

ISSN 0013-5860

Э *ЭЛЕКТРОТЕХНИКА* **Т** **12 2007**

С НОВЫМ ГОДОМ!



МЕДАЛЬ
"ЗА ЗАСЛУГИ В
ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ"



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

УЧРЕДИТЕЛИ

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

СОВЕТ УЧРЕДИТЕЛЕЙ

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор **КОЧЕТКОВ В.Д.**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Сдано в набор 01.10.2007. Подписано в печать 15.11.2007 Формат 60х88 1/8

Бумага офсетная № 1. Печать офсетная. Печ. л. 8. Заказ 146

Цена свободная. Тираж 1000 экз. Зарегистрирован Комитетом РФ по печати, регистрационный №01330.

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

СОДЕРЖАНИЕ

АППАРАТЫ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Клецель М.Я., Майшев П.Н. Особенности построения на герконах дифференциально-фазных защит трансформаторов.....	2
Афанасьев А.И. Импульсные разрядные характеристики изоляционных систем, характерных для нелинейных ограничителей перенапряжений	8
Минуллин Р.Г., Фардиев И.Ш., Петрушенко Ю.Я., Губаев Д.Ф., Мезиков А.К., Коровин А.В. Локационный способ обнаружения появления гололеда на проводах линии электропередачи	17
Михеев Г.М., Фёдоров Ю.А., Шевцов В.М., Баталыгин С.Н. Ускоренная диагностика высоковольтных выключателей.....	23

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

Цгоев Р.С. Сравнение режимных возможностей ветроэнергетических установок.....	32
---	----

ЭЛЕКТРОПРИВОД

Федяева Г.А. Снижение ударных динамических нагрузок асинхронного тягового привода перспективного тепловоза при аварийных режимах.....	38
Маркевич Н.В., Кияткин Р.П., Максимов О.П. Электродуговая эрозия металлических пластин дугогасительных устройств автоматических выключателей при предельных токах коммутации.....	43

ИССЛЕДОВАНИЯ И РАСЧЁТЫ

Токарев С.Б. К вопросу расчёта обмотки возбуждения машины постоянного тока	47
--	----

НАУЧНЫЕ ГИПОТЕЗЫ

Копылов И.П. Куда идёт электромеханика	50
--	----

ХРОНИКА

Козярук А.Е. Научно-техническая конференция по автоматизированному электроприводу АЭП-2007	55
ВНИИ кабельной промышленности – 60 лет.....	58

НАШИ ЮБИЛЯРЫ

Виктор Еромолаевич Католиков	64
Гелий Михайлович Иванов	65

CONTENS

DEVICES OF HIGH POWER

Klezel M.Y., Mayshev P.N. Features of constructing of differential - phase protections of transformers on hermetic contacts.....	2
Afanasyev A.I. Flashover characteristics of the insulating systems, typical for metal oxide surge arresters.....	8
Minullin R.G., Fardlev I.Sh., Petrushenko Yu. Ya., Gubaev D.F., Mezikov A.K., Korovin A.V. Radar detection of glaze ice on transmission line wires.....	17
Mikheev G.M., Fyodorov Yu.A., Shevtsov V.M., Batalygin S.N. Accelerated monitoring of circuit breaker	23

THE SAVINGS OF ENERGY

Tsgoev R.S. The comparison of operating capabilities of wind-driven powerplants	32
---	----

ELECTRIC DRIVE

Fedyaeva G.A. Lowering of stress dynamic loaders in diesel locomotive asynchrony traction drive at emergency modes	38
Markevich N.V., Kiyatkin R.P., Maksimov O.P. The investigations of arc erosion of deion plates of an arc control device of automatic switches at extreme commutation currents.....	43

RESEARCH AND DEVELOPMENT

Tokarev S.B. To a question of calculation exciting winding of the direct current machines	47
---	----

SCIENTIFIC HYPOTHESIS

Kopylov I.P. Electromechanics trends of development	50
---	----

EVENTS

Kozyaruk A.E. Research conference on automated electric drive AED-2007	55
--	----

VNII cable industry - 60 years	58
--------------------------------------	----

OUR YUBILYARY

Viktor Ermolaevich Katolicov	64
Gelii Mihaylovich Ivanov	65

Особенности построения на герконах дифференциально-фазных защит трансформаторов

КЛЕЦЕЛЬ М.Я., МАЙШЕВ П.Н.

Показано, что герконы, закреплённые вблизи гибких токопроводов силовых трансформаторов мощностью более 6,3 (40) МВ·А с ВН 10 (35) кВ, могут быть основой фазосравнивающих схем с заданным граничным углом в устройствах их защиты от КЗ. Дана оценка порога срабатывания этих схем и погрешностей, вызванных разным собственным временем срабатывания и неточностями установки герконов, а также регулированием напряжения трансформатора. Изложена методика отстройки от влияния соседних фаз и электроустановок.

В релейной защите (РЗ) электроэнергетических систем одним из путей экономии ресурсов (меди и стали) может быть создание устройств, не нуждающихся в трансформаторах тока (ТТ). При этом возможно использование, например, датчиков Холла или другой элементной базы. Каждое направление решения имеет свои плюсы и минусы, и только после разработки РЗ без ТТ на различных элементах и опыта их эксплуатации можно будет отдать предпочтение тому или иному варианту, который в немалой степени будет зависеть от параметров электроустановки. Для построения РЗ электроустановок напряжением 3–110 кВ нами выбраны магнитоуправляемые контакты (МК) – герконы, поскольку они в сравнении с другими магниточувствительными преобразователями обладают важными для РЗ преимуществами: не требуют усилителей для передачи сигнала, сама передача осуществляется по цепям управления, а не по измерительным (что в РЗ считается более надёжным), не нуждаются в устройствах компенсации влияния температуры и могут одновременно выполнять функции аналого-дискретного преобразователя, измерительного преобразователя и реагирующего элемента. К тому же герконы нашли весьма широкое распространение в технике [1]. Уже раз-

Is rotined, that the hermetic contacts fastened near to flexible wires of current of power transformers by capacity more 6,3 (40) МВ·А with a higher voltage 10 (35) kV, can be a basis for the phase comparison schemes with define boundary angle in devices their protection against short circuits. The estimation of a response level of this schema and inaccuracies aroused by different own work time, deficient of setting of hermetic contacts and regulation of a voltage of the transformer is given. The method of application exceptions of influencing of adjacent phases and electrical installations explained.

работаны принципы построения некоторых РЗ [2, 3] и конкретные устройства, например [4, 5]. Однако построение защит на МК без ТТ для силовых трансформаторов на основе сравнения фаз токов ещё не рассматривалось. В данной работе сделана попытка восполнить этот пробел.

Особенности использования МК в РЗ. Симметричные МК устанавливаются на безопасном по [6] расстоянии h_{\min} от токоведущих шин электроустановки и на более высоких, чем 110 кВ, напряжениях (а иногда и на 110 кВ) становятся нечувствительными из-за больших h_{\min} и сравнительно малых токов КЗ. Чувствительность МК определяется значением напряжённости $H_{\text{ср}}$ его срабатывания. $H_{\text{ср}}$ находят по известной формуле для расчёта индукции внутри соленоида, учитывающей размеры обмотки, предварительно замерив переменный ток в стандартной катушке, при котором срабатывает (замыкает нормально разомкнутые контакты) МК, помещённый в её центр так, чтобы их оси совпадали. Зная $H_{\text{ср}}$ геркона можно найти ток в шине, при котором он срабатывает, если использовать закон Био-Савара–Лапласа для определения напряжённости поля, созданного током шины в воздухе в точке, где будет расположен рабочий зазор МК, при на-

правлении вектора индукции вдоль предполагаемого размещения продольной оси МК. Однако и этот закон и упомянутая формула соответствуют отсутствию геркона в рассматриваемых точках, а поле от токоведущих шин, принимаемых за бесконечно тонкие длинные прямолинейные проводники, не идентично полю катушки. Поэтому H_{cp} и ток в шинах определяются с погрешностями, для уменьшения которых до вполне приемлемых в РЗ (5–6%) длина баллона МК, как показали эксперименты [2, 7], должна быть минимум в 10 раз меньше h_{min} .

Контактные сердечники (КС) герконов всё время колеблются под действием магнитного поля (МП) при нормальной работе защищаемой электроустановки (хотя и без замыкания электрической цепи), что может вызвать усталостные явления (соответственно и изменение чувствительности) и снижает виброустойчивость устройств. Чтобы исключить последствия колебания КС в течение, например, 20 лет непрерывной работы МК до его замены, он должен иметь (считая для гарантии, что срабатывает каждую полуволну переменного тока, т.е. за год $3,2 \cdot 10^9$) ресурс срабатывания $P_{cp} = 6,4 \cdot 10^{10}$. Эта цифра не выходит за пределы (10^{12} [8]) ресурса срабатывания некоторых ртутных МК. Если менять МК каждые два года, то, как показали наши эксперименты [7], можно использовать обычные МК с $P_{cp} = 10^6$. Если использовать КЭМ-1 с $P_{cp} = 10^8$, то можно не менять его 4 года (время наблюдения, за которое их параметры под воздействием управляющего МП с напряжённостью $H_y = 0,85 \cdot H_{cp}$ практически не изменяются).

Время движения КС $t_{дв}$ и дребезг их при срабатывании для токовых защит значения не имеют [7]. Но при построении защит на сравнении фаз токов $t_{дв}$ должно учитываться, так как разница во времени срабатывания (время от первого замыкания КС до первого отскока) двух герконов, которые в идеале должны одновременно приходить в действие при КЗ (подвергаясь воздействию магнитного потока одинаковой кратности по отношению к номинальному) и фиксировать начало формирования сравниваемых сигналов, является погрешностью, определяется $t_{дв}$ и достигает 1 мс (18°) для однотипных МК и 4 мс (72°) для разнотипных [7]. Влияние дребезга исключается с по-

мощью элемента "ПАМЯТЬ", фиксирующего первое замыкание до отскока.

Расположение МК. Герконы 1–3 и 4–6 устанавливаются (рис. 1) в магнитном поле фаз защищаемого трансформатора (Тр), соответственно, со стороны высшего и низшего напряжения (ВН и НН) в вертикальной плоскости, проходящей через расположенные горизонтально проводники фаз и центры тяжести МК. Контакты герконов 1 и 4, 2 и 5, 3 и 6 подключаются к фазосравнивающим блокам (на рис. 1 не показаны), которые могут быть выполнены на любом принципе, определяющем совпадение или несовпадение фаз. Герконы 1 и 4 выявляют КЗ между фазами А и В – $K_{AB}^{(2)}$, герконы 2 и 5 – фазами В и С – $K_{BC}^{(2)}$, герконы 3 и 6 – фазами С и А – $K_{CA}^{(2)}$, и все – трёхфазные КЗ – $K^{(3)}$.

