовый способ возбуждения колебательного режима работы МДП за счет разночастотного питания обмоток 1, 3 и 2, 4 исполнительного двигателя напряжениями соответственно

$$U_1(t) = U_m \sin \omega_1 t;$$

$$U_2(t) = U_m \sin \omega_2 t,$$

где  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  — циклические частоты сети и преобразователя ПЧ, причем первая выбирается равной паспортной частоте ЭМП.

Благодаря такому специфическому питанию обмоток МДП, в воздушном зазоре электрической машины формируются два синфазно качающиеся поля, изменяющиеся по законам

$$z_1(t) = \arctg \frac{\alpha_2}{\alpha_1} (\cos \Omega t + \operatorname{ctg} \omega_1 t \sin \Omega t);$$

$$z_2(t) = \arctg \frac{\alpha_4}{\alpha_3} (\cos \Omega t + \operatorname{ctg} \omega_1 t \sin \Omega t),$$

соответственно. Повторяя закон изменения обобщенного вектора потокосцепления, подвижный элемент двигателя совершает квазисинусоидальные колебания, амплитуда которых устанавливается РН и определяется значением регулируемого параметра  $\alpha_i$ , а частота  $\Omega = \omega_2 - \omega_1$  — выходной частотой преобразователя ПЧ.

Опыт промышленной эксплуатации показывает, что технические требования к ЭКД развиваются в первую очередь по пути повышения управляемости приводов, что требует при проектировании последних простых расчетных соотношений и характеристик взаимосвязывающих функций регулирования и выходные параметры системы. Этим вопросам и посвящена данная статья.

Регулировочные характеристики колебательного электропривода могут быть получены аналитическим путем на основании решения известной системы дифференциальных уравнений обобщенного электромеханического преобразователя энергии, если частота колебаний вала (штока) исполнительного двигателя  $\Omega$  не менее чем на по-

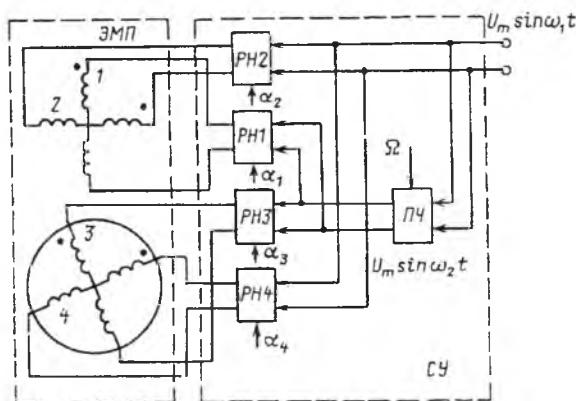


Рис. 1. Функциональная схема электропривода колебательного движения с МДП

рядок меньше частоты питающей сети  $\omega_1$ . При этом целесообразно использовать ряд упрощающих допущений, в частности:

рассматривать установившийся режим работы МДП, когда амплитуда колебаний подвижного элемента не превышает половины геометрического базового размера положения ротора (бегуна) обобщенного электродвигателя;

закон колебания подвижного элемента электродвигателя и регулировочные характеристики находить для первой гармоники колебаний.

Согласно [3] уравнение колебательного движения МДП может быть представлено как

$$L_{\text{мех}} \frac{d^2 z}{dt^2} + R_{\text{мех}} \frac{dz}{dt} + C_{\text{мех}}^{-1} z = M_{\text{эм}}(t, z), \quad (1)$$

где

$$M_{\text{эм}}(t, z) = M_1 \sin(\Omega t + \varphi_1) + M_2 \sin(\Omega t + \varphi_2) \times \cos z + (N_1 + N_2 \cos z) \frac{dz}{dt} + M_3 \sin z. \quad (2)$$

Здесь  $C_{\text{мех}}^{-1}$ ,  $R_{\text{мех}}$ ,  $L_{\text{мех}}$  — коэффициенты позиционного, демпфирующего и инерционного усилий нагрузки;  $M_i$ ,  $N_j$  и  $\varphi_i$  — коэффициенты колебательного электромагнитного пускового, демпфирующего моментов и их начальные фазы, определяемые параметрами электрической машины ( $A_i$ ,  $B_i$ ,  $C_i$ ,  $D_i$ ) и функциями регулирования ( $a_i$ ) в соответствии с приложением 1.

Разложив выражение (2) в ряд Фурье по функциям Бесселя, получим первую гармоническую составляющую обобщенного колебательного момента:

$$M_{\text{эм1}}(t, z) = M_{\text{эм1}} \sin(\Omega t + \varphi),$$

где амплитуда и начальная фаза рассчитываются по выражениям:

$$M_{\text{эм1}} = \left[ M_{m0}^2 + M_{m1}^2 + M_{m2}^2 + \frac{2M_1}{(1 + z^2(\Omega))^{0.5}} \times (M_{m0} + M_{m2} Z(\Omega)) \right]^{0.5}; \quad (3)$$

$$\varphi = \arctg \frac{M_{m1} \sin \psi + M_{m2} \sin \beta + M_{m0} \cos \beta}{M_{m1} \cos \psi + M_{m2} \cos \beta - M_{m0} \sin \beta},$$

а значения амплитуд первых гармонических составляющих эквивалентных пускового  $M_{m1}$ , демпфирующего  $M_{m0}$  и позиционного  $M_{m2}$  моментов, фазы  $\psi$  и обобщенного коэффициента нагрузки  $Z(\Omega)$  согласно приложению 2.

Решив уравнение (1) с учетом (3), параметры выходных колебаний получим в виде:

$$z_m = \frac{M_{\text{эм1}}}{[(C_{\text{мех}}^{-1} - L_{\text{мех}} \Omega^2)^2 + R_{\text{мех}}^2 \Omega^2]^{0.5}};$$

$$\beta = \varphi - \arctg \frac{C_{\text{мех}}^{-1} - L_{\text{мех}} \Omega^2}{R_{\text{мех}} \Omega}.$$

Представленные соотношения совместно с приложением 1 описывают всю гамму регулировочных характеристик МДП при периодическом движении, однако они являются трансцендентными, что не позволяет выразить их в явном виде. В связи с этим, порядок определения характеристик может быть сведен к построению для заданных параметров машины, нагрузки и питания зависимостей амплитуды и фазы первой гармонической составляющей колебательного электромагнитного момента от выходных параметров колебания в виде семейства графиков

$$M_{\text{эм1}} = f_1(z_{m\beta}); \quad \varphi = f_2(z_{m\beta}),$$

по которым методом последовательных приближений (в качестве первого целесообразно выбирать первое приближение закона движения [3]), производят доопределение значений  $M_{\text{эм1}}$  и  $\varphi$ , являющихся исходными данными для расчета новых значений  $z_m$  и  $\beta$ . Производя новое доопределение, повторяют расчет до тех пор, пока не будет достигнута требуемая точность результатов.

Установлено, что вместо выражений (3) целесообразно пользоваться более приближенными соотношениями для составляющих колебательного электромагнитного момента

$$\bar{M}_{m0} = N_1 + N_2; \quad \bar{M}_{m1} = (M_1^2 + M_2^2)^{0.5}; \quad \bar{M}_{m2} = -M_3.$$

Как показали результаты многочисленных расчетов, их максимальное отклонение от  $M_{m0}$ ,  $M_{m1}$  и  $M_{m2}$  при  $z_m \leq 1$  не превышает 5%, что позволяет значительно облегчить анализ регулировочных характеристик и дает вполне приемлемые для большинства инженерных расчетов результаты. В этом случае допустимо амплитуду и фазу выходных параметров определять согласно

$$z_m = \frac{\bar{M}_{m1}}{(R_{\text{мех}} - \bar{M}_{m0}) \Omega [1 + Z^2(\Omega)]^{0.5}};$$

$$\beta = \arctg \frac{(\sin \psi) Z(\Omega) - \cos \psi}{(\cos \psi) Z(\Omega) + \sin \psi},$$

где начальная фаза первой гармонической составляющей колебательного электромагнитного момента при синфазном взаимодействии электромагнитных полей первичного и вторичного элементов МДП

$$\psi = \varphi_1 + \arctg M_1/M_2.$$

Очевидно, что одним из главных требований, предъявляемых к регулировочным характеристи-

кам, является линейность — прямая пропорциональность выходных параметров МДП от функций регулирования. Однако, как правило, это не выполняется. В первую очередь это связано с тем, что составляющие пускового  $M_{m1}$ , демпфирующего  $M_{m0}$  и позиционного  $M_{m2}$  моментов, определяющие в конечном итоге изменения выходных параметров машины, являются нелинейными функциями от коэффициента сигнала управления  $\alpha_i$ . Нелинейность составляющих колебательного электромагнитного момента зависит самым существенным образом от того, как и по каким из обмоток исполнительного двигателя производится регулирование. Во-вторых, выходные параметры колебательного электродвигателя являются, в свою очередь, нелинейными функциями от  $M_{m0}$ ,  $M_{m2}$ .

В соответствии со схемой рис. 1 на рис. 2 представлены законы изменения  $M_{m0}(\alpha)$ ,

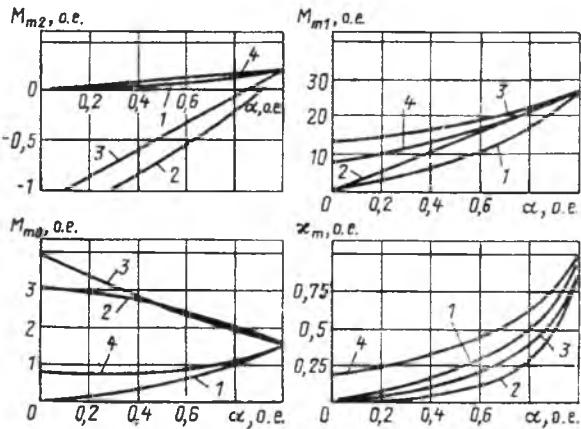


Рис. 2. Законы регулирования составляющих колебательного электромагнитного момента и координаты подвижного элемента МДП: 1 —  $\alpha_1=\alpha_2=\alpha_3=\alpha_4=\text{var}$ ; 2 —  $\alpha_1=\alpha_3=\text{var}$ ,  $\alpha_2=\alpha_4=1$ ; 3 —  $\alpha_1=\text{var}$ ,  $\alpha_2=\alpha_3=\alpha_4=1$ ; 4 —  $\alpha_1=\alpha_2=1$ ,  $\alpha_3=\alpha_4=\text{var}$

$M_{m1}(\alpha)$ ,  $M_{m2}(\alpha)$  и  $z_m(\alpha)$  для некоторых наиболее часто используемых на практике способов регулирования МДП. Они рассчитаны согласно (4) с учетом приложения 1 для двигателя, имеющего параметры  $R_1=0,06$ ;  $R_2=0,094$ ;  $L_1=2,512$ ;  $L_2=2,575$ ;  $M=2,4$  на частоте колебаний  $\Omega=0,1$  при  $R_{\text{мех}}=2,0$ ;  $L_{\text{мех}}=18,73$ ;  $C_{\text{мех}}^{-1}=0$  и иллюстрируют возможность пропорционального регулирования отдельных составляющих колебательного электромагнитного момента. В частности, при симметричном регулировании по одноименным обмоткам первичного и вторичного элементов (кривая 2) обеспечивается пропорциональное регулирование амплитуды эквивалентного пускового усилия МДП, а при регулировании только по обмоткам ротора (кривая 4) — составляющей электромагнитного позиционного момента. Однако несмотря на возможность достижения прямопропорционального регулирования составляю-

щих  $M_{\text{эм}}(t, z)$  (кривые 3) линейность для  $z_m(\alpha)$  не обеспечивается.

Следует отметить, что возможность варьирования позиционным колебательным электромагнитным моментом  $M_{m2}$  позволяет регулировать собственную частоту колебаний привода

$$\Omega_0 = [(C_{\text{мех}}^{-1} + \bar{M}_{m2})/L_{\text{мех}}]^{0,5},$$

а следовательно, поддерживать в заданном частотном диапазоне работы МДП энергетически выгодный режим работы. Так, при симметричном регулировании по обмоткам статора и ротора ( $\alpha_1=\alpha_2=\alpha_3=\alpha_4=\text{var}$ ) или только по обмоткам ротора ( $\alpha_3=\alpha_4=\text{var}$ ;  $\alpha_1=\alpha_2=1$ ) это условие сводится к поддержанию постоянства отношений  $\Omega/\alpha$  и  $\Omega/\alpha^{0,5}$  соответственно (рис. 3). При этом до-

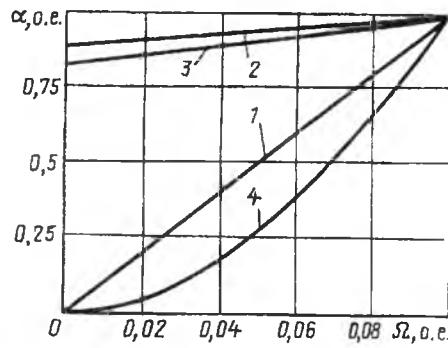


Рис. 3. Условие обеспечения резонансного режима работы МДП при регулировании частоты колебаний

стигается частотная стабилизация амплитуды выходных колебаний, что может быть использовано при проектировании ряда разомкнутых колебательных электроприводов, для которых требование инвариантности амплитуды при высоких энергетических показателях является одним из самых жестких.

Соотношения (4) позволяют также определить расчетные выражения для условия автономности регулирования параметров колебания. Данные характеристики взаимосвязывают частоту колебаний  $\Omega$  с функциями регулирования через  $M_{m0}$ ,  $M_{m1}$  и  $M_{m2}$  для произвольно заданных значений амплитуды  $z_m$  или фазы  $\beta$ . Они могут быть представлены зависимостями

$$\Omega \Big|_{z_m=\text{const}} = \left\{ \frac{2L_{\text{мех}}(C_{\text{мех}}^{-1} + \bar{M}_{m2}) - (R_{\text{мех}} - M_{m0})^2}{2L_{\text{мех}}^2} + \right. \\ \left. + \left[ \frac{(R_{\text{мех}} - M_{m0})^4 - 4L_{\text{мех}}(R_{\text{мех}} - M_{m0})^2 \cdot (C_{\text{мех}}^{-1} + \bar{M}_{m2})}{4L_{\text{мех}}^4} + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{M_{m1}}{L_{\text{мех}}^2 z_m^2} \right]^{0,5} \right\}^{0,5};$$

$$\Omega \Big|_{\beta=\text{const}} = -\frac{1}{2L_{\text{mex}}} \left\{ (R_{\text{mex}} - \bar{M}_{m0}) \operatorname{ctg}(\psi - \beta) \pm \right. \\ \left. \pm \frac{1}{2} [(R_{\text{mex}} - \bar{M}_{m0})^2 \operatorname{ctg}^2(\psi - \beta) - 4L_{\text{mex}} (C_{\text{mex}}^{-1} + \bar{M}_{m2})]^{0.5} \right\}.$$

В качестве примера на рис. 4 приведены законы регулирования  $\Omega(\alpha)|_{z_m=\text{const}}$  для двух вар-

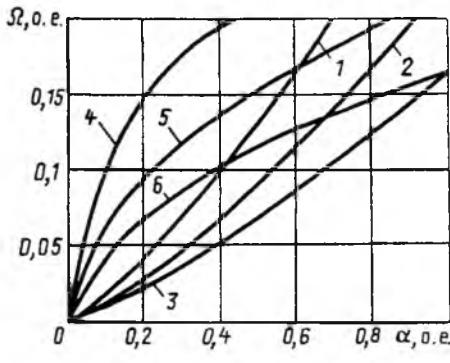


Рис. 4. Условие автономности амплитуды координаты подвижного элемента МДП:  
1, 4 —  $z_m=0,2$ ; 2, 5 —  $z_m=0,4$ ; 3, 6 —  $z_m=0,8$

риантов:  $\alpha_1=\alpha_2=\alpha_3=\alpha_4=\text{var}$  (кривые 1, 2, 3) и  $\alpha_1=\alpha_2=1, \alpha_3=\alpha_4=\text{var}$  (кривые 4, 5, 6). Аналогичные условия могут быть получены и для автономного регулирования скорости или момента, исходя из целевого назначения привода.

Если к ЭКД не предъявляются специальные требования к регулированию составляющих электромагнитного момента, то для большинства систем целесообразно осуществлять регулирование выходных параметров по алгоритму  $\alpha_1=\alpha_3=\text{var}, \alpha_2=\alpha_4=U_{\text{ном}}$ , где за  $U_{\text{ном}}$  принимается名义альное напряжение исполнительного двигателя. При этом существенно упрощается структурная схема привода, так как отпадает необходимость в регуляторах РН2, РН4 (обмотки МДП подключаются непосредственно к сети), а регуляторы РН1 и РН3 могут быть выполнены совмещенными в едином габарите с ПЧ.

Экспериментальная проверка полученных соотношений показала, что погрешность расчета регулировочных характеристик по изложенной методике не превышает 15%, что говорит о целесообразности применения их при анализе и синтезе электромеханических систем с фазовой модуляцией.