Магнитная индукция в точке "0", совпадающей с центром тяжести МК, обусловлена токами трёх фаз (рис. 1) и имеет следующую составляющую вдоль продольной оси МК [2]:

$$B_{пр} = \mu_0(g_A I_A + g_B I_B + g_C I_C)/2\pi; \quad (1)$$

$$g_A = \frac{h \cos \gamma + x \sin \gamma}{h^2 + x^2}; \quad g_B = \frac{h \cos \gamma - (d-x) \sin \gamma}{h^2 + (d-x)^2};$$

$$g_C = \frac{h \cos \gamma - (2d-x) \sin \gamma}{h^2 + (2d-x)^2}, \quad (2)$$

где g_A, g_B, g_C – коэффициенты, полученные с помощью элементарной геометрии из закона Био-Савара–Лапласа при положительных значениях x , когда x справа от вертикали NN' (рис. 1); h и x – расстояния между проводником и МК в вертикальной и горизонтальной плоскостях, d – расстояние между проводниками соседних фаз; γ – угол между продольной осью МК и горизонтальной плоскостью.

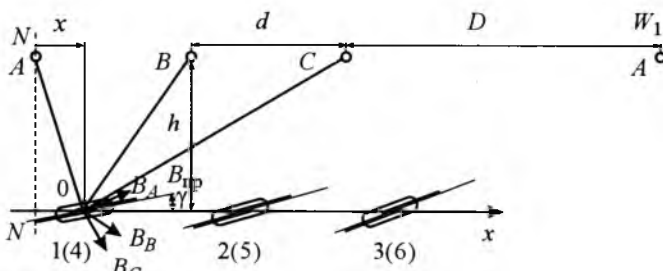


Рис. 1. Расположение геркона под фазами электроустановки

При отрицательных x в (2) у g_A меняется знак в числителе, у g_B и g_C – знак перед x .

На каком бы принципе не выполнялись фазосравнивающие схемы с помощью МК, вывод о совпадении или несовпадении фаз зависит от начала отсчёта, которое фиксируется по первому замыканию КС геркона и определяется воздействием на МК суммарным МП и $H_{ср}$. При этом информативным для герконов 1, 4 (2, 5 и 3, 6) является лишь МП, создаваемое током фазы A (B и C), а МП от токов других фаз и электроустановок являются помехами.

Отстройка от помех, созданных токами фаз защищаемого трансформатора. Осуществляется выбором координат установки МК. Наибольшее влияние на геркон 1(4) оказывает внешнее $K_{BC}^{(2)}$, на герконы 2(5) и 3(6) – $K_{AC}^{(2)}$ и $K_{AB}^{(2)}$, соответственно. Исключить влияние, например, на геркон 1(4) можно, если в (1)

$$(g_B I_B + g_C I_C) = 0. \quad (3)$$

Учитывая, что при КЗ между фазами B и C ток $I_B = -I_C$, из (3) получаем:

$$g_B = g_C. \quad (4)$$

Условие (4) позволяет исключить влияние на геркон 1(4) токов фаз B и C и при нагрузке, и при трёхфазных КЗ. Чтобы в этом убедиться, достаточно подставить (4) в (1).

Отстроенный от помех геркон 1(4) должен иметь такую чувствительность, чтобы срабатывать при $K_{AB}^{(2)}$, т.е.

$$H_{1(4)} = H_{ВН(НН)}^{AB} = B_{пр}^{AB} / \mu_0 = I_{ВН(НН)}^{AB} (g_A - g_B) / 2\pi, \quad (5)$$

где $H_{1(4)}$ – напряжённость срабатывания геркона 1(4) в испытательной катушке (находится экспериментально); $H_{ВН(НН)}^{AB}$ – напряжённость МП в точке "0" геркона 1(4), создана током $I_{ВН(НН)}^{AB}$ фаз A и B при КЗ и направлена вдоль его продольной оси.

Аналогичным образом получаются формулы, подобные (5), и для герконов 2(5) и 3(6).

При определении места установки МК 1(4) необходимо совместно решить уравнения (4) и (5) относительно x и γ . Из-за сложности они решаются графическим путём. Используя (2), из (4) выражаем угол γ через x , d и h (d и h

берутся из [6]). Меняя x от $-d/2$ до $+d/2$, строим зависимости $\gamma_1 = f(x)$ и $\gamma_4 = f(x)$. По x и соответствующим им углам γ рассчитываем значения g_A и g_B и подставляем в (5). По (5) строим зависимости $H_{ВН(НН)} = f(x)$ для сторон ВН и НН трансформатора отдельно. Для этого из (5) определяются координаты установки МК, при которых ток, протекающий по фазам Тр и создающий эту напряжённость, минимален. Согласно [6], быстродействующие защиты (каковой является и рассматриваемая) устанавливаются на Тр мощностью $S \geq 6,3$ МВ·А. Номинальный ток I_n трансформатора 6,3 МВ·А, например 10/6,3 кВ, со стороны ВН составляет 364 А, а минимальный ток $I_{ВН}^{AB}$, найденный из (5) при $H_1 = 200$ А/м, составляет 298 А при $x = d/2$ и $\gamma = 92,4^\circ$. Таким образом, МК 1 будет срабатывать при токе $0,82I_n$. Но чтобы МК 1 не срабатывал каждую полуволну переменного тока (он имеет ограниченное количество коммутаций), необходимо иметь $I_{ср} > I_n$. К тому же, для быстродействующих защит Тр с $S \leq 63$ МВ·А считается приемлемым, если $I_{ср} = (1,1 \div 1,5)I_n$ [8]. Поэтому принимается $I_{ср} = 1,25I_n$, и чувствительность МК в защитах Тр с $S > 6,3$ МВ·А при том же ВН и подавно обеспечивается.

Расчёт места установки герконов, например МК 1 и МК 4, для Тр 16 МВ·А 10/6,3 кВ: строятся (рис.2) зависимости $\gamma_1 = f(x)$, $\gamma_4 = f(x)$,

$H_{ВН}^{AB} = f(x)$ и $H_{НН}^{AB} = f(x)$; по оси H отклады-

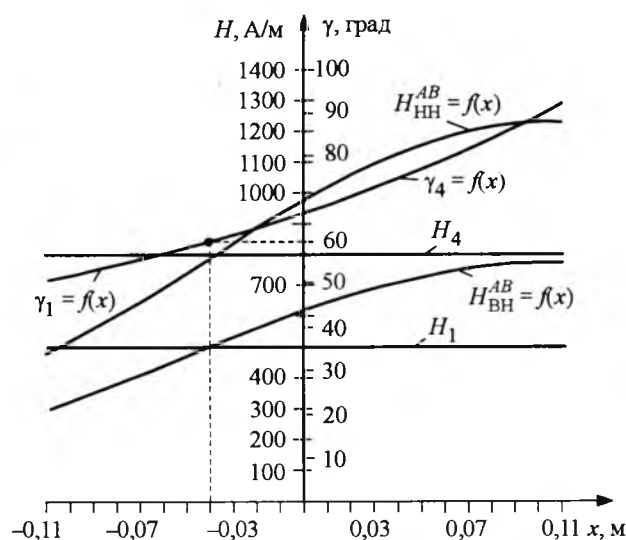


Рис.2. Зависимости $\gamma_1 = f(x)$, $\gamma_4 = f(x)$, $H_{ВН}^{AB} = f(x)$ и $H_{НН}^{AB} = f(x)$ для герконов 1 и 4 трансформатора 16 МВ·А, 10/6,3 кВ

ваются значения H_1 и H_4 ; на их пересечении с зависимостями $H_{BH}^{AB} = f(x)$ и $H_{HH}^{AB} = f(x)$ находится x . Для герконов 1 и 4 $x = -0,04$ м, а угол $\gamma = 60^\circ$. Для герконов 2 и 5, 3 и 6 аналогичным путём получено $x = 0$ м и $\gamma = 0^\circ$, $x = 0,04$ м и $\gamma = -60^\circ$.

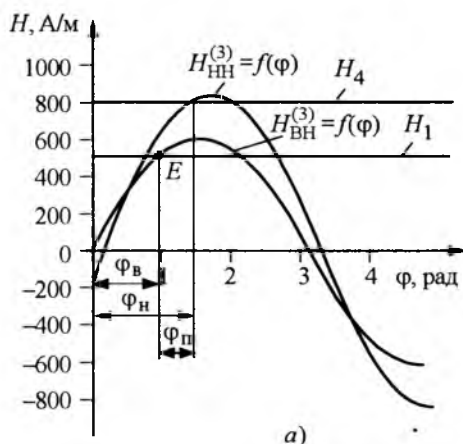
Учёт погрешностей установки МК. Они возникают из-за неточности крепления и настройки. При $h = 0,2$ м и $d = 0,22$ м (безопасные расстояния на 10 кВ) принимаем $\Delta h = \Delta x = \pm 5$ мм, $\Delta \gamma = \pm 5^\circ$. Для наихудших случаев, которые определяются с помощью ЭВМ путём перебора всех возможных вариантов сочетаний погрешностей, находятся углы φ_B и φ_H , соответствующие моменту срабатывания герконов 1 и 4 (рис.3). Так, φ_B отсчитывается от начала координат до точки E пересечения прямой H_1 с суммарной напряжённостью $H_{BH}^{(3)}$ магнитного поля при $K^{(3)}$, созданного токами всех трёх фаз, с учётом погрешностей, когда ток $I_{K3}^{(3)} = 1,25 I_H$. Угол φ_B выражается из уравнения

$$H_1 = H_{BH}^{(3)} = (K_{K3} I_m A_1) / 2\pi, \quad (6)$$

где K_{K3} – кратность тока КЗ по отношению к I_H ; I_m – амплитудное значение I_H ;

$$A_1 = g_{A\pi} \sin \varphi_B + g_{B\pi} \sin(\varphi_B + 120) + g_{C\pi} \sin(\varphi_B + 240) \quad (7)$$

– коэффициент, учитывающий влияние напряжённости $H_{BH}^{(3)}$ на МК; коэффициенты $g_{A\pi}$, $g_{B\pi}$ и $g_{C\pi}$ рассчитываются по формулам (2) для g_A , g_B и g_C , соответственно, с учётом погрешностей в установке МК.



При пересчёте вариантов погрешностей в установке МК 1 (4) находятся максимальные $\varphi_{B\max}$ ($\varphi_{H\max}$) и минимальные $\varphi_{B\min}$ ($\varphi_{H\min}$) значения угла φ_B (φ_H). Для нахождения граничного угла $\varphi_{гр}$, который характеризует собой быстроедействие защит, работающих на принципе сравнения фаз [8], необходимо знать сдвиги (по фазе) $\varphi_{п1}$ и $\varphi_{п2}$ между углами φ_B и φ_H , характеризующие наибольшую разницу во времени срабатывания герконов 1 и 4 (выбирается больший):

$$\varphi_{п1} = \varphi_{B\max} - \varphi_{H\min}, \quad \varphi_{п2} = \varphi_{H\max} - \varphi_{B\min}. \quad (8)$$

Задаваясь значениями K_{K3} в (6), по (8) определяют φ_H . Зависимости $\varphi_H = f(K_{K3})$ для МК 1, 4, 3, 6 и МК 2, 5 различны (рис.4), так как для первых магнитные потоки (помехи), созданные токами соседних фаз, не совпадают по знаку с информативным потоком, увеличивая

$H_{BH}^{(3)}$ или $H_{HH}^{(3)}$, а для вторых совпадают, уменьшая $H_{BH}^{(3)}$ или $H_{HH}^{(3)}$. Из рис.4 видно, что при $K_{K3} \leq 5$ угол φ_H не превосходит $27,6^\circ$ (здесь и далее цифры представлены с учётом погрешностей расчёта 6%), при $K_{K3} > 5$ он уменьшается до $19,1-21,2^\circ$.