## Приложение 1

$$M_1 = 0,5 U_m^2 [(\alpha_1 \alpha_2 A_1 - \alpha_3 \alpha_4 B_1)^2 + \\ + (\alpha_1 \alpha_2 C_1 - \alpha_3 \alpha_4 D_1)^2]^{0.5};$$

$$M_2 = 0,5 U_m^2 [(\alpha_1 \alpha_2 A_2 - \alpha_3 \alpha_4 B_2)^2 + \\ + (\alpha_1 \alpha_2 C_2 - \alpha_3 \alpha_4 D_2)^2]^{0.5};$$

$$M_3 = 0,5 U_m^2 (\alpha_1 \alpha_3 A_3 - \alpha_2 \alpha_4 B_3);$$

$$N_1 = 0,5 U_m^2 (\alpha_1^2 A_4 + \alpha_2^2 B_4 + \alpha_3^2 C_4 + \alpha_4^2 D_4);$$

$$N_2 = 0,5 U_m^2 (\alpha_1 \alpha_3 A_5 - \alpha_2 \alpha_4 B_5);$$

$$\varphi_1 = \operatorname{arctg} \frac{\alpha_1 \alpha_2 A_1 - \alpha_3 \alpha_4 B_1}{\alpha_1 \alpha_2 C_1 - \alpha_3 \alpha_4 D_1};$$

$$\varphi_2 = \operatorname{arctg} \frac{\alpha_1 \alpha_2 A_2 - \alpha_3 \alpha_4 B_2}{\alpha_1 \alpha_2 C_2 - \alpha_3 \alpha_4 D_2}.$$

## Приложение 2

$$M_{m0} = \Omega z_m \{N_1 + N_2 [J_0(z_m) + J_2(z_m)]\};$$

$$M_{m1} = \left\{ M_1^2 + M_2^2 [J_0^2(z_m) + J_2^2(z_m)] - 2M_1 M_2 [J_0(z_m) \times \right. \\ \left. \times \cos(\varphi_1 - \varphi_2) + J_2(z_m) \cos(\varphi_1 + \varphi_2 - 2\beta)] - \right. \\ \left. - 2M_2^2 J_0(z_m) \cdot J_2(z_m) \cos 2(\psi_2 - \beta) \right\}^{0.5};$$

$$M_{m2} = 2M_3 J_1(z_m);$$

$$\psi = \operatorname{arctg} \frac{M_1 \sin \varphi_1 + M_2 J_0(z_m) \sin \varphi_2 - M_2 J_2(z_m) \sin(2\beta - \varphi_2)}{M_1 \cos \varphi_1 + M_2 J_0(z_m) \cos \varphi_2 - M_2 J_2(z_m) \cos(2\beta - \varphi_2)},$$

где  $J_0(z_m), J_1(z_m), J_2(z_m)$  — функции Бесселя первого рода;

$$Z(\Omega) = (C_{\text{mex}}^{-1} + M_3 - L_{\text{mex}} \Omega^2) / (R_{\text{mex}} - N_1 - N_2) \Omega.$$

## Список литературы

1. Луковников В.И. Электропривод колебательного движения. М.: Энергоатомиздат, 1984.
2. Грачев С.А., Луковников В.И. Исследование электромеханических переходных процессов в электроприводах на основе асинхронных двигателей, работающих в специальных режимах. Деп. в отделении ВНИИЭМ, 1975, № 830-д.
3. Аристов А.В., Тимофеев А.А. Закон движения электропривода колебательного движения с машиной двойного питания // Изв. вузов. Электромеханика. 1992. № 5.

# Микропроцессорная система управления полноприводной электрической инвалидной коляской

Н.Ф. ВАСИЛЬЕВ, А.Л. ЛОГИНОВ, А.В. БАТАЕВ

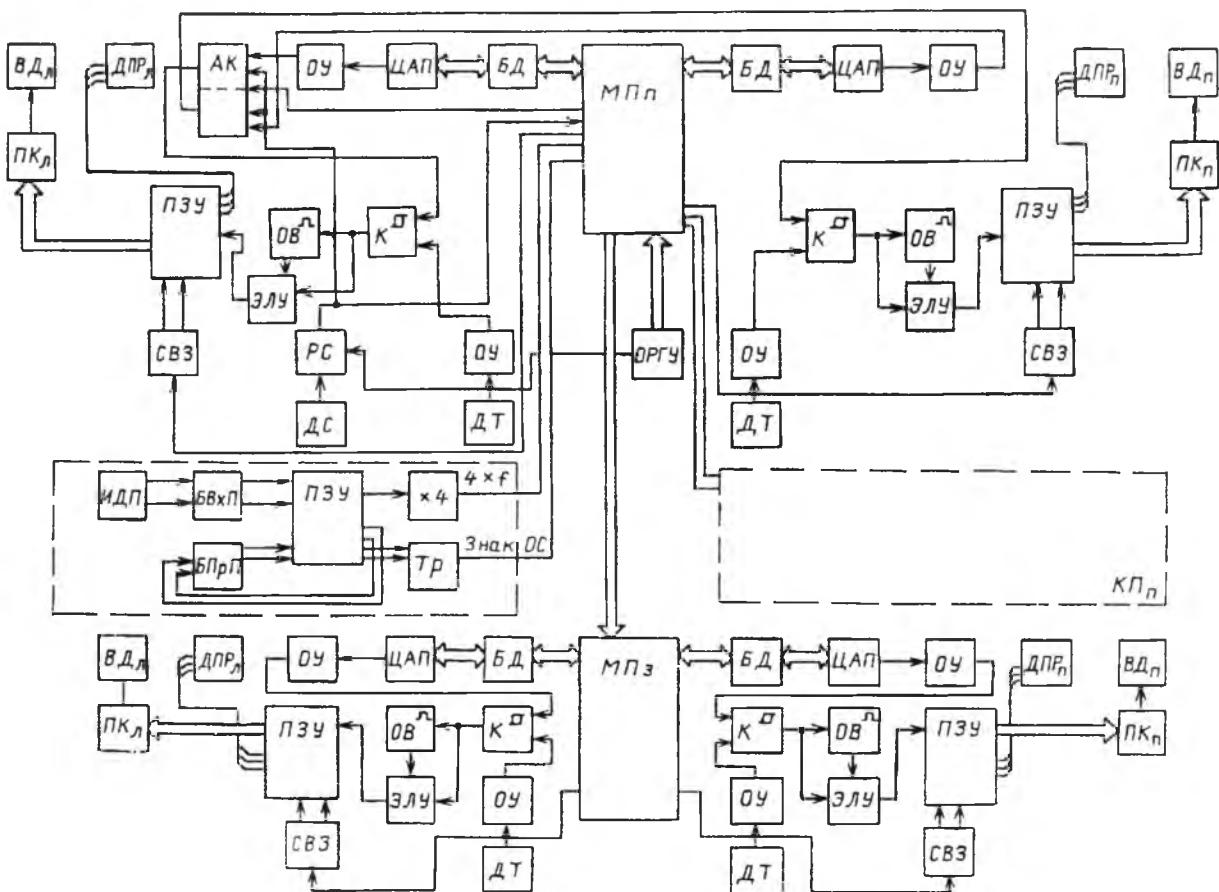
В настоящее время большое развитие получило применение микропроцессорных систем управления. Они используются в станкостроении, робототехнике, транспортных системах и др.

Широко распространены микропроцессорные системы управления (МПСУ) на транспорте. Они применяются для управления электромобилей, электропогрузчиков и других средств передвижения, основанных на электрической тяге. Одной из важных проблем является возможность создания МПСУ для полноприводных электротранспортных средств, в частности инвалидных колясок (ИК). Наиболее эффективны эти системы при создании ИК, обладающих возможностью передвижения по лестничным маршрутам.

На рис. 1 представлена функциональная схема МПСУ для ИК, имеющей четыре ведущих колеса, приводимых в движение вентильными двигателями. ИК способна осуществлять движение как по плоскости, так и по лестничным маршрутам. Функциональная схема включает в себя МПп —

микропроцессор передней оси, *МПз* — микропроцессор задней оси, *БД* — буферы данных, *БВхП* — буферы входных переменных, *БПрП* — буферы промежуточных переменных, *К* — компараторы, *ОВ* — одновибраторы, *РС* — регулятор скорости, *АК* — аналоговый ключ, *ДС* — датчик скорости, *ДТ* — датчики тока, *ДПР* — датчики положения ротора, *СВЗ* — схемы временной задержки, *ПК* — полупроводниковые коммутаторы, *ОУ* — операционные усилители, *ПЗУ* — постоянные запоминающие устройства, *ИДП* — импульсные датчики положения, *Тр* — триггеры,  $\times 4$  — схемы учетверения импульсов, *ОРГУ* — органы задания, *ЭЛУ* — элементы логического умножения.

Основу МПСУ составляют два микропроцессора (МП) 1816ВЕ51, каждый из которых управляет своей осью, один — передней, а другой — соответственно задней. МПп, управляющий передней осью, является центральным. Он не только выполняет роль управляющего устройства для пе-



**Рис. 1. Функциональная схема микропроцессорной системы управления полноприводной электрической инвалидной коляски**

редней оси, но и координирует работу всей системы, управляя через МПз движением задней оси. Фактически можно считать, что МПСУ является иерархичной, где второй уровень иерархии неявный, выполняющий тот же МП, который задействован и на первом уровне. Создание четкой иерархической структуры, т. е. установление третьего МП, который бы контролировал МПп и МПз, было бы нецелесообразным, так как наделяло систему лишней избыточностью.

Система обладает релейными контурами тока, которые предназначены для управления ВД по моменту при движении ИК по плоскости, контуром скорости, предназначенным для контроля за движением при преодолении лестничных марш, контурами положения, выдающими информацию о скорости, необходимую для осуществления поворотов и разворотов за счет разбаланса скоростей колес ИК.

Рассмотрим функциональное значение основных узлов МПСУ. МПп является основой системы управления. Он выполняет целый ряд функций, среди которых чтение данных с ОРГУ, расчет токов задания на движение для правого и левого колес, выдача токов задания на ЦАП, расчет скоростей движения колес, обеспечение синхронизации движения правого и левого колес, а также передней и задней осей.

МПз выполняет функции чтения данных с МПп, выдачу токов задания на ЦАП, обеспечение синхронизации правого и левого колес задней оси. БА, БВхП, БПрП служат для временного хранения данных и переменных, а также для функциональной связки различных элементов МПСУ. Например, код тока задания может выводиться только через один из портов МП. Если подключить ЦАП левого и правого колес к этому порту напрямую, то на них будет выводиться один и тот же ток задания, а это не всегда необходимо, поэтому коды токов задания подаются на соответствующие ЦАП через буферы данных. МП управляет работой этих буферов, включая один из них в зависимости от того, ток задания какого колеса выводится.

К выполняет роль релейного элемента в релейном контуре тока. ОВ формирует одиночные импульсы заданной длительности по сигналу с К, которые отключают обмотки ВД. АК управляется сигналом от МПп. При управлении ИК по моменту через АК на контур тока проходит сигнал тока задания от МПп, а при переходе в режим управления по скорости (перед началом движения по лестнице), МПп выдает управляющий сигнал на АК и через ключ проходит сигнал тока задания с РС. СВЗ управляются от МП и служат для предотвращения протекания сквозных токов в ПК при реверсе.

С помощью ПЗУ осуществляется управление

ключами ПК. На адресный вход ПЗУ поступают три сигнала с ДПР и два сигнала с СВЗ. Эти пять сигналов являются адресом, по которому в ПЗУ хранится код управления ключами ПК. При выдаче сигнала задания с ОРГУ о движении по плоскости в МПСУ работают контуры тока, которые включают в себя БД, ЦАП, ОУ, К, ЭЛУ, ОВ, ДТ, ПЗУ. При этом на АК выдается сигнал с МПп на управление контуром тока. С помощью К ток ВД удерживается в определенном коридоре точности, обусловленном шириной петли гистерезиса К.

На рис. 2 приведены временные диаграммы обмотки двигателей  $i_y$  и шунта  $i_{sh}$ . После вклю-

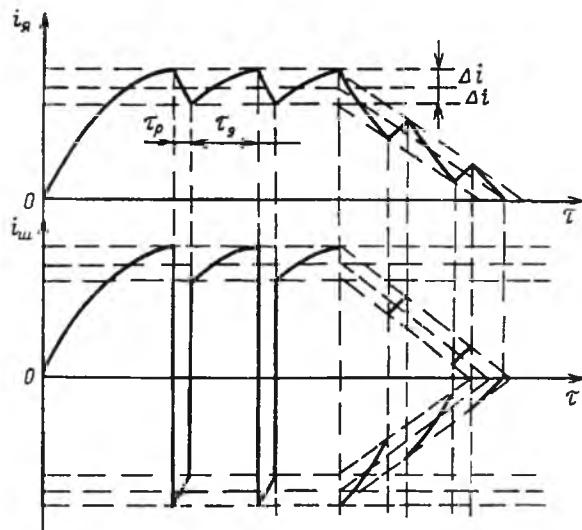


Рис. 2. Временные диаграммы токов якорной обмотки вентильного двигателя и шунта

чения двигателя ток в обмотке якоря возрастает по экспоненциальному закону. При превышении током якоря (током обратной связи) сигнала задания  $i_{эт}$  на величину  $\Delta i$ , где  $\Delta i$  — половина петли гистерезиса К, ключи ПК размыкаются, после чего  $i_y$  начинает спадать. При падении сигнала обратной связи до величины  $(i_{эт} - \Delta i)$  ключи ПК вновь замыкаются, далее весь процесс периодически повторяется. Ток в шунте протекает в положительном направлении, когда включены ПК, а в отрицательном — когда нет.

В целом работу релейного контура тока характеризуют временные диаграммы, приведенные на рис. 3. При включении вентильного двигателя ток якоря начинает расти по экспоненциальному закону. Также начинает расти и сигнал обратной связи (ОС) по току. Пока сигнал ОС по току  $U_{ост}$  не достиг значения сигнала задания на ток  $U_{эт}$ , на выходе К имеем сигнал высокого уровня. На выходе ОВ сигнал положительного уровня, так как ОВ формирует импульсы регулируемой длительности по срезу сигнала с К. Как только сигнал ОС  $U_{ост}$  превысит сигнал  $U_{эт}$  на величину

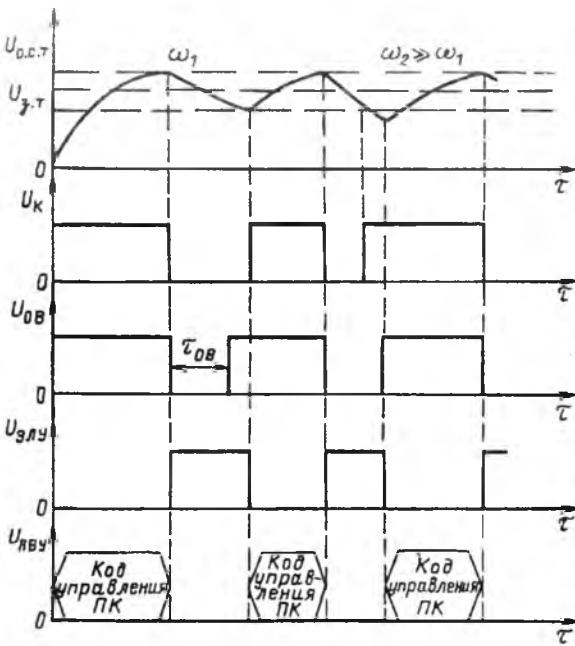


Рис. 3. Временные диаграммы работы элементов релейного контура тока

$\Delta U$  — половину ширины петли гистерезиса  $K$ ,  $K$  переключается и на его выходе будет сигнал нулевого уровня. По срезу этого сигнала  $OB$  формирует импульс низкого уровня и заданной длительности  $\tau_{OB}$ . Таким образом, в этот момент времени на вход ЭЛУ поступит сигнал с  $K$  низкого уровня и сигнал в  $OB$  также низкого уровня. Тогда на выходе этого элемента установится сигнал высокого уровня (за счет инверсии результата умножения), по длительности совпадающий с сигналом  $K$ . Этот сигнал поступит на управляющий вход  $PZU$  и отключит его. Это повлечет за собой отключение всех ключей ПК. После отключения ключей ПК ток в якоре  $BD$  начинает спадать (по экспоненциальному закону), уменьшается и сигнал ОС  $U_{ост}$ . Как только  $U_{ост}$  достигнет значения ( $U_{ост} - \Delta U$ ),  $K$  переключается, и на выходе установится сигнал высокого уровня. На выходе  $OB$  также будет сигнал высокого уровня, так как он формирует импульс только по спаду сигнала с  $K$ . Таким образом, сигналы с  $K$  и  $OB$  поступают на вход ЭЛУ, на выходе которого установится сигнал низкого уровня. Этот сигнал вновь разрешит работу  $PZU$ , на выходе которого в соответствии с сигналами  $DPR$  и  $CB3$  появится код управления ключами ПК. В данном релейном контуре тока  $OB$  выполняет роль ограничителя частоты колебаний. Таким образом, имеем четыре релейных контура тока, каждый из которых управляет своим  $BD$ , при этом МПз получает сигналы задания непосредственно от МПп.