Отстройка от МП соседних электроустановок (ЭУ). Наибольшее влияние на МК оказывает МП, созданное током фазы А линии W1, располагающейся на допустимом по технике безопасности расстоянии D справа от фазы С защищаемого Tr (рис.1), или фазы С – линии W2 (на рис.1 не показана) слева от его фазы А. Возможно присутствие и W1, и W2 од-

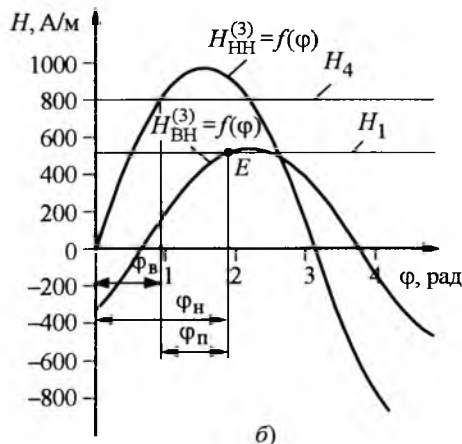
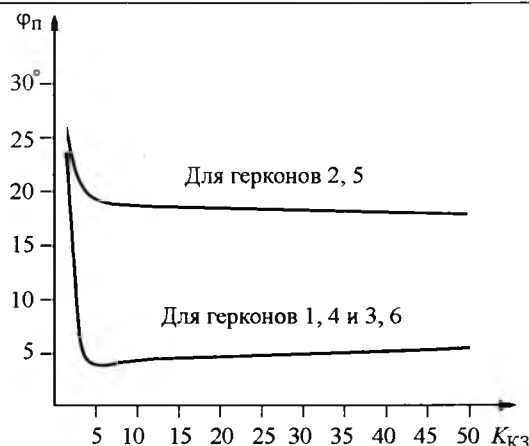


Рис.3. Напряжённости магнитных полей, действующие на герконы 1 и 4 силового трансформатора 16 МВ·А, 10/6,3 кВ при токе трёхфазного КЗ кратностью 1,25:

а – при соединении обмоток трансформатора Y/Y; б – при соединении обмоток Y/Δ


 Рис.4. Зависимость $\varphi_{\Pi} = f(K_{K3})$

повременно. Рассматривается режим замыкания на землю в двух точках сети с изолированной нейтралью, так как при трёхфазном и двухфазном КЗ это влияние значительно меньше (сумма токов фаз равна нулю, а расстояния от фаз $W1$ или $W2$ до МК приблизительно одинаковы). При наличии $W1$ или $W2$ (или обеих линий сразу) в уравнение (6) вместо A_1 вводится A_2 или A_3 (или $A_4 = A_3 + A_2 - A_1$), причём

$$A_2 = A_1 + K_{K3.c} g_{Ac} \sin \varphi_{\Pi}; \quad A_3 = A_1 + K_{K3.c} g_{Cc} \times \sin(\varphi_{\Pi} + 240), \quad (9)$$

где $K_{K3.c}$ — кратность тока КЗ в соседней ЭУ относительно I_n ; g_{Ac} , g_{Cc} — коэффициенты, учитывающие влияние МП, создаваемых токами фаз A линии $W1$ и C линии $W2$. Вычисляются они элементарно, например g_{Cc} для герконов 1 и 4 выглядит как g_C в (2), в скобках которого вместо $2d$ подставляется D , и меняется знак перед скобкой в числителе.

Исследуем влияние КЗ в ЭУ на герконы защищаемого Тр, работающего в режиме нагрузки. Так как срабатывание МК под действием тока, проходящего в ЭУ, приводит к излишней работе защиты, необходимо знать наименьший ток КЗ в ЭУ, при котором МК могут сработать. Для этого φ_{Π} находится из уравнения (6) путём увеличения $K_{K3.c}$ в (9), в зависимости от того какие ЭУ присутствуют, до значения, соответствующего моменту срабатывания МК 1 в точке E (рис.3). Расчёты показали, что при токах КЗ 16–17 кА в ближайшей фазе соседней ЭУ (при отсутствии тока в других её фазах) герконы 1–3 срабатывают. Попытаемся отстроиться от этих токов путём выбора координат МК,

например МК 1. Для исключения влияния $W1$ необходимо, чтобы $g_{Cc} = 0$ и одновременно соблюдались условия (4) и (5), что оказалось невозможным. Однако, если исключить условие (4), то уравнения (5) и $g_{Cc} = 0$ имеют совместные решения. Для МК 1 (трансформатор 16 МВ·А, 10/6,3 кВ) $x = 0,02$ м, $\gamma = 4,4^\circ$, для МК 2 — $x = 0,24$ м, $\gamma = 4,8^\circ$, для МК 3 — $x = 0,46$ м, $\gamma = 5,2^\circ$.

Задаваясь значениями K_{K3} в (6), с учётом (9) и погрешностей установки по (8), определяют значения угла φ_{Π} . Оказалось, что при $K_{K3} \leq 5$ угол $\varphi_{\Pi} \leq 28,6^\circ$, а при $K_{K3} > 5$ угол φ_{Π} уменьшается до $20,1$ – $22,3^\circ$. При наличии $W2$ расчёт координат установки МК и углов φ_{Π} производится аналогично. При этом $\varphi_{\Pi} \leq 29,2^\circ$. При наличии и $W1$, и $W2$ отстроиться от влияния МП сразу обеих ЭУ невозможно. Поэтому необходимо отстраиваться от влияния МП одной ЭУ, например $W1$, и учитывать влияние МП на герконы от $W2$. Рассмотрим возможность срабатывания МК под действием тока КЗ в соседних ЭУ путём увеличения $K_{K3.c}$ в (9) при $K_{K3} = 1$ до тех пор, пока не будет определён корень уравнения (6). Расчёты показали, что уже при токах КЗ 18 кА в ближайшей фазе соседней линии герконы 1–3 срабатывают. Избежать этого можно, если МК 3 отстраивать от влияния МП фазы C линии $W2$, а не фазы A линии $W1$. Тогда $x = -0,02$ м, а $\gamma = -5,2^\circ$, и ток КЗ, проходящий по соседней ЭУ, при котором МК срабатывают, оказывается равным 53 кА вместо 18 кА. Токи КЗ, как правило, меньше 53 кА. Поэтому найденные координаты установки МК являются окончательными.

Все расчёты угла φ_{Π} для герконов 1 и 4 проведены для Тр 16 МВ·А с соединением обмоток Y/Y . При соединении Y/Δ к полученным значениям угла φ_{Π} необходимо добавить $\beta = 30^\circ$ (β — угол сдвига между одноимёнными фазами Тр со стороны ВН и ПН).

Учёт регулирования напряжения под нагрузкой. При регулировании ток Тр по отношению к I_n может увеличиваться или уменьшаться на 16% [6]. Подставляя значение этого тока в (6), по (8), с учётом (9) влияния соседних ЭУ при погрешностях установки, определяются новые значения угла φ_{Π} . Для трансформаторов 6,3, 10, 25 МВ·А с ВН 10 кВ и 40, 63 МВ·А с ВН 35 кВ все расчёты производятся аналогично. Анализ результатов расчётов показал, что для

трансформаторов с соединением Y/Y (Y/Δ), оснащённых устройством РПН, разновременность срабатывания однотипных герконов на ВН и НН может достигать 2,7 и 4,28 мс. Это приводит к погрешностям в определении сдвига по фазе на $18^\circ \cdot 2,7 = 47,6^\circ$ и $18^\circ \cdot 4,28 = 77,6^\circ$, без РПН – на $29,2^\circ$ и $59,2^\circ$, соответственно. Кроме рассмотренных, в угол α блокировки (учитывает все погрешности при построении дифференциально-фазных защит [8]) входят угол между векторами токов одноимённых фаз с ВН и НН трансформатора, который может достигать 20° через 0,01–0,02 с (время работы фазосравнивающих схем) после возникновения КЗ в Тр, и разница во времени срабатывания двух герконов (ВН и НН).

Таким образом, для Тр Y/Y при наличии однотипных герконов со стороны ВН и НН угол $\alpha_Y = 20^\circ + 47,6^\circ + 18^\circ = 85,6^\circ$, что позволяет применять широко используемые фазосравнивающие схемы с $\varphi_{гр} = 90^\circ$. Для Тр Y/Δ угол $\alpha_\Delta = \alpha_Y + 30^\circ = 115,6^\circ$. Тут следует применять схемы, сравнивающие время совпадения с временем несовпадения, так как область срабатывания ($180-115,6^\circ$) значительно меньше 90° .

Разнотипные МК можно использовать только на Тр Y/Y , когда нет необходимости учитывать влияние соседних ЭУ, так как тогда $\alpha_Y = 117,6^\circ$ (при определении α_Y вместо 18 и $47,6^\circ$ взяты 72 и $27,6^\circ$). На Тр Y/Δ угол $\alpha_\Delta = 147,6^\circ$ и также, как при учёте ЭУ ($\alpha_Y = 139,6^\circ$, $\alpha_\Delta = 169,6^\circ$), область срабатывания оказывается недостаточной для выявления КЗ.

Регулирование уставок защиты. Может осуществляться с помощью рассмотренных в [9] конструкций, выполненных из немагнитных материалов, которые вместе с герконами представляют собой измерительные органы защиты. Они позволяют изменять координаты герконов по отношению к гибким токопроводам и защищать МК от вредного воздействия окружающей среды. Их отличительные особенности – участок проводника с током, вблизи которого устанавливается геркон, выпрямляется и жёстко фиксируется внутри конструкции, одна конструкция может крепиться только на трёхфазном силовом Тр, другая – на портале.

Выводы

На герконах без обмоток подмагничивания могут строиться дифференциально-фазные защиты трансформаторов мощностью не менее 6,3 (40) МВ·А с ВН 10 (35) кВ при пороге срабатывания защиты $I_{ср} = 1,25I_{н}$. При построении нужно учитывать токи в соседних электроустановках, если они превышают 21–53 кА для трансформаторов с ВН 10 кВ и 42–68 кА с ВН 35 кВ, а также разновременность срабатывания герконов из-за погрешностей их крепления, наличия РПН и разного собственного времени срабатывания.

Список литературы

1. Шоффа В.Н. Герконы и герконовые аппараты: Справочник. М.: МЭИ, 1993.
2. Клецель М.Я., Мусин В.В. О построении на герконах защит высоковольтных установок без трансформаторов тока // Электротехника. 1987. №4. С.11–13.
3. Клецель М.Я. Принципы построения и модели дифференциальных защит электроустановок на герконах // Электротехника. 1991. №10. С.47–50.
4. Клецель М.Я., Алишев Ж.Р. Выбор тока срабатывания МТЗ на герконах для кабеля 0,4 Кв // Изв. вузов. Энергетика. 1996. №5-6. С.23–29.
5. Клецель М.Я., Жуламанов М.А. Реле сопротивления на герконах // Электротехника. 2004. №5. С.38–44.
6. Правила устройства электроустановок. Санкт-Петербург: Деан, 2000.
7. Клецель М.Я., Алишев Ж.Р., Мануковский А.В., Мусин В.В. Свойства герконов при использовании их в релейной защите // Электричество. 1993. №9. С.18–21.
8. Федосеев А.М. Релейная защита электрических систем. М.: Энергия, 1976.
9. Клецель М.Я., Майшев П.Н., Таронов К.С. Конструкции для регулирования уставок релейной защиты на герконах // Омский научный вестник. 2004. №4 (29). С.110–113.

Клецель Марк Яковлевич – профессор кафедры "Электрические станции и автоматизация энергосистем" Павлодарского ГУ, им.С.Торайгырова (Казахстан). Окончил Карагандинский политехнический институт в 1961 г. В 1998 г. защитил докторскую диссертацию по теме "Развитие теории и реализация релейной защиты подстанций с электродвигателями" в Казахском НИИ энергетики.

Майшев Павел Николаевич – инженер-технолог АО "Алюминий Казахстана". Окончил Павлодарский ГУ им.С.Торайгырова в 2002 г. В 2006 г. защитил кандидатскую диссертацию по теме "Разработка дифференциально-фазных защит на герконах для трансформаторов мощностью 6,3–63 МВ·А" в Казахском НИИ энергетики.

Импульсные разрядные характеристики изоляционных систем, характерных для нелинейных ограничителей перенапряжений

АФАНАСЬЕВ А.И.

Приведены результаты исследований разрядных характеристик изоляционных систем нелинейных ограничителей перенапряжений высокого напряжения при грозовых импульсах. Показано, что электрическая прочность внешней изоляции ОПН при определенных размерах их экранной системы может определяться разрядными напряжениями изоляционного промежутка между экраном и колонкой варисторов. Разработана полуэмпирическая методика расчёта разрядных напряжений изоляционных систем ОПН при грозовых перенапряжениях.

Одним из основных результатов применения нелинейных ограничителей перенапряжений (ОПН) с нелинейным резистором (НР), скомплектованным из оксидно-цинковых варисторов (ОЦВ), является компактность изоляционных конструкций распределительных устройств и линий электропередачи. При этом размеры изоляции самих ограничителей определяются, с одной стороны, её электрической прочностью при перенапряжениях и длительном воздействии рабочего напряжения, а с другой, высотой НР, состоящего из последовательно-параллельно соединённых колонок варисторов. Совершенствование технологии изготовления ОЦВ и улучшение конструкции ОПН в последнее время привели к существенному повышению пропускной способности варисторов (как единичных, так и в составе нелинейного резистора) и к увеличению допустимого градиента рабочего напряжения по высоте нелинейного резистора. Это, в свою очередь, позволило отказаться от последовательно-параллельного соединения колонок варисторов малого диаметра, перейдя к одноколонковым аппаратам, укомплектованным варисторами диаметром 45–136 мм, а также уменьшить высоту НР. Однако высота нелинейного ограничителя наружной установки в той же степени может быть сокращена только в случае использования полимерно-

Results of researches of flashover characteristics of the HV MOA insulating systems under lightning impulses are presented. It is shown, that electric strength of MOA external insulation with the certain sizes of their screen system can be defined by flashover voltages of the insulating gap between the screen and a column of metal oxide varistors. The semi-empirical calculation procedure for estimation of lightning impulse flashover voltages of the MOA insulating systems is described.

го изоляционного корпуса (покрышки) аппарата с развитой оребрённой внешней поверхностью, что обеспечивает необходимую электрическую прочность внешней изоляции в условиях эксплуатационных загрязнений и увлажнений. В настоящее время такое решение является общепринятым [1–6].

На рис. 1 приведён эскиз типичного нелинейного ограничителя перенапряжений на класс напряжения 110 кВ и выше в полимерном корпусе. Его основным элементом является одиночная колонка варисторов (нелинейный резистор) 1 высотой H_k , размещённая внутри полимерного корпуса. Колонка скомплектована из варисторов радиусом r_k . Несущую основу корпуса составляет стеклопластиковая труба 2, которая обеспечивает необходимую механическую прочность и жёсткость конструкции ограничителя. Трекингоэрозионную и дуговую стойкость, а также требуемые влагоразрядные характеристики внешней изоляции обеспечивает специальное ребристое покрытие, выполняемое обычно на основе силиконовой электротехнической резины. Пространство между колонкой варисторов и стеклопластиковой трубой заполняется специальной полимерной композицией (компаундом) 3. По концам корпуса смонтированы металлические фланцы (верхний 5 и нижний 4), служащие для герметизации его

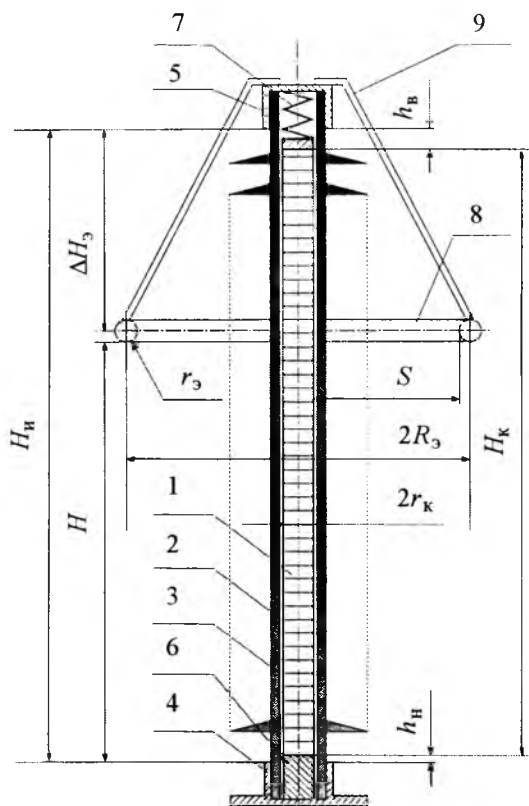


Рис.1. Эскиз одноколонкового нелинейного ограничителя перенапряжений в полимерном корпусе:

1 – колонка варисторов; 2 – стеклопластиковая труба; 3 – заполняющий компаунд; 4 – нижний фланец; 5 – верхний фланец; 6 – подставка; 7 – пружина; 8 – тороидальный экран; 9 – экранодержатель

внутренней полости. Одновременно фланцы являются контактными выводами ограничителя, к которым изнутри присоединяется нелинейный резистор, а снаружи (к контактными пластинам) – фазный провод и проводник системы заземления распреустройства. Колонка варисторов устанавливается на металлическую подставку 6, высота которой на h_n выше верхнего края нижнего фланца. Контактное нажатие между варисторами в колонке обеспечивается пружиной 7. Расстояние от нижнего края верхнего фланца до верхнего края колонки ОЦВ составляет h_v . Высота собственно внешней изоляции ограничителя составляет H_n .

Аппараты на напряжение 110 кВ и более снабжаются экранной арматурой, которая обычно выполняется в виде одиночного или расщеплённого тороида 8 с (по крайней мере) двумя экранодержателями 9. Назначение экранной арматуры состоит в обеспечении на-

дёжной работы нелинейного ограничителя перенапряжений в процессе эксплуатации в той степени, в которой это от неё зависит. Экранная арматура должна обеспечивать:

- выравнивание распределения напряжения по высоте колонки ОПН при воздействии рабочего напряжения;
- ограничение напряжённости электрического поля в полимерной изоляции до допустимого уровня;
- подавление коронного разряда на элементах ограничителя (включая собственно экранную арматуру);
- обеспечение требуемой электрической прочности изоляционной конструкции ОПН.

При этом электрическая прочность внешней изоляции ограничителя в основном определяется разрядными характеристиками системы воздушных промежутков "экран–земля (заземлённый фланец)" и "экран–колонка варисторов". И если исследования электрической прочности промежутков типа "экран–земля" или "экран–подножник" для аппаратной изоляции при различных электрических воздействиях проводились исключительно широко [7–13], то промежутки "экран–колонка варисторов" практически не исследовались. Из опыта эксплуатации изоляционных конструкций с искусственным распределением напряжения по высоте (делители напряжения, вводы конденсаторного типа, трансформаторы тока и напряжения, вентильные разрядники и т.п.) известно, что одной из причин выхода их из строя является пробой по крышки разрядом, развивающимся от находящихся под высоким напряжением элементов аппаратов (фланцев или экранов), причём это явление, в основном, отмечается при грозовых воздействиях на изоляцию.

Целью настоящей работы, продолжающей цикл исследований [7–11], является исследование электрической прочности макетов изоляционных конструкций ограничителей перенапряжений при импульсах грозовых перенапряжений.

Исследования проводились в тех же условиях, что и работы, результаты которых изложены в [11]. В качестве источника стандартных грозовых импульсов напряжения 1,2/50 использовался генератор импульсных напряжений (ГИН) 7,0 МВ; 560 кДж наружной установки.

При испытаниях использовалось 1/7 импульсного генератора (1 МВ, 80 кДж) или 2/7 импульсного генератора (2 МВ, 160 кДж). Фактические параметры импульсов испытательных напряжений составляли:

- длительность фронта $T_{\phi} = 1,24 \div 1,32$ мкс;
- длительность импульса $T_{и} = 48 \div 52$ мкс.

Испытаниям подвергалась изоляционная система "экран–макет колонки варисторов на плоскости".

Изучаемая изоляционная система (рис.2) подвешивалась через полимерный длинностержневой изолятор 1 типа ЛК 160/500 к тросу электролебёдки.

Тороидальный экран 2 крепился к макету фланца 4 на трёх стальных оцинкованных тросиках 8 диаметром 2 мм, имитировавших экранодержатели. Плоскость расположения осевой линии экрана 2 была перпендикулярна осевой линии макета колонки варисторов и параллельна заземлённой плоскости 6. Переходный элемент 3 обеспечивал сопряжение макета фланца 4 с изолятором 1. Импульсы напряжения подавались от ГИН на макет фланца также через стальной тросик 7.