При подаче управления с ОРГУ о начале дви-

жения по лестничным маршрутам  $MПп$  переключает  $AK$  для выдачи управления с  $PC$ , с которого сигнал управления выдается на  $BD$  передней оси, а также в  $MПп$  для выдачи управления на  $MПз$  для управления  $BD$  задней оси.  $PC$  является общим как для передней, так и для задней оси, потому что движение с регулированием скорости осуществляется только по лестничным маршрутам и будет всегда прямолинейным и нет необходимости ставить  $PC$  и на заднюю ось.

Осуществление поворотов происходит с помощью разбаланса скоростей колес. Для этого  $MПСУ$  имеет контуры положения (КП), которые выдают информацию о скорости левого и правого колес передней оси. Работа КП осуществляется следующим образом: с ИДП поступают две последовательности импульсов на  $BBxП$ , которые управляются  $MПп$ . С  $BBxП$  информация поступает в  $PZU$ , на выходе которого получаем сигналы, информирующие о знаке направления движения, а также два одинаковых сигнала частоты, один из которых идет на  $BПrП$ , с которого информация поступает на  $PZU$ , где с помощью временного сдвига между импульсами синхронизации на выходе  $PZU$  получаем суммарное значение частоты. Далее это значение частоты утверждается и подается в  $MПп$ . Так как считывание информации происходит за одинаковые промежутки времени, то эту информацию можно считать за информацию о скорости, на основе которой осуществляется поворот.

При повороте налево  $MПп$  выдает соответствующие сигналы задания на левый и правый  $BD$  передней оси, соответственно скорость левого колеса уменьшается, а правого — увеличивается, при этом  $MПп$  следит, чтобы она не превысила некоторого предельного значения, для того чтобы не произошло опрокидывания коляски.

При повороте направо идет соответственно уменьшение скорости правого колеса и увеличение скорости левого, при этом задняя ось осуществляет прямолинейное движение.

$MПСУ$  позволяет осуществлять поворот и при движении назад, за счет разворота передней оси, которая в этом случае становится задней относительно движения.

Разворот ИК осуществляется с помощью введения в действие сразу обоих осей за счет синхронизации движения переднего и заднего правого колес, а также переднего и заднего левого колес. Тем самым достигаются уменьшение радиуса разворота и увеличение маневренности ИК.

Данная  $MПСУ$  разрабатывается в Санкт-Петербургском Государственном Техническом Университете (СПбГТУ).

# Вентильный электродвигатель гусеничного движителя

И.В. ВОЙНОВ, В.А. ПАНШИН

г. Миасс Челябинской обл.

Основной структурный элемент гусеничного движителя самоходного шасси мобильного робототехнического комплекса — тяговый электродвигатель, обеспечивающий рабочее движение транспортной машины.

В настоящее время в электроприводе робототехнических устройств широко применяются вентильные двигатели [1], в которых коммутация обмоток осуществляется полупроводниковыми ключами (инверторами) по сигналам датчика положения. Вентильные двигатели имеют следующие преимущества: бесконтактность, большой срок службы, простота конструкции, отсутствие необходимости технического обслуживания при эксплуатации, технологичность изготовления, высокий КПД, хорошая управляемость и большие функциональные возможности, которые не могут быть реализованы другими типами двигателей.

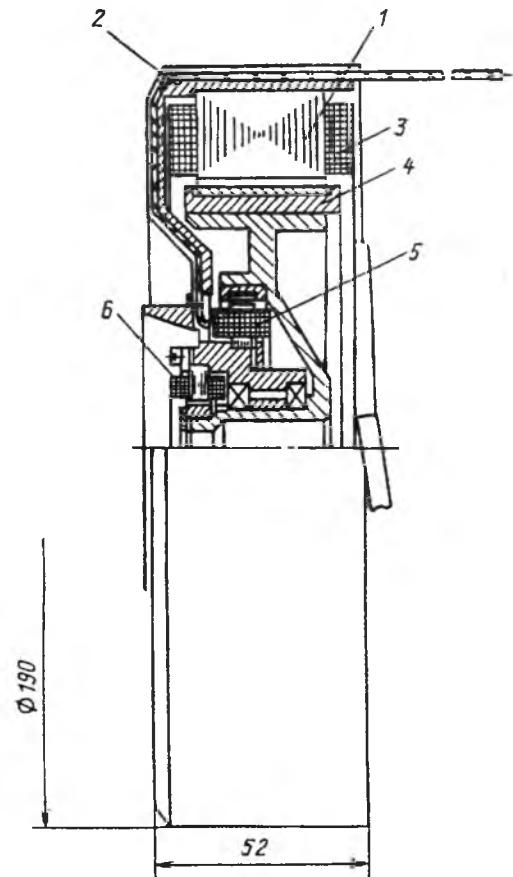
Ведущими зарубежными фирмами: «Indramat», «Bosch», «Siemens» (Германия), «Fanuc», «Mitsubishi», «Okuma» (Япония) и другими освоено производство вентильных двигателей с возбуждением от постоянных магнитов. В нашей стране также разработан ряд унифицированных серий магнитоэлектрических вентильных двигателей ДВУ, 2ДВУ, 3ДВУ [2]. Большинство этих двигателей (за исключением серии 3ДВУ) имеют отношение длины по корпусу к наружному диаметру корпуса значительно больше 1, чем затруднена их компоновка в конструкции мотор-колеса самоходного транспортного средства, в том числе и в гусеничном движителе шасси мобильного робототехнического комплекса.

Авторами разработан и освоен в опытном производстве вентильный двигатель для гусеничного движителя базового подвижного модуля робототехнического комплекса, предназначенного для работы в опасных зонах, исключающих присутствие человека (атомные электростанции, подземные выработки и т. д.).

Тяговый электродвигатель обеспечивает на ведущем катке движителя максимальное тяговое усилие до 2500 Н и максимальную скорость движения до 3,6 км/ч. Электродвигатель выполнен в корпусном исполнении, встраиваемый внутрь ведущего катка движителя, при этом соотношение длины к наружному диаметру двигателей составляет  $52/190=0,27$ . В лобовые части фазных обмоток двигателей встроены терморезисторы СТ1-19, подающие сигнал на отключение двигателя при недопустимом нагреве его обмотки (до  $145^{\circ}\text{C}$ ). Используемые в двигателях изоляционные ма-

териалы и обмоточный провод ПЭТВ-2 соответствуют классу изоляции В и допускают кратковременный нагрев до  $150^{\circ}\text{C}$ . Двигатель открытого исполнения, защита от внешних факторов (пыль, грязь, вода) обеспечивается конструкцией ведущего катка гусеничного движителя. В системе возбуждения двигателей используются постоянные магниты КС37. Конструкция двигателя обеспечивает его работоспособность в течение всего срока службы гусеничного движителя (10 лет) без профилактического осмотра.

На рисунке представлена конструкция двигателя ДБ-575.001. Шихтованный магнитопровод статора 1 установлен в стальном корпусе 2. В грушевидных пазах статора расположена двухфазная двухслойная обмотка 3. Для снижения зубцовых пульсаций момента, обусловленных зубчатым строением статора и наличием постоянных магнитов на роторе и влияющим на равномерность вращения при малых скоростях, число пазов статора выбрано некратным числу полюсов ротора, при этом пазы статора и полюса ротора выполнены несконченными, что существенно уп-



Конструкция двигателя ДБ-575.001

рощает технологию изготовления двигателей.

В результате такого технического решения амплитуда зубцового момента не превышает 1% номинального. С целью резервирования и снижения тока через инвертор обмотка выполнена двухканальной. Каждый канал занимает половину окружности статора. Ротор 4 выполнен в виде стальной втулки, на наружной поверхности которой наклеены 32 секторных постоянных магнита чередующейся полярности, образующие 16 пар полюсов. В двигатель встроен тахогенератор (ТГ) 5, представляющий собой магнитоэлектрическую машину обращенного исполнения с теми же числами пар полюсов и фаз, что и сам двигатель, и обеспечивающий обратную связь по частоте вращения.

В состав двигателя входит также бесконтактный датчик положения (ДПР) 6, представляющий собой индукторную машину с числом пар полюсов и фаз, соответствующим двигателю, и выдающий сигнал в систему управления двигателем об угловом положении ротора. Выводные концы двигателя и его электроэлементов (ДПР и ТГ) выполнены в виде жгутов и подключаются к клеммным платам гусеничного движителя.

Номинальные данные двигателя ДБ-575.001 при напряжении питания 24В:

Ток в каждом канале управления, А .....	9
Момент, Н·м .....	6,5
Мощность на валу, Вт .....	380
Частота вращения, об/мин .....	550
Потребляемая мощность, Вт .....	430
Крутизна тахогенератора, В/(об/мин) .....	0,09

В таблице приведены основные технические данные двигателя ДБ-575.001 и других вентильных двигателей аналогичного назначения отечественного и зарубежного производства.

Разработанный вентильный двигатель является двигателем с позиционной (дискретной) коммутацией, когда значение тока постоянно на межкоммутационном интервале, а переключение (коммутация) фаз обмотки осуществляется блоком управления по нулевым сигналам ДПР, по-

Тип двигателя	Длительный момент, Н·м	Момент инерции ротора $J \cdot 10^3$ , кг·м <sup>2</sup>	Масса двигателя, кг	Удельный момент, Н·м/кг
ДВУ165S (Россия)	7	4,4	22,5	0,31
2ДВУ115L (Россия)	4,7	0,46	7,2	0,65
3ДВУ215С (Россия)	4,7	0,58	5,8	0,81
ДБ-575.001 (Россия)	6,5	4,6	5,8	1,12
MAC71C («Indramat»)	6,6	1,3	11,0	0,6
SE-B3.095 («BOSCH»)	9,5	1,8	13,8	0,69
IFT5 066 («Siemens»)	6,5	1,1	11	0,59
5 («Fanuc»)	5,9	4,2	15	0,4

ступающим на управляющие входы полупроводниковых ключей. При этом форма ЭДС двигателя приближена к трапецидальной, что позволяет получить пульсации электромагнитного момента на межкоммутационном интервале на уровне 3–4% среднего значения.

Блок управления — двухканальный, выход каждого канала подключен к соответствующим обмоткам двигателя. В блоке управления предусмотрена защита по максимальному току, выполненная в виде токового ограничителя, ограничивающего ток в каждой фазе в пусковом режиме.

Регулирование частоты вращения вентильного двигателя осуществляется широтно-импульсным методом с контролем по выходному напряжению тахогенератора.

В заключение следует отметить, что разработанный для гусеничного движителя самоходного шасси мобильного робототехнического комплекса вентильный двигатель ДБ-575.001 по своему удельному массогабаритному показателю (удельный момент, равный отношению длительного момента к массе двигателя) превосходит лучшие зарубежные и отечественные образцы и может быть использован в конструкциях моторколес различного назначения.

#### Список литературы

1. Вентильные электродвигатели малой мощности для промышленных роботов / В.Д. Косулин, Г.Б. Михайлов, В.В. Омельченко, В.В. Путников. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1988.
2. Вентильные двигатели для станкостроения и робототехники (аналитическая справка). М.: Информэлектро, 1991.

## Анализ материалоемкости низковольтных электрических аппаратов для электрораспределения и электропривода

Д.М. ЗЕКЦЕР, канд. техн. наук

Материалоемкость — один из основных показателей экономической эффективности общественного производства.

Уменьшение материалоемкости имеет большое народно-хозяйственное значение, так как сокращаются затраты труда, овеществленные в экономленных ресурсах, увеличивается выпуск продукции при тех же производственных фондах, снижается себестоимость, повышаются рентабельность и надежность изделий.

Одним из основных инструментариев, способствующих наметить конкретные пути снижения материалоемкости, является структурный анализ массы изделия по основным и наиболее дефицитным и дорогостоящим видам входящих в аппарат материалов.

Структурный анализ обеспечивает глубокое изучение особенностей конструкции и технологии отечественных и зарубежных электрических аппаратов, выявление причин различия материалоемкости отечественных и зарубежных аппаратов и позволяет наметить пути снижения удельной массы отечественных изделий.

Показатель удельной массы дает возможность выявить снижение материалоемкости, как результат экономного расхода материалов (числитель уменьшается) или снижение материалоемкости, как следствие более эффективного использования материалов (знаменатель увеличивается), при этом знаменатель всегда является основным параметром аппарата.

В связи с этим за рубежом придают первостепенное значение проблеме материалов. Ведущий службой внешних связей объединения электротехнической промышленности Франции Р. Лагльбоэр пишет [1], что одна из основных проблем электротехнической промышленности — поиск новых видов более качественных и экономичных материалов, позволяющих повысить надежность оборудования, уменьшить его размеры и снизить себестоимость.

В США Уильям Ф. Миллер, рассматривая новые направления развития техники и технологии и их значение для промышленности развитых и развивающихся стран, ставит на первое место разработку новых материалов среди шести ведущих видов техники и технологии будущего [2].

Для проведения структурного сопоставительного анализа материалоемкости были разобраны

зарубежные образцы аппаратов на узлы и детали после окончания их испытаний с целью определения видов использованных материалов, структуры, массы изделия и технологии изготовления этих аппаратов.

Для сопоставления с этими образцами подбирались отечественные аппараты, по возможности одинаковые или близкие по основным техническим параметрам (классификационным).

При этом для зарубежных аппаратов масса определялась путем взвешивания аппарата в целом и всех его деталей, а для отечественных — в основном по технической документации. Нужно отметить, что в некоторых случаях масса зарубежных образцов, полученная путем взвешивания, отличается от массы, указанной в каталогах.

В анализе использованы данные о массе зарубежных и отечественных аппаратов в чистом виде. Кроме того, введен относительный показатель (в процентах) распределения общей массы материалов на группы: черные, цветные и пластмасса, что характеризует экономичность конструкции аппарата с точки зрения стоимости материальных затрат.

В статье приведен структурный анализ основных видов аппаратов: автоматических выключателей, плавких предохранителей и электромагнитных контакторов.

**Автоматические выключатели.** Для сопоставительного анализа структурной материалоемкости были использованы 12 образцов автоматических выключателей ведущих фирм Японии, США, Италии, ФРГ и Франции. Сопоставление с отечественными сериями АЕ2000М и ВА50 производилось с учетом номинального тока, предельной коммутационной способности и области применения, а также условий работы. Если имеет место несовпадение, например, предельная коммутационная способность (ПКС) для зарубежных изделий определяется в режиме О-ВО, а для отечественных — О-П-ВО-П-ВО, то производится пересчет для обеспечения эквивалентности режимов работы. Пример содержания такого анализа приведен в табл. 1, а некоторые результаты анализа — на рис. 1 и 2. При этом общие закономерности изменения материалоемкости позволяют производить сопоставительный анализ не по отдельным зарубежным типоразмерам, а

Фирма, страна	Тип	$I_H$ , A	Предельная коммутационная способность, кА	Масса		Черные металлы			Цветные металлы			Пластмасса			Себяро, кг
				общая, кг	удельная, кг/А	Масса, кг	Удельная масса, кг/А	Доля от общей массы, %	Масса, кг	Удельная масса, кг/А	Доля от общей массы, %	Масса, кг	Удельная масса, кг/А	Доля от общей массы, %	
«Klöckner Moeller», ФРГ	NZM6-100	100	12,5	2,19	0,022	0,613	0,0061	28	0,306	0,003	14	1,277	0,0128	58	0,0131
СНГ	AB2040M	100	6	1,43	0,0143	0,354	0,0036	25	0,291	0,0029	20	0,679	0,0068	47	0,0094
«Klöckner Moeller», ФРГ	BA51-31	100	12,5	0,83	0,0083	0,346	0,0035	42	0,166	0,0017	20	0,293	0,0029	35	0,0048
«Klöckner Moeller», ФРГ	NZM6-120	160	12,5	2,19	0,0137	0,613	0,0038	28	0,306	0,0019	14	1,277	0,008	58	0,0131
СНГ	AE2050M	160	11,5	2,25	0,014	0,399	0,0025	18	0,475	0,003	21	1,26	0,008	56	0,022
СНГ	BA51-33	160	12,5	1,6	0,01	0,543	0,0034	34	0,272	0,0017	17	0,67	0,0042	42	0,0094
CGE	TJK636	600	25	7,88	0,0131	2,55	0,0043	32,5	2,644	0,0044	33,6	2,518	0,0042	32	0,0201
СНГ	BA51-39	630	35	7,5	0,012	2,137	0,0034	28	2,82	0,0045	38	2,4	0,0038	32	0,0106

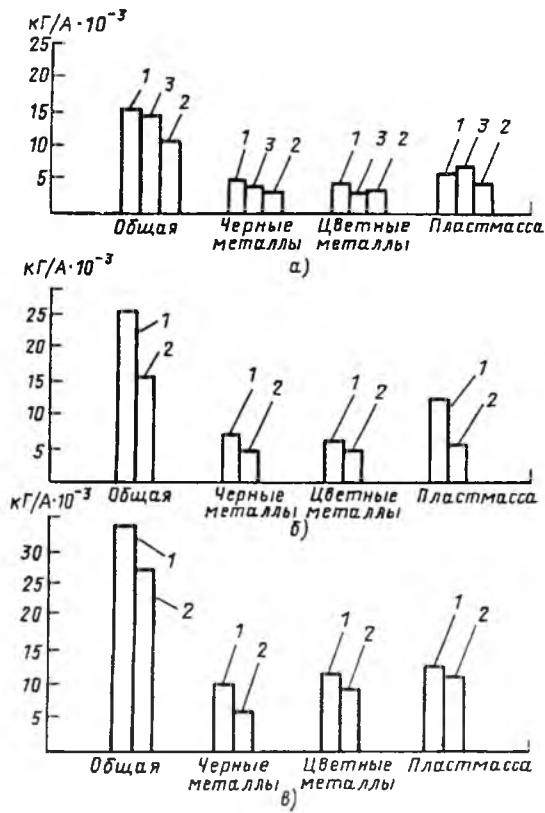


Рис. 1. Средняя удельная структурная материлоемкость автоматических выключателей со средней (а), с повышенной (б) и с высокой коммутационной способностью (в): 1 — выключатели зарубежных фирм; 2 — BA51; 3 — AE2000M

по средним показателям, что значительно упрощает структурный анализ.