Макет колонки варисторов (рис.2) представлял собой цепочку последовательно соединён-

ных керамических конденсаторов 9 типа КВИ-3 (3300 пФ, 10 кВ). Конденсаторы между собой соединялись латунными шпильками, на которые также крепились экраны конденсаторов 10, спаянные из медной фольги толщиной 0,3 мм. Расстояния между экранами выбиралось таким образом, чтобы при испытаниях не было перекрытий между ними, а также между экранами и конденсаторами. Дополнительно для повышения электрической прочности внешней изоляции конденсаторов, которые при испытаниях работали со значительной перегрузкой, их поверхность была покрыта слоем 11 кремний-органического герметика типа КЛТ-30 толщиной не менее 2 мм. Макет колонки крепился к макету фланца таким образом, чтобы верхний край верхнего конденсатора находился на уровне нижнего края макета фланца. Самый нижний конденсатор присоединялся к заземлённой плоскости гибкой связью – плетёным медным канатиком диаметром 3 мм. Расстояние от нижнего края макета колонки до заземлённой плоскости не превышало 10 мм. Таким образом, имитировался случай, когда $h_{в} = h_{н} \approx 0$. Испытывались два варианта изоляционной системы "экран – макет колонки варисторов на плоскости".

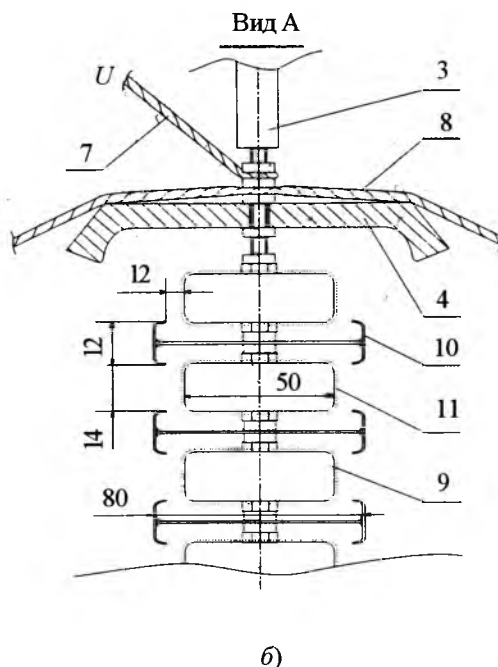
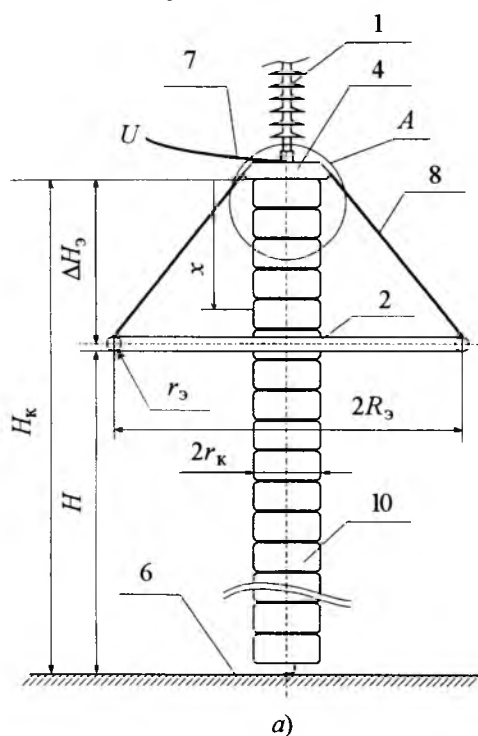


Рис.2. Эскизы исследованных изоляционных систем:

1 – подвесной длинностержневой стеклопластиковый изолятор; 2 – тороидальный экран; 3 – переходный элемент; 4 – макет верхнего фланца ОПН; 5 – заземлённая металлическая труба; 6 – заземлённая плоскость; 7 – шлейф для подачи напряжения; 8 – экранодержатели; 9 – конденсаторы; 10 – экраны конденсаторов; 11 – дополнительное изоляционное покрытие конденсаторов

– высота колонки $H_k = 104$ см (40 конденсаторов), размеры тороидального экрана $R_3 = 37$ см, $r_3 = 0,7$ см;

– высота колонки $H_k = 156$ см (60 конденсаторов), размеры тороидального экрана $R_3 = 60$ см, $r_3 = 3$ см.

Рассчитанная для обоих вариантов изоляционной системы "экран – макет колонки варисторов на плоскости" неравномерность распределения напряжения по высоте макета колонки варисторов не превышала 3%.

Параметры кривых эффекта (50%-е разрядное напряжение $U_{0,5}$ и коэффициент вариации $\sigma^* = \sigma/U_{0,5}$) при грозовых импульсах определялись методом "вверх-вниз" при числе опытов

в серии 25–61. Статистическая погрешность оценки $U_{0,5}$ и σ^* составила 0,5–1,5% и 35–60% соответственно. Опыты проводились в помещении, поправки на атмосферные условия вводились в соответствии с ГОСТ 1516.2-97.

Результаты испытаний изоляционных промежутков "экран–плоскость" и "экран – заземлённая труба" приведены в табл. 1 и на рис. 3.

На рис. 3 зависимости разрядных напряжений при импульсах положительной (светлые точки) и отрицательной (зачернённые точки) полярностей приведены от заглубления экрана ΔH_3 , которое измерялось от нижнего края макета верхнего фланца ограничителя 4 до плоскости расположения осевой линии тороидально-

Таблица 1

Коэффициенты к формуле (1)

Тип промежутка	Полярность импульсов	a , кВ/см ²	b , кВ/см	c , кВ/см	d , кВ	$L_{пр}$, см
"Экран–плоскость"	+	0,0346	7,83	5,0	55	200
	–	0,0983	17,250	6,77	279	
"Экран–заземлённая труба"	+	0,0438	9,373	5,47	88	90
	–	0,0491	10,908	5,78	134	

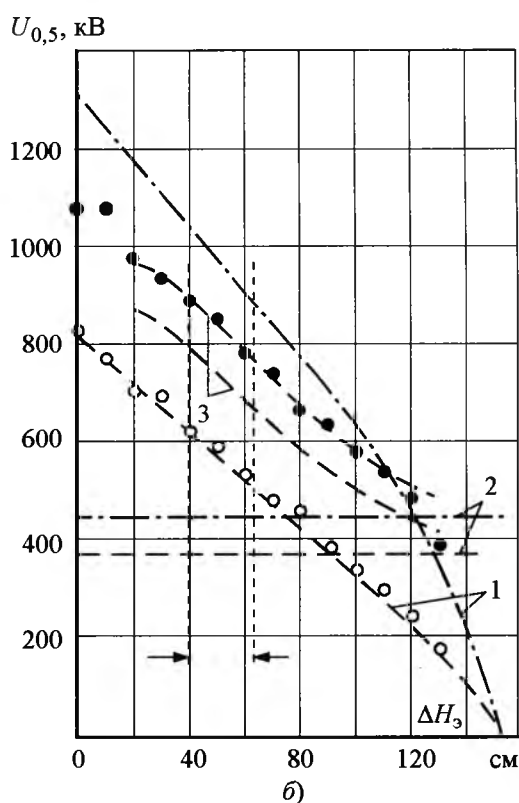
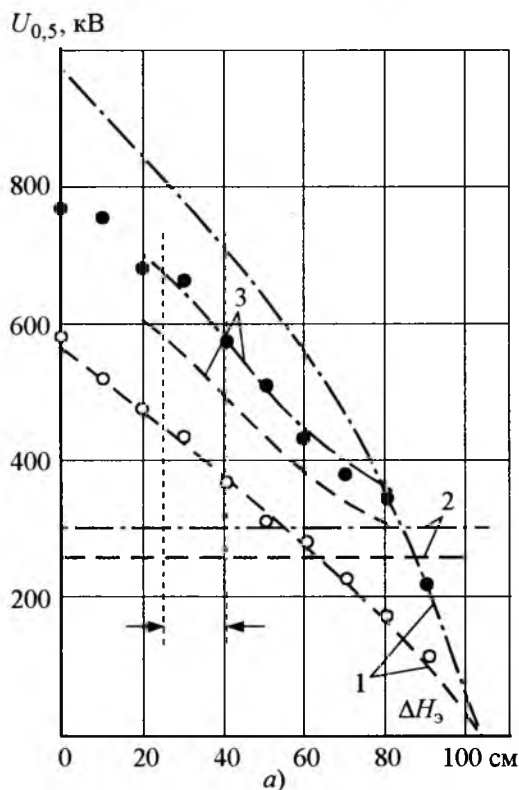


Рис. 3. Зависимости 50%-го разрядного напряжения изоляционной системы "экран – макет колонки варисторов на плоскости" от заглубления экрана:

a – $R_3 = 37$ см, $r_3 = 0,7$ см, $H_k = 104$ см; b – $R_3 = 60$ см, $r_3 = 3$ см, $H_k = 156$ см; 1 – "экран – плоскость" (по экспериментальным данным [11]); 2 – "экран – заземлённая труба" (по экспериментальным данным [11]); 3 – "экран – макет колонки варисторов на плоскости" (полуэмпирический расчёт); — — —, \circ – положительная полярность воздействующих импульсов; — · —, \bullet – отрицательная полярность

го экрана 2 (рис.2). Заглубление экрана связано с длиной изоляционного промежутка между экраном и плоскостью соотношением (см. рис.1 и 2):

$$H = H_{\text{и}} - \Delta H_3 - r_3 = H_{\text{к}} + h_{\text{в}} + h_{\text{н}} - \Delta H_3 - r_3. \quad (1)$$

Учитывая, что в исследуемой изоляционной системе $h_{\text{в}} = h_{\text{н}} \approx 0$, получаем $H_{\text{и}} = H_{\text{к}}$. Тогда

$$H = H_{\text{к}} - \Delta H_3 - r_3. \quad (1a)$$

Также на рис.3 приведены характеристики электрической прочности изоляционных промежутков "экран – плоскость" (кривые 1) и "экран – заземлённая труба" (кривые 2). Эти характеристики определялись путём расчёта по следующим эмпирическим формулам [19]:

$$U_{0,5} = \begin{cases} L(b - aL), & 0 \leq L \leq 50 \text{ см}; \\ d + cL, & 50 \leq L \leq L_{\text{пр}} \text{ см}, \end{cases} \quad (2)$$

где a , b , c и d – постоянные коэффициенты; L – размер изоляционного промежутка (H или S – для промежутков "экран – плоскость" и "экран – заземлённая труба" соответственно); $L_{\text{пр}}$ – предельные размеры исследованного промежутка, значения которых приведены в табл.2.

В связи с тем, что зависимости построены от заглубления экрана ΔH_3 , вместо параметра

Таблица 2

50%-е разрядные напряжения ($U_{0,5}$ кВ)
изоляционных систем

"экран – макет колонки варисторов на плоскости"

Заглубление экрана ΔH_3 , см	Размеры экрана (R_3/r_3 , см) и полярность воздействующих грозовых импульсов напряжения			
	37/0,7		60/3	
	+	–	+	–
0	582	991	829	1342
10	521	879	771	1238
20	478	721	707	977
30	435	664	695	935
40	368	571	621	889
50	313	512	591	852
60	282	436	533	783
70	227	379	479	738
80	172	345	396	664
90	115	219	369	635
100	–	–	331	579
110	–	–	278	537
120	–	–	240	482
130	–	–	173	375

L в (2) для определения 50%-го разрядного напряжения промежутка "экран – плоскость" необходимо подставлять значение H , вычисленное из соотношения (1a). Разрядное напряжение промежутка "экран – заземлённая труба" находится при подстановке вместо L в (2) значения изоляционного расстояния S между экраном и заземлённой соосной с этим экраном трубой:

$$S = H_3 - r_3 - r_{\text{т}}. \quad (3)$$

Учитывая, что в [11] диаметр трубы совпадал с диаметром макета колонки варисторов в настоящем исследовании: $2r_{\text{т}} = 2r_{\text{к}} = 8$ см, (3) можно переписать в виде

$$S = H_3 - r_3 - r_{\text{к}}. \quad (3a)$$

Как видно из рис.3, электрическая прочность исследованной изоляционной системы при положительных импульсах совпадает с электрической прочностью промежутка "экран – плоскость" соответствующей длины. Наличие макета колонки варисторов не оказывает никакого влияния на разрядное напряжение системы. Это подтверждается также и тем, что при проведении опытов не было отмечено ни одного разряда между экраном и макетом колонки варисторов.

Электрическая прочность системы при отрицательных импульсах напряжения выше, чем при положительных. Причём уже при малых значениях заглубления экрана разрядное напряжение системы при отрицательных импульсах заметно ниже разрядного напряжения промежутка "экран – плоскость". Все разряды происходят между экраном и макетом колонки варисторов, но перекрытие происходит не по кратчайшему пути длиной $S_{\text{мин}} = R_3 - r_3 - r_{\text{к}}$. Разряды развиваются между экраном и некоторой точкой на поверхности макета колонки, расположенной несколько ниже (иногда много ниже) экрана. При $\Delta H_3 \leq 10$ см в системе с $H_{\text{к}} = 104$ см и при $\Delta H_3 \leq 20$ см в системе с $H_{\text{к}} = 156$ см все разряды завершаются в основании макета. Электрическая прочность систем в этом диапазоне изменения ΔH_3 остаётся практически неизменной. Затем, при увеличении заглубления экрана более указанных значений, электрическая прочность изоляционной системы начинает снижаться, а длина траектории развития разряда заметно уменьшаться, точка завершения разряда на макете колонки

поднимается вверх от его основания. Примечательно, что темп снижения электрической прочности заметно меньше, чем для промежутка "экран – плоскость".

При некотором значении ΔH_3 (при 80 и 120 см для систем с $H_k = 104$ см и с $H_k = 156$ см соответственно) происходит изменение траектории развития разрядов: все разряды перекрывают промежуток между экраном и плоскостью. Разрядное напряжение системы при последующем увеличении ΔH_3 уменьшается, совпадая с разрядным напряжением промежутка "экран – плоскость".

Объяснение полученным результатам можно найти, исходя из установленного в [11] положения о взаимной независимости ионизационных процессов в отдельных промежутках изоляционных систем и предположения о развитии разрядов при грозовых импульсах напряжения вдоль траекторий с наибольшей средней напряжённостью электрического поля.

Выделим из изоляционной системы "экран – макет колонки варисторов на плоскости" воздушный промежуток "экран – макет колонки варисторов" и попытаемся оценить его электрическую прочность. Предположим, что распределение напряжения по высоте колонки варисторов равномерное. Это очевидно справедливо для случая, когда по колонке варисторов протекает ток грозовых перенапряжений и распределение напряжения по высоте колонки определяется исключительно активной проводимостью варисторов. Тогда потенциал некоторой точки G на поверхности колонки варисторов, отстоящей по вертикали от нижнего края верхнего фланца на расстояние $x \leq H_k + h_b$ (см. рис.2,а),

$$u(x) = U \left(1 - \frac{x - h_b}{H_k} \right), \quad (4)$$

где U – напряжение, приложенное к ОПН.

Предполагая, как и ранее, $h_b = h_n = 0$, при $x \leq H_k$ получаем:

$$u(x) = U \left(1 - \frac{x}{H_k} \right). \quad (4a)$$

Соответственно, разность потенциалов между экраном, находящимся под напряжением U , и точкой G

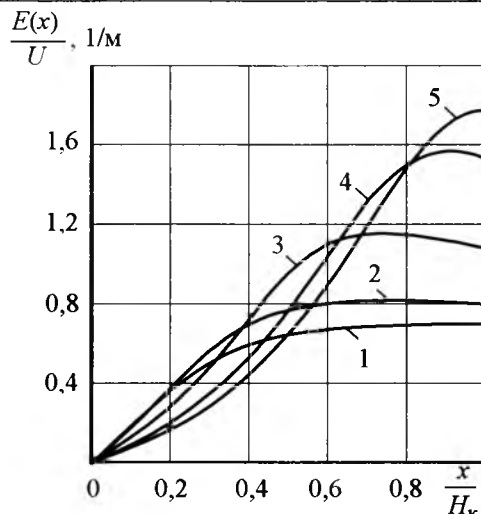


Рис.4. Зависимости отношения $\frac{E(x)}{U}$ от $\frac{x}{H_k}$ при различных заглублениях экрана ($R_3 = 60$ см, $r_3 = 3$ см, $H_k = 156$ см):

$$1 - \frac{\Delta H_3}{H_k} = 0,125; 2 - 0,25; 3 - 0,5; 4 - 0,75; 5 - 0,875$$

$$\Delta u(x) = U \frac{x}{H_k}, \quad (5)$$

а расстояние между ними

$$\rho(x) = \sqrt{(x - \Delta H_3)^2 + (R_3 - r_k)^2} - r_3. \quad (6)$$

Тогда средняя напряжённость между экраном и точкой G может быть определена по формуле

$$E(x) = \frac{\Delta u(x)}{\rho(x)} = \frac{U}{H_k} \frac{x}{\sqrt{(x - \Delta H_3)^2 + (R_3 - r_k)^2} - r_3}. \quad (7)$$

Результаты расчётов по формуле (7) показывают, что при некоторых значениях заглубления экрана функция $E(x)$ имеет экстремум (максимум). Для примера на рис.4 приведены

зависимости отношения $\frac{E(x)}{U}$ от $\frac{x}{H_k}$ для различных значений заглубления экрана.

Как видно из рис.4, при отношении $\frac{\Delta H_3}{H_k}$, равном 0,125 и 0,875, экстремум функции $\frac{E(x)}{U}$ при всех имеющих физический смысл значени-

я $x \in [0; H_k]$ отсутствует. Наоборот, при

$\frac{\Delta H_3}{H_k} = 0,25 \div 0,75$ наблюдается явно выраженный максимум. Положение этого максимума ($x = x_{\max}$) можно определить, продифференцировав $E(x)$ по x и приравняв полученный результат к нулю. При дифференцировании формулы (7) получается весьма громоздкое выражение, крайне неудобное для дальнейшего использования. Упростить (7) и, соответственно, результат дифференцирования возможно, если учесть, что для реальных изоляционных конструкций ограничителей имеет место соотношение

$$\sqrt{\left(x - \Delta H_3 - \frac{r_3}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(R_3 - r_k - \frac{r_3}{\sqrt{2}}\right)^2} \approx 1. \quad (8)$$

Обычно отношение (8) выполняется с погрешностью не более 2%. Тогда с учётом (8) формула (7) приобретает следующий вид:

$$E(x) = \frac{U}{H_k} \frac{x}{\sqrt{\left(x - \Delta H_3 - \frac{r_3}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(R_3 - r_k - \frac{r_3}{\sqrt{2}}\right)^2}}. \quad (7a)$$

Дифференцируя (7a) и приравнявая полученное выражение к нулю, получаем:

$$\frac{\partial E(x)}{\partial x} = \frac{U}{H_k} \frac{\left(R_3 - r_k - \frac{r_3}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\Delta H_3 + \frac{r_3}{\sqrt{2}}\right)^2 - \left(x - \Delta H_3 - \frac{r_3}{\sqrt{2}}\right)^2 - \left(R_3 - r_k - \frac{r_3}{\sqrt{2}}\right)^2}{\left[\left(x - \Delta H_3 - \frac{r_3}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(R_3 - r_k - \frac{r_3}{\sqrt{2}}\right)^2\right]^{3/2}} \rightarrow 0. \quad (9)$$

Решая (9), находим

$$x_{\max} = \Delta H_3 + \frac{r_3}{\sqrt{2}} + \frac{\left(R_3 - r_k - \frac{r_3}{\sqrt{2}}\right)^2}{\Delta H_3 + \frac{r_3}{\sqrt{2}}}. \quad (10)$$

Результаты расчётов по формуле (10) для исследованных макетов ограничителей приведены на рис. 5.

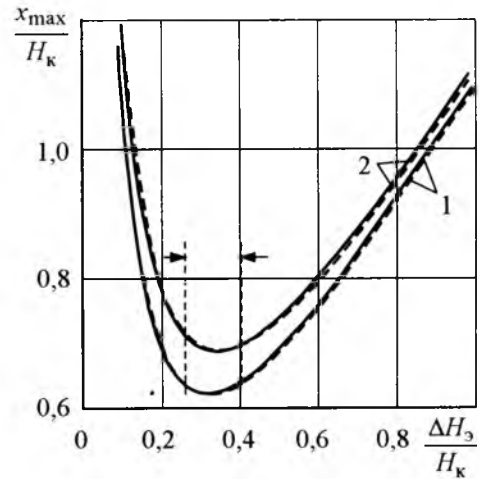


Рис. 5. Зависимости отношения $\frac{x_{\max}}{H_k}$ от $\frac{\Delta H_3}{H_k}$ для различных макетов ограничителей:

1 – $R_3 = 37$ см, $r_3 = 0,7$ см, $H_k = 104$ см; 2 – $R_3 = 60$ см, $r_3 = 3$ см, $H_k = 156$ см; — — приближённый расчёт по формуле (11); - - - - точный расчёт

Как видно из рис. 5, по мере увеличения заглубления экрана ΔH_3 (или, что то же самое, отношения $\frac{\Delta H_3}{H_k}$) координата максимума средней напряжённости x_{\max} (или $\frac{x_{\max}}{H_k}$) сначала

быстро уменьшается, достигая минимума, а затем увеличивается, но меньшими темпами. Очевидно, что полученные результаты имеют физический смысл только при $\frac{x_{\max}}{H_k} \leq 1$. В этом

диапазоне изменения координаты x_{\max} погрешность её вычисления по формуле (10) по сравнению с точным расчётом для макета с $R_3 = 37$ см, $r_3 = 0,7$ см не превышает 0,4%, а для макета с $R_3 = 60$ см, $r_3 = 3,0$ см не превышает 1,0%. Из анализа (7) и (7a) легко установить, что погрешность вычислений по формуле (10) прямо пропорциональна значению отношения $\frac{r_3}{R_3}$ и стремится к нулю при $\frac{r_3}{R_3} \rightarrow 0$.