На основании структурного анализа материлоемкости можно сделать следующие выводы:

1. Если удельную массу для выключателей со средней коммутационной способностью принять за 1, то удельная масса выключателей с

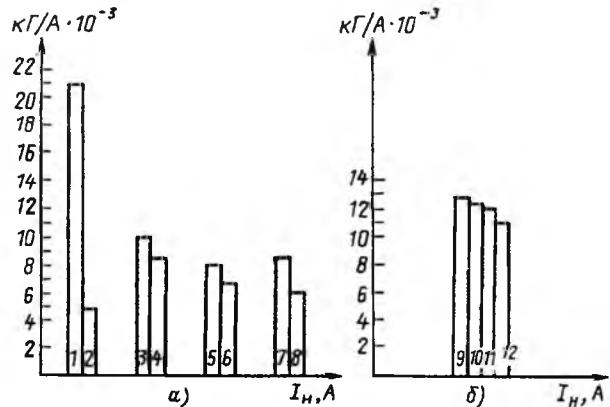


Рис. 2. Удельная материлоемкость пластмассы автоматических выключателей с повышенной коммутационной способностью (а) и с высокой (б):  
1 — TL100B (100 А); 2 — BA51-31Г (100 А); 3 — TG225 (225 А); 4 — BA51-35Г (200 А); 5 — TG400 (400 А); 6 — BA51-37Г (400 А); 7 — TG600 (600 А); 8 — BA51-39Г (630 А); 9 — NZMH11 (500 А); 10 — AF7 (600 А); 11 — BA51-37А (400 А); 12 — BA51-39Н (630 А)

повышенной коммутационной способностью будет для зарубежных — 1,56, для выключателей с высокой коммутационной способностью — 2,1, для серии BA51 — 1,41 и 2,41 соответственно.

2. Средняя удельная масса выключателей BA51 ниже таковой для зарубежных выключателей на 27%, а для группы с высокой ПКС — на 20%.

3. Удельная масса черных и цветных металлов у серии BA51 больше, чем у зарубежных, кроме случая для  $I_H=600$  А.

4. Удельная масса пластмассы у зарубежных выключателей больше.

5. В зарубежных выключателях серебро для контактов используется больше, чем в отечественных выключателях (у нас применяют пластированные контакты или композиции с меньшим содержанием серебра).

6. С увеличением номинального тока выклю-

чателя доля цветных металлов в общей массе увеличивается, а пластмассы — уменьшается.

7. Для контактов выключателей европейских фирм применена композиция серебро—никель или серебро—никель—графит, а в японских и американских — серебро—вольфрам (состав контактов определялся химическим анализом).

Отсюда видно, что по самому главному показателю — удельная масса — отечественные выключатели превосходят лучшие зарубежные аналоги, у которых удельная масса больше.

Конкурентоспособность по габаритам и электрическим параметрам подробно рассмотрена в [3].

**Предохранители плавкие.** Для анализа структурной материалоемкости были использованы предохранители зарубежных фирм: «Ферраз» (Франция), «Сименс» (ФРГ), «Лаур—Кнудсен» (Дания), «Бассмен» (США), а для сопоставимости — отечественные предохранители серий ПП57 и ПП31.

Меньшую удельную массу при одном и том же номинальном токе и предельной коммутационной способности (рис. 3) имеют быстродействующие предохранители LK-NES фирмы «Лаур—Кнудсен» (Дания).

Что касается пластмассы, то здесь картина противоположная. Удельная масса и доля пластмассы в общей массе у отечественных предохранителей больше (рис. 4).

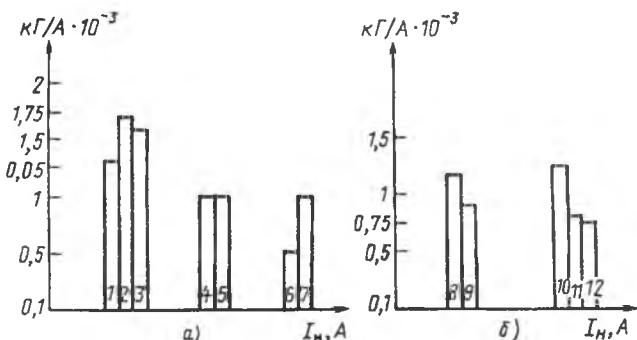


Рис. 4. Удельная материалоемкость пластмассы предохранителей быстродействующих (а) и нормального быстродействия. Обозначения те же, что и на рис. 3

В ближайшее время намечается выпуск таблеточных предохранителей ПП62 и ПП63 для защиты тиристоров и быстродействующих предохранителей ПП60С и ПП60М вместо ПП57, позволяющих снизить удельную материалоемкость в 3,25 раз и объем корпуса плавкой вставки — 2,25 раза.

Предохранители ПР2 будут заменены на ПП32 и ПП33, а предохранители ПРС — на ПП23 и ПП24.

В качестве плавких вставок будут применять алюминий вместо серебра.

Использование предохранителей ПП32 и ПП35 вместо ПН2 и МПН-60 обеспечивает уменьшение удельной материалоемкости в 1,8 раза и удельной установочной площади в 4,2 раза.

**Электромагнитные воздушные контакторы.** Для анализа структурной материалоемкости рассматривались зарубежные контакторы ведущих фирм «АСЕС» (Бельгия), «ТЕ» (Франция), «Сименс» (ФРГ) и соответствующие аналоги (табл. 2).

Из табл. 2 и рис. 5 видно, что до 250 А отечественные контакторы превосходят зарубежные аналоги-контакторы по удельным показателям материалоемкости.

При 250, 400, 630 А по общей массе и по проценту применяемости пластмассы от общей массы отечественные контакторы значительно больше, а по второму показателю — гораздо меньше. В связи с этим была разработана новая серия электромагнитных воздушных контакторов КМ15-33, КМ15-35, КМ15-37 и КМ15-39, не уступающих по всем показателям материалоемкости лучшим зарубежным аналогам. При этом есть еще резерв для уменьшения массы отечественных контакторов, если использовать стеатитовые или корундовые дугогасительные камеры по аналогии с зарубежными фирмами, имеющие

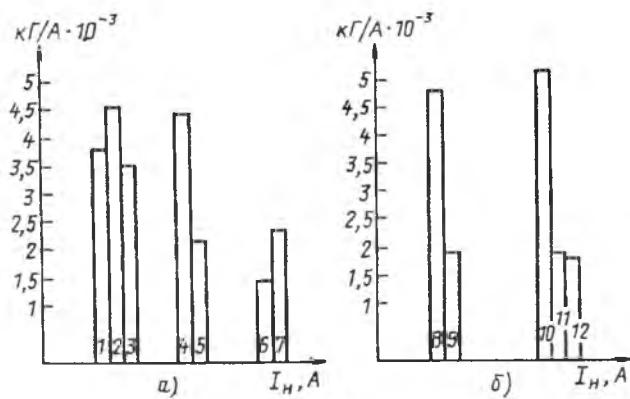


Рис. 3. Общая удельная материалоемкость предохранителей быстродействующих (а) и нормального быстродействия (б): 1 — GB (63 A); 2 — 3NA1 (80 A); 3 — ПП57-3167 (100 A); 4 — KTS-R250 (250 A); 5 — ПП57-3467 (250 A); 6 — LK-NES (400 A); 7 — ПП57-3767 (400 A); 8 — FRS-R110 (110 A); 9 — ПП31-33 (160 A); 10 — FRS-R250 (250 A); 11 — g-F (250 A); 12 — ПП31-35 (250 A)

Среди предохранителей нормального быстродействия удельная масса отечественных предохранителей серии ПП31 меньше лучших зарубежных аналогов.

Удельная масса черных металлов у отечественных быстродействующих предохранителей меньше, и доля черных металлов меньше от общей массы.

Аналогичные данные и для отечественных предохранителей нормального быстродействия.

Анализ цветных металлов показывает те же результаты.

Фирма, страна	Тип	$I_{H, A}$	Масса		Черные металлы			Цветные металлы			Пластмасса		
			общая, кг	удельная, кг	Масса, кг	Удельная масса, кг/А	Доля в общей массе, %	Масса, кг	Удельная масса, кг/А	Доля в общей массе, %	Масса, кг	Удельная масса, кг/А	Доля в общей массе, %
«АСЕС», Бельгия	KA125	125	9,3	0,074	5,46	0,044	58,7	2,425	0,019	26,08	1,414	0,0113	15,2
«ТЕ», Франция	GA125	125	6,5	0,052	3,67	0,029	56,4	1,91	0,0152	29,37	0,915	0,0073	14,07
СНГ	КТ6013	100	7,0	0,07	3,72	0,037	53,2	1,617	0,016	23,1	1,660	0,0166	23,7
«ТЕ», Франция	HA200	200	10	0,05	5,67	0,028	56,7	2,84	0,014	28,4	1,352	0,0068	13,62
СНГ	КТ6023	160	7	0,043	3,72	0,023	53,2	1,62	0,01	23,1	1,660	0,0103	23,7
«Сименс», ФРГ	ЗТА30	230	10,37	0,045	2,95	0,0128	28,34	4,03	0,0175	38,56	3,427	0,015	33,0
СНГ	КТ6033	250	17	0,068	8,39	0,034	49,4	3,64	0,015	21,41	4,52	0,018	26,6

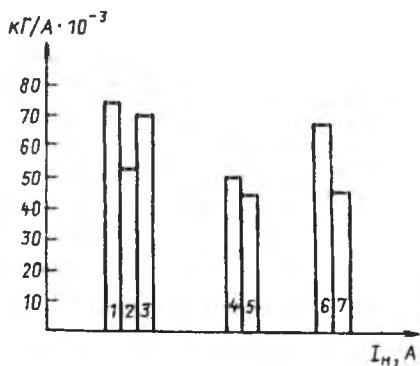


Рис. 5. Общая удельная материоемкость контакторов: 1 — KA125 (125 А); 2 — GA125 (125 А); 3 — KT6013 (100 А); 4 — HA200 (200 А); 5 — KT6023 (160 А); 6 — ZTA30 (230 А); 7 — KT6033 (250 А)

показатели прочности и дугостойкости значительно выше отечественного асбоцемента, применяемого широко для дугогасительных камер контакторов серий КТ6000, КТ7000, КМ15.

В табл. 3 приведены данные по удельной массе с учетом и без учета изоляции.

Таблица 3

Тип контактора	Удельная масса, кг/А	Удельная масса без изоляции, кг/А
KA125	74	63
GA125	52	42,4
KT6013	70	43,4
HA200	50	46,32
KT6033	68	54

Отсюда видно, что у отечественных контакторов общая удельная масса резко уменьшается по сравнению с зарубежными контакторами, если не учитывать пластмассу, так как изоляционные детали делаются более толстостенными.

Необходимо еще отметить, что зарубежные фирмы применяют металлокерамические контакты вместо медных, что позволяет снизить контактное нажатие и этим уменьшить размеры магнитной системы и, следовательно, массу контактора.

Дальнейшее уменьшение расхода материальных ресурсов для производства низковольтных

аппаратов следует ожидать по таким направлениям:

оптимизация конструкций при помощи ЭВМ на минимум стали и меди;

использование безотходной технологии;

использование магнитомягких, магнитотвердых и конструкционных спеченных материалов;

использование композиционных материалов, пакетированных контактов, алюмомедных проводов;

внедрение сверхлегких сплавов;

выявление фактических требований потребителей и действительных режимов работы низковольтных аппаратов и устройств с целью ликвидации избыточного качества;

замена реактопластмасс на термопластмассы;

ликвидация неоправданных резервов и унификаций;

использование сварки вместо клепки и завинчивания;

максимальное исключение применения крепежа в конструкциях;

широкое внедрение модульных конструкций или дифференциация конструкций, например, в зависимости от контактного набора.

В настоящее время разработана новая серия контакторов КМ, удельная масса которых меньше аналогичного показателя контакторов ведущих зарубежных фирм.

Конкурентоспособность отечественных контакторов по электрическим параметрам и габаритам подробно рассматривается в [4].

#### Список литературы

- Лагльбоэр Р. Электротехническая промышленность Франции. // Торговля и сотрудничество. 1981. № 82.
- Миллер Уильям Ф. Новые направления развития техники и технологии и их значение для промышленно развитых и развивающихся стран // США. 1986. № 9.
- Мицкевич Г.Ф. Основные направления развития низковольтного аппаратостроения // Электротехника. 1987. № 6.
- Зекцер Д.М. Конкурентоспособность электротехнической продукции на базе сегодняшних и перспективных требований зарубежных потребителей // Электротехническое производство. 1990. № 12.

# Спектр дребезга как информативный параметр для диагностики герконов

В.Н. ШОФФА, В.В. ИГНАТЬЕВ, С.В. ХРОМОВ

Необходимый уровень эксплуатационной надежности герметизированных магнитоуправляемых контактов (герконов) и различных электротехнических устройств на их основе достигается уменьшением вероятности установки в аппаратуру указанных изделий со скрытыми производственными дефектами.

Из анализа действующей на заводе-изготовителе герконов системы контроля качества следует, что информация об отрицательных результатах приемо-сдаточных испытаний (ПСИ) партии герконов поступает в цех примерно через 50–60 ч после предъявления в ОТК. Это соизмеримо с временем технологического цикла изготовления герконов. Применительно к герконам типа МКА-27101 за это время изготавливается и предъявляется в ОТК более миллиона штук.

Еще менее оперативными являются периодические испытания (ПИ), длительность получения информации по результатам которых соответствует времени тридцати технологических циклов изготовления герконов. Понятно, что за это время вся изготовленная и принятая продукция уже не только отгружена потребителям, но и находится в стадии эксплуатации.

Анализируя состав ПСИ и ПИ, можно констатировать, что по их результатам допустимо судить лишь о наличии или отсутствии явно дефектных изделий в проверяемой выборке, испытаний же по отбраковке потенциально ненадежных герконов в изготовленной партии и прогнозированию показателей надежности нет.

В настоящее время большинство методов показателей оценки надежности основано на измерении сопротивления электрического контакта в процессе наработки при различных режимах и условиях эксплуатации, однако теория контактов [1] и имеющиеся данные экспериментальных исследований не позволяют определить четкую взаимосвязь между изменением контактного сопротивления и параметрами надежности.

Повышение эксплуатационной надежности герконов, ее прогнозирование требует разработки диагностических методов и технических средств контроля на основе новых информативных параметров.

Необходимость разработки указанных методов обусловлена еще и тем, что в настоящее время испытаний герконов на минимальную наработку заводы-изготовители проводят с максимально возможной (по техническим условиям) частотой коммутации, составляющей, как правило, 50 или

100 Гц при скважности 2, в то время как при реальной эксплуатации в аппаратуре герконы работают для подавляющего большинства случаев применения в режиме разовых коммутаций.

Как показывают исследования [2], у большинства отечественных герконов при таких частотах к приходу очередного импульса на срабатывание контакт-детали (КД) еще находятся в колебательном движении после предшествовавшего отпускания. В условиях допускаемой нестабильности частоты задающего генератора ( $\pm 10\%$ ) это может вызвать изменение динамических параметров (в том числе дребезга) герконов в процессе наработки и, следовательно, повлиять на результаты испытаний. Для исключения влияния указанного эффекта рекомендовано [2] уменьшать частоту коммутаций при испытаниях до таких ее значений, при которых затухающее колебательное движение КД после размыкания закончится к приходу очередного управляющего сигнала, однако при этом значительно увеличивается время испытаний. Для большинства типов герконов это время может возрасти в 2–5 раз, поэтому задача по разработке методов ускоренной оценки надежности герконов является весьма актуальной.

Анализ научно-технической и патентной литературы, а также проспектов и каталогов некоторых зарубежных фирм [3, 4], занимающихся разработкой и выпуском герконов, показал, что работы в данном направлении интенсивно ведутся как в нашей стране, так и за рубежом. При этом указывается, что в качестве информативного параметра для оценки ресурса герконов может служить дребезг контактов при их срабатывании. Аналогичные рекомендации даны в [5] для электромагнитных реле. В [3] предлагается контролировать полную картину дребезга и сравнивать ее с предложенным эталоном, однако, не раскрывается способ получения данного эталона, а также связь этой картины с ресурсом геркона. В [4] указывается, что фирма осуществляет 100%-ный контроль дребезга выпускаемых герконов при срабатывании, но цель такого контроля и контролируемые параметры дребезга не раскрываются. В [5] предлагается и обосновывается метод разбраковки обычных электромагнитных реле по общему времени дребезга, однако предварительный анализ показал, что для герконов корреляция между временем дребезга и их ресурсом не наблюдается.