Зная x_{\max} , можно найти длину S прямолинейной траектории развития разряда от поверхности экрана до макета колонки варисторов:

$$S = \sqrt{(R_3 - r_k)^2 + (x_{\max} - \Delta H_3)^2} - r_3 = \sqrt{(R_3 - r_k)^2 + \left(\Delta H_3 + \frac{r_3}{\sqrt{2}} + \frac{\left(R_3 - r_k - \frac{r_3}{\sqrt{2}} \right)^2}{\Delta H_3 + \frac{r_3}{\sqrt{2}}} - \Delta H_3 \right)^2} - r_3. \quad (11)$$

Рассчитанные по (11) при $\frac{x_{\max}}{H_k} \leq 1$ зависимости S/H от отношения H/H_k (H – длина промежутка между экраном и плоскостью, см. (1а)) приведены на рис.6.

Учитывая, что электрическая прочность изоляционного промежутка при его стримерном перекрытии определяется исключительно разностью потенциалов между электродами [7, 8, 12 и др.] 50%-е разрядное напряжение $\Delta u_{0,5\text{расч}}$ воздушного промежутка между экраном и точкой G с координатой x_{\max} , имеющего длину S (см. (11)), может быть рассчитано по формулам (2). Напряжение же $\Delta u_{0,5\text{расч}}$ достигается при приложении к ограничителю напряжения

$$U_{0,5\text{расч}} = \Delta u_{0,5\text{расч}} \frac{H_k}{x_{\max}} = \Delta u_{0,5\text{расч}} \times \frac{H_k \left(\Delta H_3 + \frac{r_3}{\sqrt{2}} \right)}{\left(\Delta H_3 + \frac{r_3}{\sqrt{2}} \right)^2 + \left(R_3 - r_k - \frac{r_3}{\sqrt{2}} \right)^2}. \quad (12)$$

Результаты полуэмпирических расчётов по формулам (2), (11) (12) приведены на рис.3 (кривые 3).

Как видно из рис.3, расчёты хорошо согласуются с экспериментальными данными. Действительно, при положительной полярности импульсов разрядные напряжения промежутка "экран – плоскость" (штриховая кривая 1) всегда меньше разрядных напряжений промежутка "экран – макет колонки варисторов" (штриховая кривая 3). Поэтому разряды всегда развиваются между экраном и плоскостью, а электрическая прочность исследованных систем при грозовых импульсах положительной полярности совпадает с электрической прочностью воздушного промежутка "экран – плоскость" соответствующей длины.

При отрицательной полярности импульсов при $\frac{\Delta H_3}{H_k} \leq 0,70 \div 0,75$ разрядные напряжения

промежутка между экраном и макетом колонки варисторов (штрих-пунктирная кривая 3) меньше разрядных напряжений промежутка "экран – плоскость" (штрих-пунктирная кривая 1).

Поэтому разряды при таких значениях $\frac{\Delta H_3}{H_k}$

развиваются между экраном и макетом колонки варисторов, а электрическая прочность исследованных систем совпадает с электрической прочностью воздушного промежутка "экран – макет

колонки варисторов". При $\frac{\Delta H_3}{H_k} \geq 0,70 \div 0,75$

разрядные напряжения промежутка между экраном и макетом колонки варисторов становятся больше разрядных напряжений промежутка "экран – плоскость". Происходит изменение траектории развития разрядов, которые теперь

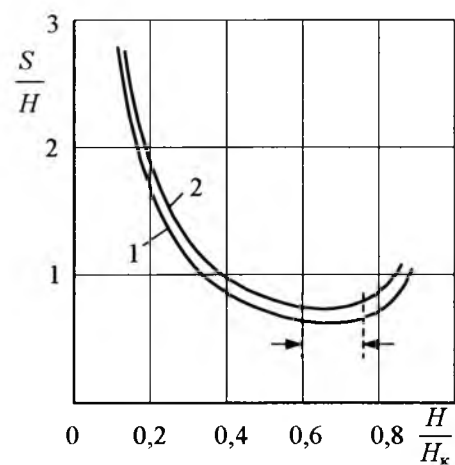


Рис.6. Зависимости $\frac{S}{H}$ от $\frac{H}{H_k}$ для различных макетов ограничителей:

1 – $R_3 = 37$ см, $r_3 = 0,7$ см, $H_k = 104$ см; 2 – $R_3 = 60$ см, $r_3 = 3$ см, $H_k = 156$ см

развиваются между экраном и плоскостью, и, соответственно, электрическая прочность исследованных систем при грозовых импульсах отрицательной полярности совпадает с электрической прочностью воздушного промежутка "экран – плоскость".

Многочисленными исследованиями установлено [1, 14–16 и др.], что для нелинейных ограничителей перенапряжений оптимальное заглубление экрана связано с высотой колонки варисторов (если предположить $h_b = h_n \approx 0$) соотношением

$$0,25 \leq \frac{\Delta H_3}{H_k} \leq 0,40. \quad (13)$$

Диапазон (13) ограничен на рис.3, 5, 6 стрелками. Примечательно, что оптимальный диапазон изменения

$\frac{\Delta H_3}{H_k}$ соответствует минималь-

ным значениям отношения $\frac{x_{\max}}{H_k}$ (рис.5) и, сле-

довательно, минимальной длине траектории развития разряда (рис.6).

Кроме того, анализ формул (10) и (11) показывает, что при всех возможных значениях ΔH_3 , выполняется соотношение $x_{\max} \geq \Delta H_3$. Это в свою очередь означает, что длина траектории развития разряда S всегда больше кратчайшего расстояния от экрана до колонки варисторов $S_{\min} = R_3 - r_3 - r_k$. Именно по этой причине электрическая прочность системы "экран – макет колонки варисторов на плоскости" выше электрической прочности промежутка "экран – заземлённая труба" равных геометрических размеров (т.е. при одинаковых размерах экранов и равных диаметрах заземлённой трубы и колонки варисторов). Это положение иллюстрирует рис.3, на котором прямыми 2 отмечены разрядные напряжения системы "экран – макет колонки варисторов на плоскости", рассчитанные по формулам (2) из условия, что разряд происходит между экраном и колонкой варисторов по кратчайшему пути.

Выводы

1. Разрядные напряжения внешней изоляции нелинейных ограничителей перенапряжений при грозовых импульсах напряжения положительной полярности ниже, чем при отрицательных импульсах.

2. При использовании в ограничителях экранов оптимальных размеров при положительных импульсах развитие разряда всегда происходит по траектории между экраном ОПН и заземлённой плоскостью. Разряд между экраном и колонкой варисторов невозможен.

3. При определённых значениях заглубления экрана ОПН воздействие отрицательных грозовых импульсов может привести к перекрытию промежутка между экраном и колонкой варисторов.

4. Разработанная полуэмпирическая методика позволяет с достаточной для практики точностью оценить электрическую прочность внешней изоляции ОПН при грозовых перенапряжениях.

Список литературы

1. Афанасьев А.И., Богатенков И.М., Фейзуллаев Н.И. Аппараты для ограничения перенапряжений в высоковольтных сетях. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2000.
2. Александров Г.Н., Афанасьев А.И., Борисов В.В. и др. Электрические аппараты высокого напряжения: Учебник для вузов, СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2000.
3. Аппараты защиты. Т.2. Ограничители перенапряжения. М.: Информэлектро, 2001.
4. IEC 60099-4 (Second edition, 2004-05). Surge arresters. P.4. Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems. Geneva: Publ. of IEC, 2004.
5. Elements/ K. Ikebe, M. Kan, M. Yamaguchi, S. Watahiki // CIGRE. 2004. Rep. A3-307.
6. Hinrichsen V., Fien H., Solbach H.-B., Priebe J. Metal oxide surge arresters with composite hollow insulators for high-voltage systems // CIGRE. 1994. Rep.33-203.
7. Афанасьев А.И., Иванов В.Л. Электрическая прочность многоэлектродной системы воздушных промежутков при воздействии импульсов напряжения // Труды ЛПИ, №406. 1985. С.25–30.
8. Александров Г.Н., Афанасьев А.И., Иванов В.Л. Электрическая прочность изоляционных конструкций аппаратов сверхвысокого напряжения при импульсах грозовых перенапряжений // Электричество. 1987. №1. С.26–31.
9. Александров Г.Н., Афанасьев А.И. Разрядные характеристики воздушных промежутков экран–земля при импульсах коммутационных перенапряжений // Электричество. 1991. №6. С.6–13.
10. Афанасьев А.И. О влиянии размеров подножника на электрическую прочность опорных изоляционных конструкций аппаратов сверхвысокого напряжения при импульсах коммутационных перенапряжений // Электротехника. 1993. №2. С.12–22.
11. Афанасьев А.И. Электрическая прочность воздушных промежутков внешней изоляции электрооборудования при грозовых импульсах // Электротехника. 2006. №12. С.38–41.
12. Александров Г.Н., Иванов В.Л., Кизеветтер В.Е. Электрическая прочность наружной высоковольтной изоляции. Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1969.
13. Тиходеев Н.Н., Шур С.С. Изоляция электрических сетей. Л.: Энергия, 1979.

13. Фирсов А.В. Повышение надежности работы нелинейных ограничителей перенапряжений и их использование в коммутационной аппаратуре. Дис... канд. техн. наук. Л.: ЛПИ, 1983.

15. Афанасьев А.И. Проблемы экранирования нелинейных ограничителей перенапряжений в полимерных корпусах // Тезисы докладов семинара "ЭМС в присоединениях крупных электрических машин". СПб: Изд-во СПбГТУ. 1995. С.26.

16. Афанасьев А.И. Об экранировании полимерных изоляционных конструкций нелинейных ограничителей перенапряжений высокого напряжения // Труды V Международной конференции "Научно-технические проблемы

прогнозирования надёжности и долговечности конструкций и методы их решения" 14–17 октября 2003 г. СПб.: Изд. СПбГПУ, 2003. С.25–27.

Афанасьев Александр Иванович – профессор кафедры "Электроэнергетика, техника высоких напряжений" Санкт-Петербургского государственного политехнического университета (СПбГПУ), канд. техн. наук. Окончил электромеханический факультет Ленинградского политехнического института в 1983 г. Защитил диссертацию по теме "Исследование экранных систем изоляционных конструкций аппаратов сверх- и ультравысокого напряжения" в 1989 г.

Локационный способ обнаружения появления гололёда на проводах линии электропередачи

МИНУЛЛИН Р.Г., ФАРДИЕВ И.Ш., ПЕТРУШЕНКО Ю.Я, ГУБАЕВ Д.Ф., МЕЗИКОВ А.К., КОРОВИН А.В.

Обсуждается дистанционный импульсный способ обнаружения гололёда на проводах линий электропередачи, имеющий более высокую точность, чем известные способы, за счёт добавления схемы измерения температуры участка провода электролинии. Предлагаются два варианта схемы устройства, реализующего этот принцип.