Поэтому наши исследования были направлены на тщательный анализ дребезга для выявления более информативных его параметров.

С этой целью для проведения исследований было произвольно взято 250 герконов типа МКА-27101Б. У этих герконов с помощью специально разработанной подсистемы АСНИ (обеспечивающей разрешающую способность 0,5 мкс) были сняты спектры дребезга в процессе срабатывания при рабочей МДС стандартной обмотки управления 90 А. Такое значение МДС было выбрано в соответствии с общими техническими условиями (ОТУ), регламентирующими методы испытаний герконов на безотказность и долговечность и требующими установления полуторакратного запаса от верхнего значения МДС срабатывания герконов испытуемой группы. Коммутировалась активная нагрузка постоянного тока 10 мА, 6 В. При этом упомянутые спектры определялись практическими особенностями магнитомеханической системы геркона, а также структурой его контактного покрытия.

Анализ полученных результатов показал, что среди спектров дребезга не существует даже двух абсолютно одинаковых, но все они могут быть рассортированы на группы, отличающиеся количеством разрывов коммутируемой цепи и их расположением на временной диаграмме после первого касания контакт-деталей. Разбиение спектров дребезга герконов на группы целесообразно, например, в случае, если будет доказано, что параметры закона распределения ресурса герконов одной группы будут отличаться от аналогичных параметров другой группы, или же будут выявлены один или несколько параметров, характеризующих связь каждого геркона с их ресурсом внутри каждой группы.

На основе изложенного все указанные коммутационные элементы были разбиты на группы (от 23 до 32 — в зависимости от критериев разбиения). Из пяти наиболее характерных и крупных групп 28 герконов были поставлены на ресурсные испытания. Спектры дребезга герконов этих групп приведены соответственно на рис. 1, а—д, где  $P$  — статистическая вероятность замкнутого состояния контактов в текущий момент времени, определенная по результатам 20 последовательных циклов срабатывания герконов. Значению  $P=100\%$  соответствует такое состояние контактов, когда по результатам всех 20 измерений они были замкнуты. Когда при всех измерениях контакты были разомкнуты,  $P=0\%$ .

Из рис. 1 видно, что спектры дребезга герконов выделенных групп имеют как различия, так и некоторые общие черты. Так, для спектров герконов первой (рис. 1, а, всего 5 шт.), второй (рис. 1, б, всего 4 шт.) и третьей (рис. 1, в, всего 12 шт.) групп близкими являются длительность первого и второго замкнутого состояния (примерно 25—30 мкс), а также длительность первого разрыва цепи (5—10 мкс). Кроме того, для гер-

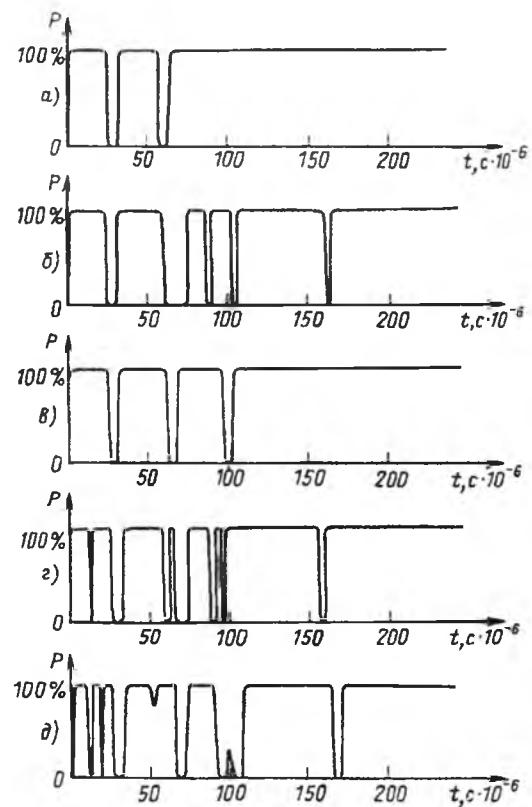


Рис. 1

конов первой и третьей групп соизмерима и длительность второго разрыва (2—16 мкс). Характерной особенностью дребезга герконов четвертой группы (рис. 1, г, всего 4 шт.) является наличие в начальной части спектра одного относительно непродолжительного первого разрыва цепи, а для герконов пятой группы (рис. 1, д, всего 3 шт.) таких разрывов два и более.

После проведения этих исследований все герконы были подвергнуты ресурсным испытаниям на установке НР-11 при коммутации активной нагрузки постоянного тока 80 мА, 60 В. Частота коммутаций при этом согласно рекомендациям [3] и техническим возможностям НР-11 была установлена 10 Гц при скважности 2. В процессе испытаний фиксировались сбои и отказы по превышению контактного сопротивления и неразмыканию.

Результаты ресурсных испытаний сведены в табл. 1.

Сбои и отказы определялись неразмыканием. Из табл. 1 видно, что при наработке до  $22,84 \cdot 10^6$  срабатываний отказали все герконы первой и второй групп, причем первый отказ был уже при  $5,84 \cdot 10^6$  срабатываний. Из двенадцати герконов третьей группы до  $63,563 \cdot 10^6$  срабатываний отказали все герконы (первый — при  $6,685 \cdot 10^6$  срабатываний). Из четырех герконов четвертой группы первый геркон отказал при  $37 \cdot 10^6$  срабатываний. Из трех гер-

конов пятой группы первый геркон отказал при  $68,9 \cdot 10^6$  срабатываний, а третий был снят с испытаний после  $100 \cdot 10^6$  срабатываний без сбоев и отказа. Следует отметить, что все герконы четвертой и пятой групп в отличие от герконон первых трех групп отказывали без предварительных сбоев.

Таблица 1

Номер группы	Номер геркона	Наработка до первого сбоя $N \times 10^6$	Число сбоев до отказа	Наработка до отказа $N \times 10^6$
1	1	—	—	6,33
	5	5,19	5	7,26
	4	—	—	9,46
	2	—	—	9,63
	3	—	—	22,84
2	6	5,55	7	5,84
	8	5,49	1	5,95
	7	10,87	27	11,03
	9	—	—	14,09
3	18	—	—	6,685
	19	1,96	3	10,695
	15	15,96	1	15,99
	12	3,33	2	26,69
	14	12,99	1	27,56
	10	18,22	1	27,70
	21	31,085	1	32,37
	17	5,56	1	39,5
	20	—	—	42,6
	13	—	—	43,6
	11	—	—	61,59
	16	—	—	63,563
	24	—	—	37,0
	28	—	—	47,05
	25	—	—	73,25
	26	—	—	73,4
5	27	—	—	68,9
	22	—	—	96,7
	23*	—	—	—

\* При числе срабатываний до  $10^8$  сбоев и отказов не зафиксировано.

Результаты ресурсных испытаний были подвергнуты статистическому анализу с использованием закона распределения Вейбулла. Анализ проводился по методике, регламентированной стандартом МЭК 1974 г. «Публикация 255-0-20. Реле электрические. Рабочие характеристики контактов электрических реле». Результаты испытаний для всех 27 (28 минус 1, снятый до наступления отказа) герконов представлены на рис. 2, откуда следует, что результаты испытаний не отсортированных по спектрам дребезга герконов не могут быть аппроксимированы прямой линией и, следовательно, не подчиняются закону распределения Вейбулла. Это означает, что особенности причин отказов у герконов, вероятно, разные, и, кроме того, оценить ускоренно наработку герконов, не разбитых на группы по указанному выше критерию, не представляется возможным.

Аналогичный анализ был сделан для герконов с близкими спектрами дребезга. В качестве примера на рис. 3 приведены результаты анализа

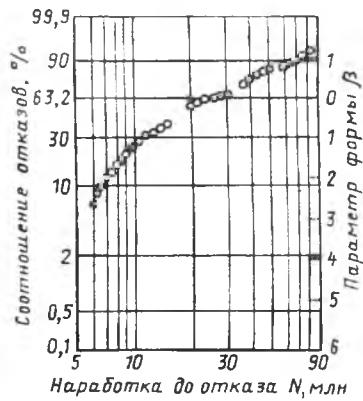


Рис. 2

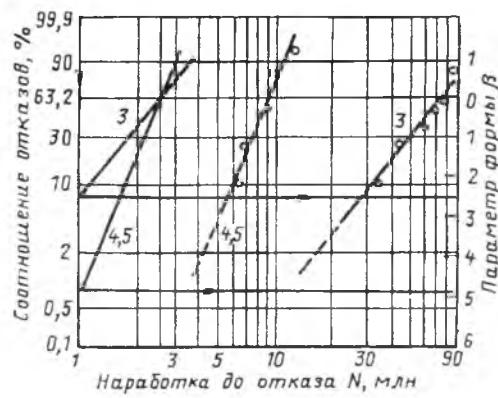


Рис. 3

для герконов третьей (левая совокупность экспериментальных точек), а также четвертой и пятой (совместно) групп (правая совокупность экспериментальных точек). Из рис. 3 следует, что законы распределения ресурса герконов с близкими спектрами дребезга можно аппроксимировать прямой линией и, следовательно, по результатам испытаний выборочной группы герконов можно оценить ресурс всех герконов с аналогичными спектрами дребезга, не проводя для них полностью аналогичных испытаний. Так, для герконов третьей группы характеристический срок службы составил  $N_c = 38,45 \cdot 10^6$  срабатываний, параметр формы  $\beta = 1,64$ , а средняя наработка  $N_{cp} = 34,34 \cdot 10^6$  срабатываний. Для совокупности герконов четвертой и пятой групп было получено:  $N_c = 82,39 \cdot 10^6$  срабатываний,  $\beta = 2,74$ ,  $N_{cp} = 73,55 \times 10^6$  срабатываний.

Визуальный анализ контактных поверхностей всех герконов показал, что при данном виде нагрузки износ определялся массопереносом материала контактов с анода на катод, при котором на катоде образуются характерные пики, а на аноде — соответствующие им кратеры. Форма и место расположения пиков и кратеров от образца к образцу не совпадали. Неразмыкание кон-

тактов вызывалось заклиниванием пиков в кратерах, при этом более крупные размеры пиков наблюдались у отказавших герконов первых трех групп.

Таким образом, установлено, что вероятность появления первого сбоя и отказа выше для герконов первой, второй и третьей групп, чем для четвертой и пятой групп. Вместе с тем, общее между герконами первых трех групп заключается в отсутствии кратковременных разрывов цепи в режиме 6 В, 10 мА до появления первого продолжительного разрыва при дребезге (см. рис. 1, а, б, в), а общим для герконов четвертой и пятой групп является наличие указанных кратковременных разрывов (см. рис. 1, г, д). Указанное можно использовать для предварительной оценки ресурса герконов и объясняется следующим образом [6].

Контакт-детали геркона имеют бесконечно большое число степеней свободы. Это в зависимости от взаимной ориентации КД после их заварки в баллон геркона, параметров нагрузки, управляющего воздействия и ряда других факторов определяет вид спектра дребезга. Так, если при прочих равных условиях КД в момент срабатывания имеют ориентацию, близкую к параллельной, то после их первого касания происходит взаимное обкатывание поверхностей контактов, т. е. контактирование происходит по всей плоскости. Обкатывание и является причиной кратковременных разрывов цепи нагрузки в начальной части спектра дребезга и неустойчивости по месту на контактирующих поверхностях последующего, относительно продолжительного разрыва на рис. 1, г, д. Аналогичные кратковременные разрывы могут быть и в других частях спектра.

Если же КД ориентированы с существенным перекосом, то взаимное обкатывание контактирующих поверхностей, а следовательно, и высокочастотная составляющая в спектре дребезга не наблюдаются.

Таким образом, спектры дребезга герконов типа МКА-27101 с параллельными КД имеют относительно длительное (до 30 мкс) первое замкнутое состояние и относительно длительный (до 10 мкс) первый разрыв коммутируемой цепи (рис. 1, а, б, в).

Условия коммутации при срабатывании герконов четвертой и пятой групп при активной нагрузке 60 В, 80 мА оказываются более благоприятными из-за того, что эрозия контактного материала может развиваться по поверхности, в то время как для герконов первой, второй и третьей групп развитие эрозии происходит по линии или в точке. Это значит, что процесс развития пиков и кратеров происходит более интенсивно для герконов первых трех групп и вероятность сбоя или отказа (неразмыкания) вслед-

ствие заклинивания для них оказывается более высокой, чем у герконов четвертой и пятой групп, причем герконы пятой группы предпочтительнее, так как герконы этой группы имеют два и более кратковременных разрыва цепи в передней части спектра дребезга (рис. 1, д), в то время как герконы четвертой группы имеют только один такой разрыв (рис. 1, г).

В процессе дальнейших исследований был проведен статистический анализ спектра дребезга герконов третьей (рис. 1, в), наиболее представительной группы, в которую вошло 59 герконов из 250 (23,6% общего числа исследуемых герконов), с целью получения некоторого среднестатистического образца дребезга для этой группы, сравнение с которым позволило бы в дальнейшем определять принадлежность герконов к данной группе.

В качестве информативных параметров, описывающих спектр дребезга, были выбраны следующие (рис. 4):

$\tau_1$  и  $\tau_2$  — временные координаты переднего и заднего фронтов первого отскока;  $\tau_3$  и  $\tau_4$ , а также  $\tau_5$  и  $\tau_6$  — те же координаты соответственно второго и третьего отскоков;  $t_1$ ,  $t_2$  и  $t_3$  — соответственно длительность первого, второго и третьего отскоков.

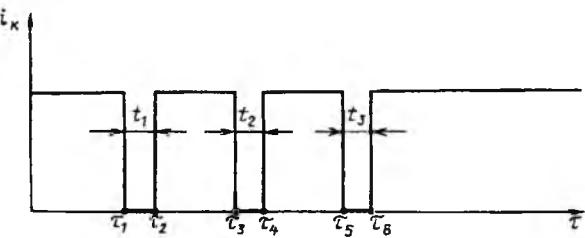


Рис. 4

Для каждого из указанных параметров были определены средние значения выборки  $\bar{\tau}$  и их среднеквадратические отклонения  $\sigma_{\tau}$ , которые представлены в табл. 2.

Таблица 2

Параметр	$\tau_1$	$\tau_2$	$\tau_3$	$\tau_4$	$\tau_5$	$\tau_6$	$t_1$	$t_2$	$t_3$
$\bar{\tau}$ , мкс	29,3	36,4	66,1	75,7	103,9	113,0	7,1	9,1	9,1
$\sigma_{\tau}$ , мкс	0,914	1,41	2,52	5,36	3,96	3,74	1,52	3,76	3,64

Статистический анализ распределения указанных параметров показал возможность их аппроксимации нормальным законом распределения.

В этом случае возможно определение с учетом среднеквадратических отклонений доверительных интервалов для каждого параметра. Для определения доверительных интервалов выберем так называемые «двуихсигмовые» границы. Это озна-

чает, что с вероятностью  $P=0,954$  параметры будут лежать в интервале  $[\bar{\mu} - 2\sigma, \bar{\mu} + 2\sigma]$ , где  $\bar{\mu}$  — среднее значение выборки. Тогда границы интервала, в который с указанной вероятностью будет попадать первый отскок, определяются как  $[\tau_1 - 2\sigma_{\tau_1}, \tau_2 + 2\sigma_{\tau_2}]$ .

Аналогично будут определяться границы интервалов для второго и третьего отскоков.

Таким образом, границы интервалов, в которые с вероятностью  $P=0,954$  попадает каждый из трех отскоков, будут следующими:

для первого —  $[27,5; 38,8]$  мкс;

для второго —  $[61,1; 86,4]$  мкс;

для третьего —  $[96,0; 120,5]$  мкс.

При этом доверительные интервалы для длительности каждого из отскоков будут определены как

$$[t_1 - 2\sigma_{t_1}; t_1 + 2\sigma_{t_1}], [t_2 - 2\sigma_{t_2}; t_2 + 2\sigma_{t_2}],$$

$$[t_3 - 2\sigma_{t_3}; t_3 + 2\sigma_{t_3}].$$

После вычисления получим следующие результаты:

$$4,06 \text{ мкс} \leq t_1 \leq 10,14 \text{ мкс};$$

$$1,58 \text{ мкс} \leq t_2 \leq 16,62 \text{ мкс};$$

$$1,82 \text{ мкс} \leq t_3 \leq 16,38 \text{ мкс}.$$

На рис. 5 показаны рассчитанные доверительные интервалы (заштрихованы), в которые с вероятностью  $P=0,954$  будут попадать все три отскока герконов анализируемой группы, причем длительность каждого отскока с той же вероятностью будет ограничена указанными интервалами для  $t_1$ ,  $t_2$  и  $t_3$ . Сопоставляя представленные на рис. 5 интервалы с осциллограммами процесса

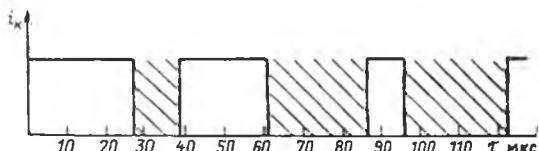


Рис. 5

дребезга исследуемых герконов и учитывая допустимые длительности каждого отскока, можно определить принадлежность геркона к данной группе.

Таким образом, в результате выполненных исследований герконов типа МКА-27101Б была выявлена возможность ускоренной оценки их ресурса на основе анализа параметров спектра дребезга при срабатывании для коммутируемых нагрузок, вызывающих направленный перенос материала контактов.

#### Список литературы

1. Хольм Р. Электрические контакты. М.: Иностранная литература, 1961.
2. Влияние способов и режимов управления на динамические характеристики магнитоуправляемых контактов / В.Н. Шоффа, С.В. Хромов, В.Н. Чичерюкин, С.В. Давыдов // Техника связи. Сер. ТПС. 1991. Вып. 9. С. 3—13.
3. Пат. 3993949 США. МКИ H01H11/04, 101H49/00.
4. Subminiature single-in-line dry reed relay // Clare International N.V. Brussels, 1985.
5. Мироненко А.Ф., Ердяков С.В. Дребезг контакта и надежность работы электромагнитных реле // Техника средств связи. Сер. ТПС. 1990. Вып. 9. С. 31—44.
6. А.с. 1702451 СССР. МКИ H01H11/04, H01H49/00. Способ контроля качества магнитоуправляемых контактов / Н.Д. Попов, Ю.А. Шрайнер, В.Н. Шоффа и др. // Открытия. Изобретения. 1991. № 24.

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

### Токи асинхронного двигателя при статическом эксцентризите

А.Н. НОВОЖИЛОВ, канд. техн. наук

Казахский государственный технический университет

Статический эксцентризитет ротора возникает в асинхронном двигателе (АД) при смещении опор ротора и прогибах вала. Появляется неравномерность воздушного зазора, а в зазоре дополнительные поля [1]. Последние вызывают в обмотках АД дополнительные токи. Эти токи изменяют параметры АД. Они могут служить информацией об эксцентризите ротора. Иногда их следует учитывать при определении установок устройств релейной защиты. Таким образом, оценка значений

дополнительных токов достаточно важна, а часто просто необходима.

Прогибы вала обычно возникают от радиальных сил на выступающем конце вала, начального эксцентризита в АД, магнитных сил и собственной массы ротора. Радиальные силы возникают из-за натяжения приводного ремня или давления через соединительную муфту. В расчетах при прогибе вала можно считать перемещение оси вращения ротора относительно оси расточки

статора параллельным. Это допущение не приводит к значительным погрешностям, так как толщина пакета сердечника ротора значительно меньше расстояния между опорами, а прогибала из-за симметрии обычно происходит посередине пакета.

При перемещении опор ротора, если они не равны, оси ротора и расточки статора не параллельны. Возможно большое многообразие положения в пространстве оси ротора. Однако для анализа параметров тока фазы АД, как показали эксперименты, достаточно ограничиться таким перемещением опор, при котором оси вращения ротора и расточки статора лежат в одной плоскости.

На рис. 1 приведена расчетная схема по определению перемещения элементов ротора, где 1 и 2 — сердечники статора и ротора; 3 и 4 — их обмотки; 5 — соединительная муфта или шкив; 6 и 7 — первая и вторая опоры ротора.

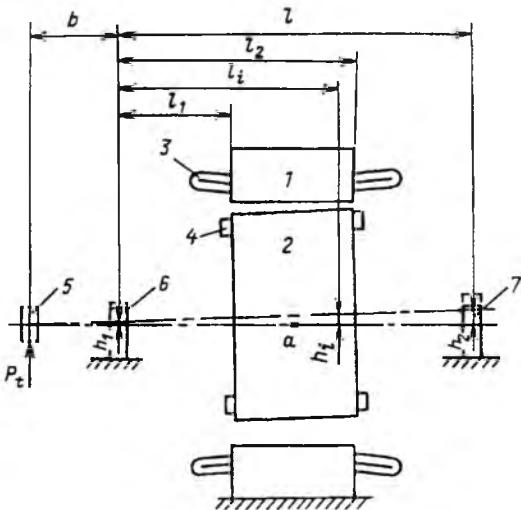


Рис. 1. Расчетная схема для определения перемещения элементов ротора

Пренебрежем зубчатостью статора и ротора со стороны воздушного зазора, а также дискретностью обмоток АД. Если первая и вторая опоры ротора переместятся на  $h_1$  и  $h_2$ , то  $i$ -й лист сердечника ротора на

$$h_i = h_1 - \frac{(h_1 - h_2)}{l} l_i, \quad (1)$$

где  $l_i$  — расстояние от первой опоры до  $i$ -го листа сердечника ротора.

Анализ выражений значительно упростится, если принять  $h_2$  положительной величиной.

Развернем машину в тангенциальном направлении (рис. 2). За начало координат примем точку на оси  $x$ , в которой зазор при эксцентризите ротора у второго торца максимальен. Тогда с учетом коэффициента Картера  $k_\delta$  воз-

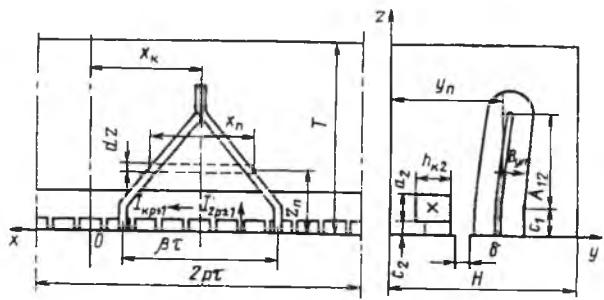


Рис. 2. Расчетная схема для определения магнитных полей в торцевой зоне асинхронного двигателя

душный зазор

$$\delta_i = k_\delta \delta_H - h_i \cos \frac{\pi}{pt}; \quad \delta_H = r_1 - r_2, \quad (2)$$

где  $x$  — координата;  $r_1$  и  $r_2$  — радиусы расточек статора и ротора;  $\tau$  и  $p$  — полюсное деление и число пар полюсов АД.

Если принять относительный эксцентрикитет для  $i$ -го листа

$$\varepsilon_i = \frac{h_i}{k_{\delta} \delta_{\text{H}}}, \quad (3)$$

то удельная проницаемость зазора, образованная *i*-ым листом сердечника ротора,

$$\lambda_i = \frac{\mu_0}{k_\delta \delta_{\text{H}}} \frac{1}{\left(1 - \varepsilon_i \cos \frac{\pi}{p\tau} x\right)}. \quad (4)$$

Разложим вторую часть (4) в ряд Фурье и, ограничившись первым членом ряда, получим:

$$\lambda_i = \frac{\mu_0}{k_\delta \delta_u} \lambda_{0i} \left( 1 + \frac{\lambda_{1i}}{\lambda_{0i}} \cos \frac{\pi}{p\tau} x \right), \quad (5)$$

где

$$\lambda_{0i} = \frac{1}{\sqrt{1 - \varepsilon_i^2}}; \quad \lambda_{1i} = \frac{2(1 - \sqrt{1 - \varepsilon_i^2})}{\varepsilon_i \sqrt{1 - \varepsilon_i^2}}.$$

Если магнитодвижущая сила (МДС) воздушного зазора в режиме холостого хода АД

$$F_\delta = F_{1m} \cos \left( \frac{\pi}{\tau} x - \omega t \right), \quad F_{1m} = 1,35 \frac{I_1 w_1 k_{w1}}{p}, \quad (6)$$

то индукция магнитного поля зазора

$$B_{\delta i} = -\frac{\mu_0}{k_{\delta} \delta_{\text{H}}} \lambda_{0i} F_{1m} \times \times \left\{ \cos \left( \frac{\pi}{\tau} x - \omega t \right) + \frac{\lambda_{1i}}{2\lambda_{0i}} \cos \left[ (p \pm 1) \frac{\pi}{p\tau} x - \omega t \right] \right\}, \quad (7)$$

где  $F_{1m}$  — МДС обмотки статора, приведенная к одному полюсу;  $I_1$  и  $w_1$  — ток и число витков обмотки фазы;  $k_{w1}$  — обмоточный коэффициент.

Как видно из уравнения (7), возникли дополнительные поля с  $p \pm 1$  числом пар полюсов. Они врачаются асинхронно с ротором и поэтому

демпфируются полями «беличьей клетки». С учетом [1] демпфирующие поля ротора

$$B_d = -\frac{\mu_0}{k_\delta \delta_h} \sum_1^I \frac{\lambda_{1i}}{2\lambda_{0i}} (1 - D_{p\pm 1}) F_{1m} \times \cos \left[ (p \pm 1) \frac{\pi}{p\tau} x - \omega t \right], \quad (8)$$

где  $D_{p\pm 1}$  — коэффициент демпфирования, который для АД с  $p \geq 2$  можно принимать равным 0,25–0,3.

МДС ротора

$$F_d = (0,7 \div 0,75) \frac{\lambda_{1i}}{2\lambda_{0i}} F_{1m}, \quad (9)$$

а с учетом [3] ток в нем

$$I_{2d} = \frac{F_d (p \pm 1)}{0,225 z_2}, \quad (10)$$

где  $z_2$  — число пазов ротора.

Очевидно,  $I_{2d}$  пропорционален  $B_d$  и зависит только от режима работы. В [2] приведена зависимость  $B_d = f(s)$ , в соответствии с которой  $I_{2d}$  при пуске должен быть примерно вдвое меньше его значения в режиме холостого хода, где  $s$  — скольжение ротора. В кольце «беличьей клетки»

$$I_d = \frac{I_{2d}}{2 \sin \frac{\pi (p \pm 1)}{z_2}}. \quad (11)$$

Ток в обмотке статора от дополнительных полей обусловлен ЭДС индуцируемых в ней полем  $B_d$  и током  $I_d$ . Поле  $B_d$  имеет  $p \pm 1$  пар полюсов, а обмотка статора  $-p$ . Поэтому сумма ЭДС витков каждой из фаз от  $B_d$  равна нулю. Это относится и к ЭДС, наводимым  $I_d$  в изготовленных идеально лобовых частях обмотки статора. Но реальная машина имеет отклонение параметров лобовых частей секции от номинала. Поэтому ЭДС не равна нулю.

ЭДС  $E_k$ , наведенная  $I_d$  в лобовой части  $k$ -й секции, определяется по расчетной схеме (рис. 2) и [3]. Поэтому

$$E_k = 2\pi f_{p\pm 1} w_c \Phi_{yk}, \quad (12)$$

где

$$\Phi_{yk} = B_{yk} s_c; \quad B_{yk} = \frac{\partial A_x}{\partial z}; \quad \frac{\partial^2 A_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A_x}{\partial z^2} = -\mu_0 j_d,$$

при условии, что плотность тока в кольце «беличьей клетки»

$$j_d = \frac{I_d}{c_2 h_{k2}} \sin \left( \frac{\pi}{\tau_{p\pm 1}} - \omega t \right), \quad (13)$$

а распределение  $B_{yk}$  в плоскостях, перпендикулярных оси  $x$ , синфазно ( $\tau_{p\pm 1}$  — полюсное деление

дополнительных полей). Уравнение Пуассона можно решать так же, как в [3] по методу Гринберга с граничными условиями

$$\left[ \frac{\partial A_x}{\partial z} \right]_{z=0}^{z=T} = 0. \quad (14)$$

Если форму лобовой части секции аппроксимировать треугольником с основанием  $\beta\tau$  и высотой  $c_1 + A_{12}$ , то длина ее  $n$ -й элементарной площадки

$$x_n = \frac{(c_1 + A_{12} - z)\beta\tau}{2(c_1 + A_{12})}. \quad (15)$$

Среднее значение  $B_y$  в пределах этой площадки

$$B_y = \int_{x_k - \frac{x_n}{2}}^{x_k + \frac{x_n}{2}} B_{ym} \cos \frac{\pi}{\tau_{p\pm 1}} x dx. \quad (16)$$

Тогда, с учетом выражений (15), (16) поток через лобовую часть секции

$$\Phi_{yk} = \frac{\tau}{2\pi} \int_0^{c_1 + A_{12}} B_{yk} \left[ \sin \frac{\pi}{\tau_{p\pm 1}} \left( x_k + \frac{x_n}{2} \right) - \sin \frac{\pi}{\tau_{p\pm 1}} \left( x_k - \frac{x_n}{2} \right) \right] dz = \frac{\tau}{\pi} \cos \frac{\pi}{\tau_{p\pm 1}} x_k \int_0^{c_1 + A_{12}} B_{yk} \sin \frac{\pi}{2\tau_{p\pm 1}} x_n dz. \quad (17)$$

Суммарная ЭДС, например фазы  $A$  АД,

$$E_A = \sum_1^K E_{kA},$$

где  $E_{kA}$  — ЭДС  $k$ -й секции фазы  $A$ .

ЭДС фазных обмоток АД совпадают по фазе. Поэтому ток в фазе  $A$  от дополнительных полей

$$I_{A_{p\pm 1}} = \frac{2E_A - E_B - E_C}{U_\Phi} I_\Phi, \quad (18)$$

где  $I_\Phi$  и  $U_\Phi$  — напряжение и ток фазы АД в режиме холостого хода.

Оценим величины  $I_{A_{p\pm 1}}$  при различных видах эксцентризитета.

При прогибах вала смещения всех листов сердечника ротора равны. Следовательно, относительный эксцентризитет всех листов одинаков. Прогиб  $h_t$  вала от натяжения ремня или сторонней силы  $P_t$

$$h_t = \frac{15,24 P_t b b_1^3}{\pi l d_{\text{в}}^2} 10^{-4}, \quad (19)$$

где  $d_{\text{в}}$  — диаметр вала в точке  $a$ .

Прогиб вала от массы сердечника ротора

$$h_\Delta = \frac{20,3 G_2 b_1^5}{\pi l^2 d_{\text{в}}^4} 10^{-4}, \quad (20)$$

где  $G_2$  — масса сердечника ротора.

Прогиб вала от сил одностороннего магнитного тяжения

$$h_p = h_t h_d \frac{3D_{a2} l_p}{G_2} 10^{-2}, \quad (21)$$

где  $D_{a2}$  — внешний диаметр ротора.

Полный прогиб от всех перечисленных воздействий

$$h = h_t + \frac{h_p h_t}{h_t - h_p}. \quad (22)$$

Если допустить, что первая опора первоначально была неточно установлена и имела смещение  $h_1$  (рис. 1), а вторая смешилась в процессе эксплуатации на  $h_2$ , то члены ряда удельной магнитной проницаемости при расчете токов от полей с  $p \pm 1$  парами полюсов

$$\begin{aligned} \lambda_0 &= \frac{1}{(l_2 - l_1)} \int_{l_1}^{l_2} \frac{dl}{\sqrt{1 - \epsilon_i^2}}; \\ \lambda_1 &= \frac{2}{(l_2 - l_1)} \int_{l_1}^{l_2} \frac{1 - \sqrt{1 - \epsilon_i^2}}{\epsilon_i \sqrt{1 - \epsilon_i^2}} dl. \end{aligned} \quad (23)$$

Изложенное правомерно и для высших гармонических полей воздушного зазора АД [1].

Полученные выражения проверялись экспериментально на асинхронном двигателе А02-41-6. АД соединялся с синхронным генератором с помощью муфты или ременной передачей. Генератор позволял загружать АД до  $3I_n$ . В АД предусмотрена возможность перемещения одного из подшипников и контроля перемещения. Токи  $I_{A_{p\pm 1}}$  измерялись анализатором спектра. Последний подключался к трансформатору тока АД через трансреактор.

На рис. 3 приведены кривые 1 и 2 зависимости тока  $I_{A_{p\pm 1}}$  в фазе АД от эксцентризитета. Они получены экспериментальным и расчетным путем в режиме холостого хода при смещении одной из опор. Кривые 3 и 4 получены аналогично, но с давлением на шкив АД приводного ремня. Экспериментальная зависимость тока  $I_{A_{p\pm 1}}$  приведена в таблице.

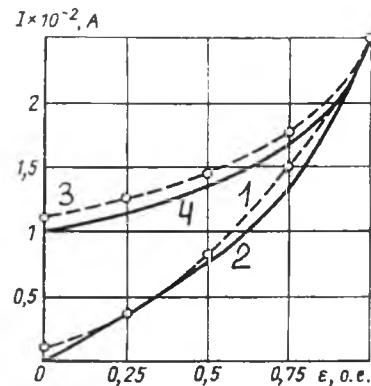


Рис. 3. Зависимости величин дополнительных токов в фазе А АД от статического эксцентризитета

Режим работы АД	Ток на выходе анализатора спектра, о.е.
Холостой ход	1,0
Номинальная нагрузка	0,857
Двойная номинальная нагрузка	0,643
Пуск	-0,5

Она хорошо согласуется с зависимостью  $B_\delta = f(s)$ , приведенной в [2].

## Выводы

1. Предлагаемые выражения для расчета токов в АД от дополнительных полей в зазоре позволяют учитывать все виды смещения ротора.
2. Расхождение результатов расчета и экспериментов не превышает 15%.

## Список литературы

1. Геллер Б., Гамата В. Высшие гармоники в асинхронных машинах. М.: Энергия, 1981.
2. Петров Г.Н. Электрические машины. 3-е изд., перераб. М.: Госэнергоиздат, 1963.
3. Новожилов А.Н. Расчет параметров кольцевого измерительного преобразователя // Изв. вузов. Электромеханика. 1990. № 11. С. 44—48.

## 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

Вологодская областная универсальная научная библиотека

[www.booksite.ru](http://www.booksite.ru)

# К оптимизации технологических режимов изготовления жаростойких обмоток

Т.Н. МУРАВЬЕВА, инж.

Одним из основных узлов, определяющих работоспособность электромагнитных насосов, используемых для перекачки жидкокометаллических теплоносителей в реакторах на быстрых нейтронах, является катушка обмотки возбуждения. Термовые нагрузки на материалы здесь близки к предельным (до 600°C) даже для самых нагревостойких из существующих [1]. Выход из строя системы возбуждения чаще всего связан с отказом витковой изоляции, способной лишь кратковременно выдерживать температуру 600°C. Вопрос повышения температуры эксплуатации и срока службы электромагнитных насосов изучен недостаточно.

Комплекс проведенных работ [2] выявил возможность повышения работоспособности системы витковой изоляции катушки путем стабилизации ее свойств оптимизацией режимов отверждения и выбора условий эксплуатации. Обосновывается необходимость двух этапов предварительной термической обработки системы витковой изоляции: на низкотемпературной стадии происходят завершение реакции поликонденсации, термоокисление боковых функциональных групп молекулы полимера, создание первичных связей полимер—силикат; на второй, высокотемпературной стадии происходит практически полное удаление органической части связующего с созданием нагревостойкой силоксановой структуры. Замена эксплуатационной воздушной среды на бескислородную позволяет устранить окислительные процессы токопроводящей жилы, а предложенный двухстадийный режим предварительной термообработки завершает процессы формирования изоляции с созданием нагревостойкой безорганической структуры.

Поскольку эластичность материала обеспечивается его недоотверженностью, наличием органических радикалов, а высокая нагревостойкость, напротив, только созданием безорганической структуры, то термообработка витковой изоляции возможна лишь в конструкции. Поэтому цель данных исследований — анализ оптимальных режимов термоотверждения систем витковой и корпусной изоляции.

**Образцы и методика исследования.** Исследования проводились на макетах, изготовленных в НИИЭФА им. Д.В. Ефремова, максимально при-

ближенных по конструкции и технологии изготовления к реальным катушкам. Они представляют собой три отрезка обмоточного провода ПОЖ-700, на которые нанесена корпусная изоляция. Изоляция провода состоит из двух слоев стекловолокна в сочетании с органосиликатным связующим ОС-82-05: полиметилфенилсиликсан (ПМФС), мелко диспергированные силикаты, оксиды металлов. Корпусная изоляция выполнена из четырех полутильз на основе слюдопласта марки ИФГ-КАХФ толщиной  $0,3 \pm 0,05$  мм с комплексным связующим — алюмохромфосфат с кремнийорганическим лаком. Полутильзы изготавливались в режиме термопрессования под давлением при температуре 250–270°C в течение двух часов. Промазка между слоями полутильз осуществлялась связующим ОС-82-05.

Кинетика отверждения системы корпусной изоляции изучалась с помощью метода диэлектротометрии: регистрировались полная проводимость ( $G$ ), тангенс угла диэлектрических потерь ( $\tan \delta$ ), емкость и сопротивление на постоянном напряжении в динамическом режиме подъема температуры и в изотермических режимах [3].

Макеты помещались в специально изготовленное электронагревательное устройство, выполненное в виде слюдопластовой трубы с нагревательным элементом. Перепад температур при 600°C не превышал 5°C. Температура в динамическом режиме поднималась со скоростью 5°C/мин от комнатной до предполагаемой температуры отверждения 400–600°C (с интервалами 25°C). Далее устанавливался стационарный изотермический режим до достижения стабильного уровня контролируемых характеристик. Контроль осуществлялся через каждые 10 мин. Измерения производились с помощью прибора Е7-8 на частоте 1000 Гц.

Представленные данные являются результатом статистической обработки измерений пяти образцов.

**Экспериментальные данные и их обсуждение.** Для системы корпусной изоляции в температурных зависимостях полной проводимости (рис. 1) и тангенса угла диэлектрических потерь в области температур от 20 до 200°C наблюдается максимум, связанный с релаксационными потерями; при более высоких температурах доми-

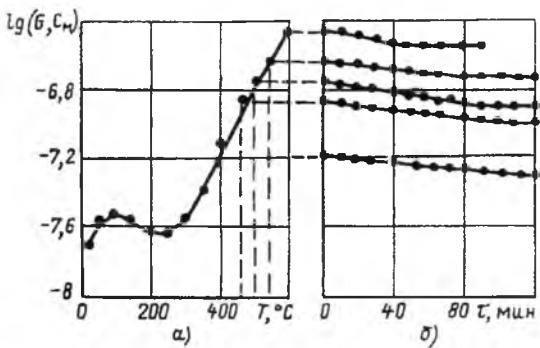


Рис. 1. Изменение полной проводимости корпусной изоляции макета в процессе отверждения в динамическом (а) и изотермическом (б) режимах

нирующими являются процессы проводимости.

Анализ режимов отверждения в диапазоне температур 400–600°C с интервалом 25°C показал, что за время, не превышающее двух часов, все контролируемые характеристики выходят на стабильные значения. Время стабилизации зависит от уровня воздействующей температуры (рис. 2).

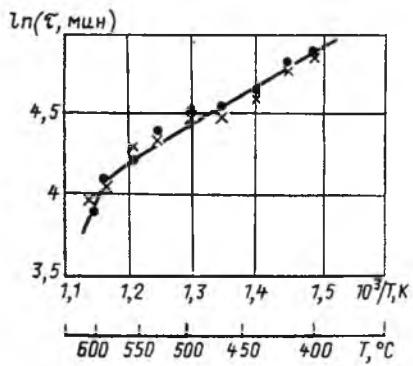


Рис. 2. Зависимость времени стабилизации свойств корпусной изоляции от температуры:  
• — проводимость; × — тангенс угла диэлектрических потерь

Так же, как и для системы витковой изоляции [2], график на рис. 2 имеет два участка, соответствующих двум механизмам образования силоксановой структуры. На участке с меньшим наклоном идут процессы, связанные в основном с термоокислением боковых метильных групп ПМФС, реакции конденсации между полимерными, силикатными и оксидными компонентами за счет гидроксильных групп. При более высоких температурах интенсифицируется разрушение органического обрамления основных цепей полимера, разрыв ограниченного числа силоксановых связей с образованием химической связи твердого остатка с неорганическими компонентами (силикатами, оксидами) [4], что приводит к более крутым наклонам зависимости.

Поскольку выделение газообразных продуктов деструкции ПМФС не должно быть бурным, чтобы не привести к нарушению целостности корпусной изоляции, первая стадия термообработки может

быть выбрана исходя из участка с малым наклоном зависимости, например, 450°C — 2 ч. Это согласуется с низкотемпературной стадией отверждения витковой изоляции.

Аналогично системе витковой изоляции выбранный одноступенчатый режим 450°C — 2 ч позволяет лишь завершить процессы, приводящие к образованию связей между силикатами и полимером с созданием пространственной структуры. Добавление же второй, высокотемпературной стадии позволяет завершить отверждение системы корпусной изоляции и стабилизировать все характеристики (рис. 3).

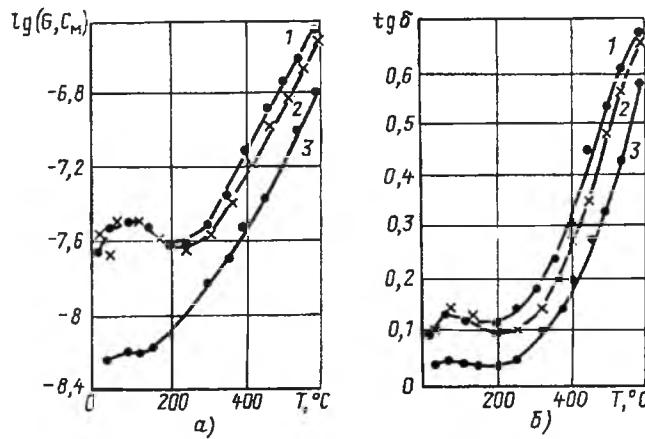


Рис. 3. Влияние режима термообработки на характеристики системы корпусной изоляции:  
1 — образец без термообработки; 2 — термообработка 450°C — 2 ч; 3 — термообработка 450°C — 2 ч, 600°C — 6 ч

Температура 600°C представляет собой верхнюю допустимую границу термовоздействия в связи с интенсификацией процессов окисления жилы из-за разрушения защитной никелевой оболочки [5], а завершение процессов в органосиликатном связующем должно протекать в присутствии кислорода, поскольку лишь в этом случае углерод, окисляясь до углекислого газа, выводится в атмосферу, а не оседает в толще изоляции. Длительность воздействия максимальной температуры — 6 ч, выбрана исходя из данных элементного анализа исследуемой композиции [2], соответствующее ей содержание углерода в системе — 0,5%. Для материалов системы корпусной изоляции эта температура не является критичной, поскольку они могут длительно работать при термовоздействии до 700°C.

Термоотверждение в соответствии с двухстадийным режимом приводит к снижению полной проводимости при комнатной температуре на 1,5 порядка, тангенс угла диэлектрических потерь уменьшается в 2 раза, на 0,5 порядка снижается проводимость на постоянном напряжении и в 2 раза — емкость. Сглаживание максимума в температурных зависимостях полной проводимо-

сти и  $\operatorname{tg}\delta$  в диапазоне температур 20–200°C свидетельствует о создании сшитой силоксановой структуры (рис. 3).

Таким образом, сравнение кинетики отверждения систем витковой и корпусной изоляции показало, что предложенный двухстадийный режим предварительной термообработки системы витковой изоляции не противоречит оптимальному режиму отверждения корпусной изоляции и может быть использован для катушки обмотки возбуждения в целом, что позволит повысить надежность наиболее слабого узла электромагнитных насосов.

## Список литературы

1. О влиянии среды на процессы старения обмоток электромагнитных насосов / Л.К. Бородулина, Н.М. Ваксер, И.В. Витковский и др. // Вопросы атомной науки и техники. 1993. Вып. 26. С. 23–28.
2. О влиянии технологии изготовления на характеристики витковой изоляции жаростойких обмоток / Л.К. Бородулина, Н.М. Ваксер, И.В. Витковский и др. // Электротехника. 1993. № 4. С. 64–68.
3. Marvin L., Bromberg David R. Measurement and Application of dielectric properties // IEEE Electrical Insulation Magazine. May 1986. Vol. 2. № 3.
4. Харитонов Н.П., Островский В.В. Термическая и термоокислительная деструкция полиоргансилоксанов. Л.: Наука, 1982.
5. Особенности термостарения обмоток электромагнитных насосов при высоких температурах в воздушной среде / Л.К. Бородулина, Н.М. Ваксер, И.В. Витковский, А.С. Титова // Электротехника. 1990. № 12. С. 28–31.

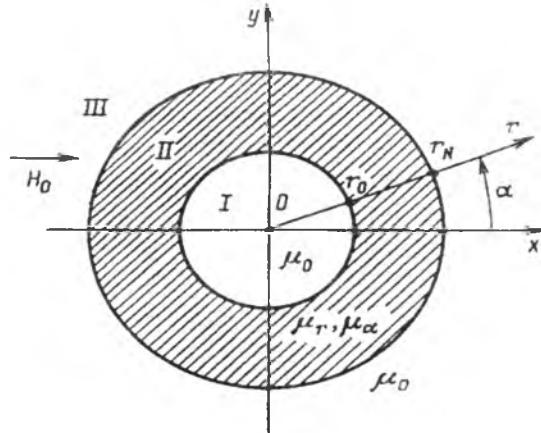
## Анизотропия материалов — резерв повышения эффективности электромагнитных экранов

С.М. АПОЛЛОНСКИЙ, доктор техн. наук, проф.,  
В.Н. ОСТРЕЙКО, канд. техн. наук

В современных приборах, машинах, агрегатах и автоматизированных комплексах наблюдается непрерывное повышение плотности заполнения объемов различными электромагнитными элементами, блоками и токоведущими проводниками. В результате этого усиливается негативное электромагнитное влияние одних частей устройств на другие. Для ослабления такого влияния могут применяться электромагнитные экраны. Естественно, что экраны как дополнительные элементы должны иметь минимально возможные массу и габариты, что достигается при максимальной эффективности экранирования. Однако применяемые в настоящее время экраны, например, двухслойные с эксцентричеситетом [1, 2], с подмагничиванием или магнитным встремлением их материала [3], не обеспечивают такой эффективности.

Подавляющее большинство работ в области электромагнитного экранирования относится к изотропным материалам. Исследования влияния анизотропии материалов на эффективность экранирования носят лишь фрагментарный характер [1]. Вместе с тем, именно анизотропия может обеспечить существенное повышение эффективности электромагнитного экранирования.

Экранирование постоянного однородного магнитного поля круговой цилиндрической анизотропной оболочкой. Примем, что вектор напряженности  $H_0$  однородного потенциального магнитного поля в среде с магнитной проницаемостью  $\mu_0$  направлен вдоль оси  $x$  прямоугольных координат  $x, y, z$ . В это поле внесен полый круговой магнитно-анизотропный цилиндр, продольная ось которого совмещена с координатной осью



Поперечное сечение  $z=0$  круговой цилиндрической оболочки с магнитными проницаемостями  $\mu_r$  и  $\mu_\alpha$ , ограниченной поверхностью с радиусами  $r_0$  и  $r_N > r_0$

(рисунок).

Указанное первичное магнитное поле с напряженностью  $H_0 = \text{const}$  может быть описано в цилиндрических координатах  $r, \alpha, z$  с помощью скалярного потенциала

$$\varphi_0 = f_0(r) \cos \alpha, \quad (1)$$

где  $f_0(r) = -H_0 r$ .

Результирующее магнитное поле, учитывающее влияние цилиндра, можно также описать с помощью скалярного потенциала

$$\varphi_\nu = f_\nu(r) \cos \alpha, \quad \nu = I, II, III, \quad (2)$$

где  $f_\nu(r)$  — искомые функции, причем согласно рисунку значение  $\nu=I$  соответствует подобласти

$r \leq r_0$ , значение  $\nu = \text{II}$  — подобласти  $r_0 \leq r \leq r_N$ , а значение  $\nu = \text{III}$  — подобласти  $r \leq r_N$ .

Потенциал  $\varphi_\nu$  удовлетворяет уравнению Лапласа

$$r^2 \frac{\partial^2 \varphi_\nu}{\partial r^2} + r \frac{\partial \varphi_\nu}{\partial r} + m_\nu^2 \frac{\partial^2 \varphi_\nu}{\partial \alpha^2} = 0, \quad (3)$$

где безразмерная величина

$$m_\nu = \begin{cases} 1, & \nu = \text{I, III} \\ m = \sqrt{\mu_\alpha/\mu_r}, & \nu = \text{II.} \end{cases} \quad (4)$$

Подстановка потенциала (2) в (3) приводит к уравнению Эйлера

$$r^2 f_\nu'(r) + r f_\nu''(r) - m_\nu^2 f_\nu(r) = 0,$$

общее решение которого имеет вид

$$f_\nu(r) = C_\nu \left(\frac{r}{r_N}\right)^{m_\nu} + D_\nu \left(\frac{r}{r_N}\right)^{-m_\nu}, \quad (5)$$

где  $C_\nu$  и  $D_\nu$  — постоянные интегрирования.

В соответствии с выражениями (1), (2) и рисунком функции  $f_\nu(r)$  должны удовлетворять условиям

$$|f_1(0)| < \infty, \quad f_{\text{III}}(\infty) = f_0(\infty);$$

$$f_1(r_0) = f_{\text{II}}(r_0), \quad f_{\text{II}}(r_N) = f_{\text{III}}(r_N);$$

$$\mu_0 f_1'(r_0) = \mu_r f_{\text{II}}'(r_0), \quad \mu_r f_{\text{II}}'(r_N) = \mu_0 f_{\text{III}}'(r_N).$$

Отсюда с учетом (1), (4), (5) находим:

$$\left. \begin{aligned} C_{\text{I}} &= 4C_{\text{III}} G Q \rho^{m-1}, \quad D_{\text{I}} = 0; \\ C_{\text{II}} &= 2C_{\text{III}} G (Q+1), \quad D_{\text{II}} = 2C_{\text{III}} G (Q-1) \rho^{2m}; \\ C_{\text{III}} &= -H_0 r_N, \quad D_{\text{III}} = C_{\text{II}} - C_{\text{III}} + D_{\text{II}}, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где

$$\left. \begin{aligned} \rho &= \frac{r_0}{r_N} < 1, \quad Q = m \frac{\mu_r}{\mu_0}; \\ G &= [(Q+1)^2 - (Q-1)^2 \rho^{2m}]^{-1}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Согласно выражениям (2), (5), (6) в полости цилиндра ( $\nu = 1$ ) напряженность поля постоянна

$$H_{\text{I}} = \sqrt{\left(\frac{\partial \varphi_{\text{I}}}{\partial r}\right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi_{\text{I}}}{\partial \alpha}\right)^2} = \frac{|C_{\text{I}}|}{r_N} = \text{const.}$$

Следовательно, искомый коэффициент экранирования

$$K = \frac{H_{\text{I}}}{H_0} = 4GQ\rho^{m-1} < 1, \quad (8)$$

где соответствующие величины определяются выражениями (4) и (7), в которых в частном случае изотропного цилиндра следует принять  $\mu_r =$

$= \mu_\alpha = \mu$ , тогда

$$K_0 = 4G_0\mu_* < 1; \\ \mu_* = \frac{\mu}{\mu_0}, \quad G_0 = [(\mu_* + 1)^2 - (\mu_* - 1)^2 \rho^2]^{-1}. \quad (9)$$

Согласно выражению (8) эффективность экранирования тем выше, чем меньше  $K$ , а значит и  $K_0$ . При  $\rho \rightarrow 0$

$$K \rightarrow 0, \quad K_0 \rightarrow 4\mu_* (1 + \mu_*)^{-2} > 0,$$

что свидетельствует о более высокой эффективности анизотропного экрана ( $K < K_0$ ). Это подтверждают и расчеты, результаты которых приведены в табл. 1—3, где величина  $K_0/K$  показывает, во сколько раз повышается эффективность экранирования при замене изотропной оболочки анизотропной, характеризуемой относительными проницаемостями  $\mu_\alpha/\mu$  и  $\mu_r/\mu_0$  (в отдельно выделенной строке, соответствующей  $\mu_\alpha/\mu_r = 1$ , даны абсолютные значения  $K_0$ ).

Таблица 1

Значения  $K_0/K$ , соответствующие выражениям (8) и (9) при  $\rho = 0,9$

$\mu_\alpha/\mu_r$	$\mu_r/\mu_0$						
	10	50	100	200	500	1000	2000
1	0,722*	0,305*	0,177*	0,096*	0,041*	0,021*	0,010
2	1,35	1,73	1,84	1,92	1,97	0,98	1,99
3	1,70	2,46	2,69	2,84	2,94	2,97	2,99
4	2,05	3,19	3,54	3,76	3,91	3,97	3,99
5	2,40	3,93	4,39	4,69	4,89	4,96	5,00
6	2,75	4,67	5,25	5,62	5,87	5,96	6,01
7	3,11	5,41	6,11	6,55	6,86	6,96	7,02
8	3,46	6,15	6,97	7,49	7,84	7,97	8,04
9	3,82	6,90	7,84	8,43	8,84	8,98	9,06
10	4,18	7,65	8,71	9,37	9,83	10,0	10,1
20	7,83	15,3	17,6	19,0	20,0	20,3	20,5
30	11,6	23,2	26,8	29,0	30,5	31,1	31,3
40	15,5	31,4	36,3	39,3	41,4	42,2	42,6
50	19,6	39,9	46,1	50,0	52,7	53,7	54,2

\* Значения  $K_0$ .

Таблица 2

Значения  $K_0/K$ , соответствующие выражениям (8) и (9) при  $\rho = 0,99$

$\mu_\alpha/\mu_r$	$\mu_r/\mu_0$						
	10	50	100	200	500	1000	2000
1	0,961*	0,807*	0,672*	0,504*	0,288*	0,168*	0,091*
2	1,05	1,20	1,33	1,50	1,72	1,83	1,91
3	1,10	1,40	1,67	2,00	2,43	2,67	2,82
4	1,14	1,60	2,00	2,50	3,15	3,50	3,73
5	1,19	1,80	2,34	3,01	3,86	4,34	4,64
6	1,24	2,00	2,67	3,51	4,58	5,17	5,55
7	1,29	2,21	3,01	4,01	5,29	6,00	6,46
8	1,34	2,41	3,34	4,51	6,01	6,84	7,37
9	1,38	2,61	3,68	5,01	6,72	7,67	8,28
10	1,43	2,81	4,01	5,51	7,44	8,51	9,19
20	1,91	4,82	7,36	10,5	14,6	16,9	18,3
30	2,39	6,83	10,7	15,5	21,8	25,2	27,4
40	2,87	8,84	14,1	20,6	28,9	33,5	36,5
50	3,35	10,8	17,4	25,6	36,1	41,9	45,6

\* Значения  $K_0$ .

Таблица 3

Значения  $K_0/K$ , соответствующие выражениям (8) и (9) при  $\rho = 0,999$

$\mu_a/\mu_r$	$\mu_r/\mu_0$						
	10	50	100	200	500	1000	2000
1	0,996	0,977	0,953	0,910	0,801	0,667	0,500
2	1,00	1,02	1,05	1,09	1,20	1,33	1,50
3	1,01	1,05	1,10	1,18	1,40	1,67	2,00
4	1,01	1,07	1,14	1,27	1,60	2,00	2,50
5	1,02	1,10	1,19	1,36	1,80	2,33	3,00
6	1,02	1,12	1,24	1,45	2,00	2,67	3,50
7	1,03	1,15	1,29	1,55	2,20	3,00	4,00
8	1,03	1,17	1,33	1,64	2,40	3,33	4,50
9	1,04	1,20	1,38	1,73	2,60	3,67	5,00
10	1,04	1,22	1,43	1,82	2,80	4,00	5,50
20	1,09	1,46	1,91	2,73	4,80	7,34	10,05
30	1,14	1,71	2,38	3,64	6,80	10,7	15,5
40	1,19	1,95	2,86	4,55	8,80	14,0	20,5
50	1,24	2,20	3,33	5,46	10,8	17,3	25,5

\* Значения  $K_0$ .

Так, согласно табл. 1 у изотропного цилиндра с магнитной проницаемостью  $\mu_a=\mu_r=500\mu_0$  коэффициент экранирования  $K_0=0,041$ . Если же данный цилиндр выполнить анизотропным, на-

пример, с коэффициентами  $\mu_a/\mu_r=10$ , то при той же магнитной проницаемости  $\mu_r=500\mu_0$  эффективность экранирования возрастет в  $K_0/K=9,83$  раза.

## Выводы

Анизотропия материала электромагнитных экранов может радикально повышать их эффективность. Однако для достижения этой цели необходимы всесторонние теоретические и экспериментальные исследования по установлению закономерностей влияния анизотропии на экранирующие свойства оболочек разной формы и в различных полях.

## Список литературы

1. Аполлонский С.М. Справочник по расчету электромагнитных экранов. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1988.
2. А.с. 1396161 СССР. Система экранирующих оболочек / С.М. Аполлонский // Открытия. Изобретения. 1988. № 18.
3. Kelha V.O., Peltonen R., Rantala B. The effect of Shaking on magnetic Shields // IEEE Transactions. 1980. Vol MAG-16. № 4. P. 575-578.

## Уважаемые читатели!

В редакции нашего журнала (метро «Краснопресненская» или «Баррикадная», ул. Зоологическая, 11, комн. 212, телефон 254-11-52) можно подписаться на журнал «Электротехника» на I полугодие 1995 г.

У нас можно купить и отдельные номера журнала за прошлые и нынешний годы, справившись о наличии нужного вам номера по телефону 254-11-52.

К сожалению, выслать журнал по почте наложенным платежом редакция не имеет возможности.

# 50 лет ВНИИЭ

В 1944 г. в соответствии с Постановлением Государственного Комитета Обороны в системе Народного комиссариата электростанций СССР была создана Центральная научно-исследовательская электротехническая лаборатория (ЦНИЭЛ).

Основной задачей ЦНИЭЛ в первые годы ее существования было решение научных вопросов восстановления и дальнейшего развития электрической части разрушенных войной объектов электроэнергетики, повышение культуры и уровня эксплуатации энергосистем, электрических станций и сетей.

В 1958 г. ЦНИЭЛ была реорганизована во Всесоюзный научно-исследовательский институт электроэнергетики, в настоящее время АО ВНИИЭ.

Характерной чертой деятельности института является тесная связь с энергосистемами, другими институтами, проектными и наладочными организациями, заводами-изготовителями электротехнического оборудования; практическая направленность проводимых им исследований и разработок, а также доведение их до внедрения, оказание помощи персоналу энергосистем по их освоению.

За 50 лет своей деятельности ВНИИЭ внес значительный вклад в развитие и повышение научно-технического уровня отечественной электроэнергетики.

Институт, в частности, был в числе ведущих организаций, решавших научные проблемы создания и освоения дальних электропередач переменного тока напряжением 400—500, 750, 1150 кВ, а также генераторов и другого электрооборудования крупнейших тепловых и гидравлических электростанций, в том числе Красноярской ГЭС, Саяно-Шушенской ГЭС, Костромской ГРЭС, Рязанской ГРЭС и др.

Важнейшим направлением деятельности института было и является исследование рабочих характеристик основного электрооборудования электростанций и электрических сетей, прежде всего, генераторов, электродвигателей, трансформаторов и др., и разработка мероприятий по совершенствованию их эксплуатации, профилактических испытаний, технической диагностики их состояния.

Существенен вклад ВНИИЭ в анализ нормальных и аномальных режимов электрооборудования, в частности электрических машин, а также электрических сетей и энергосистем в целом, в разработку на этой основе мероприятий по повышению надежности, устойчивости и экономичности их работы.

ВНИИЭ был инициатором и активным участником разработок по оптимизации режимов работы энергообъединений, энергосистем и электрических сетей, по применению в электроэнергетике вычислительной техники и созданию автоматизированных систем диспетчерского управления (АСДУ) энергообъектов различного уровня, а также АСУ ТП электростанций и сетей.

В последние десятилетия институт является инициатором и ведущей организацией по разработкам управляемых машинно-вентильных систем, в частности, регулируемого электропривода, генераторных комплексов как для мощных ТЭС и ГЭС, так и для нетрадиционных источников электроэнергии — ветроэлектрических станций, малых ГЭС и др.

Деятельность ВНИИЭ давно вышла за рамки России и бывшего СССР. Велись и ведутся совместные исследования и разработки с рядом стран ближнего и дальнего зарубежья.

Институт около 40 лет активно участвует в работе ряда международных электротехнических и энергетических организаций. В их числе прежде всего следует указать Международную конференцию по большим электрическим системам высокого напряжения (СИГРЭ) и Международную электротехническую Комиссию (МЭК).



НАУЧНО - ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИРМА  
**"MEW & NOSBI Ltd"**  
 ("Мью и Носби Лтд")  
 Тел. (095) 281-87-17

## ВНИМАНИЮ ЭНЕРГЕТИКОВ!

У Вас часто «горят» электродвигатели?  
 И традиционные средства защиты не помогают? Вы не знаете, что делать???

Доверьтесь нам и мы возьмем на себя Ваши заботы! А вы станете обладателями уникальных устройств защиты трехфазной нагрузки (УЗТН) например, асинхронных или синхронных электродвигателей переменного тока с обмотками напряжением 380 В, соединенных в «звезду». Являясь быстродействующей высокочувствительной электронной системой, УЗТН анализирует напряжение на общей точке обмоток и распознает процесс несимметричной перегрузки в начальной стадии, мгновенно отключая нагрузку от сети при следующих случаях:

- Перекос фаз силовой питающей сети.
- Пропадание напряжения на одной или двух фазах.
- Ослабление или нарушение электрических контактов в фазных цепях (в клеммной коробке машины, автоматическом выключателе и т. д.).
- Окисление или коррозия клеммных соединений.
- Начальная стадия межвиткового замыкания.
- Увеличение тока утечки из-за нарушения изоляции обмоток.
- Механическая и электрическая перегрузка электродвигателя от однопроводного датчика.

При остановке двигателя на период технологических пауз УЗТН продолжает «дежурство» на другом фронте, защищает от пробоя изоляции в условиях повышенной влажности, осуществляя при этом:

- контроль сопротивления изоляции между обмотками и корпусом электродвигателя;
- принудительную сушку изоляции не энергоемким способом (3,6 мВт).

Селективная световая индикация позволит Вам определить характер неисправности и контролировать состояние изоляции обмоток защищаемой нагрузки во время их «сушки».

Возможности УЗТН выше его цены, так как сгоревшие электродвигатели обойдутся Вам дороже!

### РЕГУЛЯТОР ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ «ПУС»

Регулятор предназначен для решения основных задач, стоящих перед электроприводом общепромышленного назначения:

- разгон и торможение;
- плавное управление частотой вращения;
- защита электродвигателей от токов КЗ и несимметричной перегрузки;
- защита самого регулятора от перегрева силовых ключей и других нештатных ситуаций.

В регуляторе использован нетрадиционный способ управления вращением магнитного поля в воздушном зазоре электродвигателя путем организации дополнительной степени свободы в системе преобразования электрической энергии в механическую («статор-ротор»). Это приводит к возможности дополнительного псевдовращения статора электродвигателя в пространстве, т. е. источника вращающегося магнитного поля.

Технические характеристики регулятора «ПУС»

Установочная мощность, кВт	5 и 15
Диапазон изменения частоты вращения вала электродвигателя вниз от синхронной	1:10000
Вращающий момент (во всем диапазоне частот вращения, вплоть до ползучей скорости)	Постоянный:

Энергетические характеристики

КПД преобразователя	0,93-0,98
Уменьшение электрических потерь в двигателе, %	на 20-30
Удельная масса преобразователя, кг/кВт	2
Удельный объем преобразователя, дм <sup>3</sup> /кВт	1

В отличие от распространенного частотного способа регулирования предлагаемый способ позволяет получить ряд преимуществ:

- постоянный вращающий момент и при скоростях ниже частоты скольжения электродвигателя;
- схемная простота реализации, увеличение надежности преобразователя и улучшение удельных массогабаритных показателей;
- увеличение КПД электропривода из-за снижения потерь в двигателе и в преобразователе;
- низкая цена.

Обращаться по адресу: 103055, Москва, а/я 84. Тел. 281-87-17.

**Регулировочные характеристики электропривода колебательного движения с машиной двойного питания.** А. В. Аристов, В. В. Аристов.— Электротехника, 1994, № 11, с. 28.

Предложена методика определения регулировочных характеристик колебательного электропривода с машиной двойного питания при фазовом способе возбуждения колебательного режима работы. На основании анализа составляющих колебательного электромагнитного момента произведена оценка способов регулирования, определены условия обеспечения резонансного режима работы привода и автономности выходных параметров при регулировании частоты колебаний.

Ил. 4. Библ. 3 назв.

**Микропроцессорная система управления полноприводной электрической инвалидной коляской.** Н. Ф. Васильев, А. Л. Логинов, А. В. Батаев.— Электротехника, 1994, № 11, с. 32.

Рассматривается микропроцессорная система управления, разрабатываемая в Санкт-Петербургском Государственном Техническом Университете. Данна функциональная схема системы управления, описан принцип ее работы.

Ил. 3.

**Анализ материалоемкости низковольтных электрических аппаратов для электрораспределения и электропривода.** Д. М. Зекцер.— Электротехника, 1994, № 11, с. 37.

Впервые рассматриваются компоненты материалоемкости и анализируется, за счет каких материалов удается снизить главный показатель конкурентоспособности — массу изделия.

Ил. 5. Табл. 3. Библ. 4 назв.

**Токи асинхронного двигателя при статическом эксцентрикиситете.** А. Н. Новожилов.— Электротехника, 1994, № 11, с. 45.

Рассмотрен механизм появления токов в обмотках ротора и статора от статического эксцентрикиситета, разработана методика их расчета. Приведены результаты расчета и эксперименты тока в фазе асинхронного двигателя АО-41-6 в различных режимах работы.

Ил. 3. Табл. 1. Библ. 3 назв.

**К оптимизации технологических режимов изготовления жаростойких обмоток.** Т. Н. Муравьева.— Электротехника, № 11, 1994, с. 49.

Изучена кинетика отверждения системы корпусной изоляции катушки обмотки возбуждения электромагнитных насосов в режимах, обеспечивающих стабилизацию эксплуатационных характеристик витковой изоляции. Представлена экспериментальная зависимость времени стабилизации свойств корпусной изоляции от температуры, на основе которой возможна оптимизация процесса термообработки системы корпусной изоляции катушки по параметрам длительности и температуры. Установлено соответствие оптимального режима термоотверждения системы витковой изоляции системе корпусной изоляции.

Ил. 3. Библ. 5 назв.

**Анизотропия материалов — резерв повышения эффективности электромагнитных экранов.** С. М. Апоплонский, В. Н. Острейко.— Электротехника, 1994, № 11, с. 51.

На примере анализа коэффициента магнитного экранирования круговой анизотропной цилиндрической оболочки показана целесообразность проведения широких теоретических и экспериментальных исследований различных электромагнитных экранов из анизотропных материалов. Такие исследования могут стимулировать разработку методов получения материалов с требуемой степенью анизотропии и тем самым обеспечить значительное повышение эффективности экранов.

Ил. 1. Табл. 3. Библ. 3 назв.

Научный редактор Н. С. Разумовская  
Литературный редактор А. М. Мескина

Сдано в набор 25.10.94. Подписано в печать 08.11.94. Формат 60×88<sup>1/8</sup>  
Бумага офсетная № 2. Печать офсетная. Печ. л. 7.  
Тираж 970 экз. Заказ 1839

Макет выполнен АО «Знак», 115547, Москва, Михневский пр-д, 4

Типография № 9 Комитета РФ по печати

Москва, 109033, Волочаевская ул., 40

Вологодская областная универсальная научная библиотека

[www.booksite.ru](http://www.booksite.ru)