Гололёд, образовавшийся на проводах линий электропередачи, оказывает дополнительную механическую нагрузку на провода и опоры, поэтому возникает риск разрушения линии с опасностью для жизни людей. Гололёдные аварии являются одними из самых тяжёлых и трудноустраняемых аварий на воздушных линиях. Их ликвидация затруднена из-за зимнего бездорожья, мёрзлого грунта и разбросанности по линии одновременно поражённых участков. Гололёдные аварии на воздушных линиях, как правило, имеют массовый характер и приносят большой ущерб. Эти аварии составляют для территории России около 25% общего количества повреждений на воздушных линиях, а их продолжительность – около 40% общей продолжительности всех аварийных отключений [1, 2].

Remote impulsive method of glaze ice detection on transmission line wires is being discussed. This method has the higher accuracy than the well-known methods by adding the scheme of temperature measuring the section of transmission line wire. Two scheme variants of device realizing the principle are suggested.

При обледенении проводов воздушных линий электропередачи изменяется целый ряд их физических, геометрических и других параметров [3]. Это позволяет выполнять датчики, основанные на различных способах определения появления гололёда на проводах электролиний [4].

Датчики реагируют на изменение:

- массы провода;
- натяжения проводов;
- физических свойств среды, окружающей провод;
- электрических характеристик проводов;
- условий распространения высокочастотных и импульсных сигналов.

Различают датчики: механические [5], оптические [6], радиоактивные [7], локационные [8] и др. Датчики гололёда, кроме локационных, обычно монтируются на проводах электролиний

в зоне образования гололёда и не являются дистанционными. Поэтому они требуют наличия телемеханического канала для передачи на диспетчерский пункт информации о появлении гололёда на проводах электролиний, на основании которой принимается решение о начале плавки гололёда.

В результате анализа конструкций датчиков гололёдной нагрузки, расположенных на проводах электролиний, и их технических характеристик, выполненного в [9], был сделан вывод: значительная часть датчиков этого типа имеет низкую чувствительность, составляющую 1–2 мм толщины стенки гололёда. Этого недостаточно для раннего обнаружения гололёда и эффективной борьбы с ним [9].

Наиболее перспективными являются локационные датчики, так как они являются дистанционными и могут контролировать появление гололёда в динамике, не требуют для передачи информации о появлении гололёда специального телемеханического связного канала, аппаратура зондирования допускает высокую степень автоматизации и может располагаться в обслуживаемых помещениях около начала или конца линии электропередачи.

При локационном зондировании импульс посылается передатчиком в линию, отражается от конца линии или неоднородности линии, каковой может быть гололёдная муфта, и принимается приёмником. Увеличение затухания или запаздывания отражённого импульса свидетельствует о наличии гололёда на проводах электролиний. Эти физические особенности распространения импульсных сигналов лежат в основе действия локационных датчиков.

Известен локационный способ [10], где в качестве контрольного параметра используют время распространения зондирующих импульсов от начала участка провода до ближней границы зоны обледенения и обратно. Однако фиксация частично отражённых импульсов существенно затруднена из-за их малой амплитуды. При плавном изменении толщины гололёдных отложений вдоль провода (что обычно наблюдается на практике) передний фронт отражённого импульса нарастает медленно, импульс плохо выделяется среди помех. Поэтому отсчёт момента прихода импульса происходит с большой погрешностью, которая соизмерима со значением запаздывания импульса из-за по-

явления гололёда, и достоверность обнаружения гололёда становится низкой. Когда провод равномерно покрыт гололёдом по всей длине, импульс вообще не обнаруживается.

Существуют и другие датчики, использующие локационный принцип: датчик с контрольным участком [11], датчик разности затухания в междупазных и внутрифазном каналах [12], датчик задержки сигнала между высокочастотными заградителями [13], один из которых должен быть полупрозрачным для зондирующих импульсов. Однако эти датчики по разным причинам не нашли широкого применения.

Предлагается способ обнаружения появления гололёда на проводах линии электропередачи, где контрольным параметром является время прохождения зондирующим импульсом ограниченного участка электролинии. Линия ограничивается с обоих концов вторичными обмотками трансформаторов (линии электропередачи 6–10 кВ) или существующими высокочастотными заградителями (линии электропередачи 35 кВ и выше), от которых отражается зондирующий импульс.

Зондирующий импульс локатора (рефлектометра) имеет небольшую длительность, находящуюся в пределах 0,5–10 мкс. Для импульсов такой длительности индуктивные сопротивления высокочастотных заградителей и вторичных обмоток трансформаторов большие. Поэтому у импульса при отражении от них незначительно уменьшается амплитуда и сохраняется полярность [14], что обеспечивает однозначное выделение импульса среди помех и уверенное распознавание его на рефлектограмме.

При появлении гололёда скорость распространения импульсов уменьшается за счёт изменения диэлектрических свойств линии электропередачи, что ведёт к увеличению времени прохождения импульсом ограниченного участка этой линии. Естественно, что чем больше гололёдная муфта по длине и по диаметру, тем больше увеличение времени запаздывания отражённого импульса. Но каково это увеличение и может ли оно обнаруживаться современными рефлектометрами?

Для ответа на этот вопрос был поставлен лабораторный эксперимент.

Был создан гололёдный станок в виде макета одного пролёта трёхпроводной воздушной

линии с проводами марки АС-70/11, подвешенными на опорах высотой 1,5 м. Зондирование осуществлялось с начала и конца линии попеременно с помощью рефлектометра Рейс-105Р, подключённого по схеме "фаза-фаза", импульсами длительностью 0,035 мкс.

Ситуации с появлением гололёдных образований имитировались путём постепенного намораживания на провод участков льда разной длины цилиндрической формы с толщиной стенки около 40 мм. На рис. 1 приведены рефлектограммы, характеризующие зависимость времени запаздывания отражённого импульса (ка-

жущееся удлинение линии на Δl) от длины гололёдного покрытия, при зондировании линии из её начала.

В результате проведённых экспериментов получена зависимость относительного времени запаздывания отражённого импульса от длины гололёдного покрытия на проводах при измерении с обоих концов линии, которая представлена на рис. 2.

Из рис. 2 следует, что закон изменения относительного запаздывания импульса близок к линейному и относительное запаздывание импульса достигает 30% при полном покрытии линии гололёдом. Промежуточные значения запаздывания импульса могут уверенно и достоверно регистрироваться с помощью обычных промышленно изготавливаемых рефлектометров типа Рейс-105Р.

Появление гололёда сопровождается механическим воздействием на провода электролинии, которое вызывает их удлинение под тяжестью гололёдных масс, ведущее к увеличению запаздывания отражённых импульсов. Это увеличение времени запаздывания суммируется с увеличением времени запаздывания, обусловленного понижением скорости распространения отражённого импульса из-за появления гололёда, и способствует его более достоверному обнаружению.

Крайне важно знать текущую длину L_0 участка провода на данный момент времени, по отношению к которой определяется его удлинение под влиянием гололёда. Длина L_0 участка провода электролинии будет зависеть от его температуры θ , на которую будут влиять

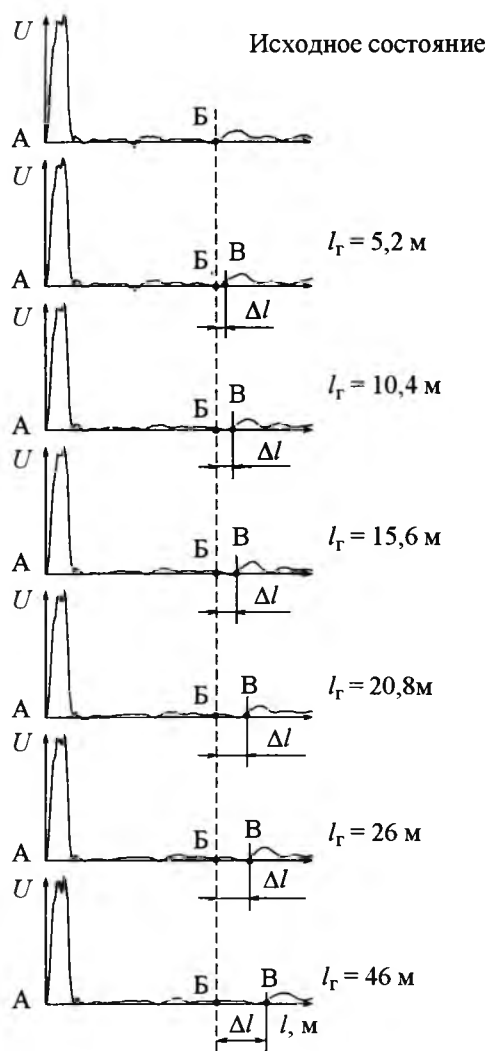


Рис. 1. Рефлектограммы, характеризующие зависимость кажущегося удлинения линии от длины l_r гололёдной муфты с толщиной слоя 40 мм при зондировании макета воздушной линии длиной 50 м с разомкнутым концом импульсами длительностью 0,035 мкс:

B — импульс, отражённый от конца линии; Δl — кажущееся удлинение линии; — — — граница геометрической длины линии

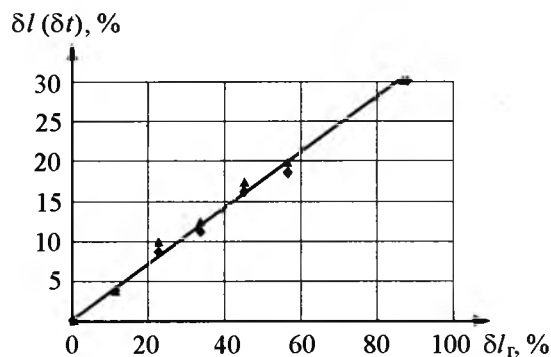


Рис. 2. Зависимость кажущегося относительного удлинения линии δl (или относительного времени запаздывания отражённого импульса δt) от относительной длины гололёдного покрытия δl_r толщиной 40 мм:

♦ — замеры с начала линии; ▲ — замеры с конца линии; — — — среднее значение

температура окружающего воздуха, скорость ветра и значение нагрузочного тока:

$$L_{\theta} = L_0[1 + \alpha(\theta_0 - \theta)],$$

где L_0 – длина участка провода при базовой температуре θ_0 ; α – коэффициент температурного удлинения провода.

Одновременно по каналу определения температуры косвенным путём (первый вариант исполнения устройства) или непосредственно (второй вариант исполнения) производится определение среднего значения температуры θ участка провода, которое принимается средним для линии электропередачи, и с его учётом вычисляется длина участка провода L_{θ} при этой температуре.

Значение θ можно определить двумя способами:

- косвенно по известным зависимостям, в которых в качестве исходных данных используются нагрузочный ток участка провода электролинии и метеорологические характеристики окружающей среды – температура воздуха и скорость ветра;

- непосредственно с помощью манометрического термометра, закреплённого на участке провода электролинии.

Благодаря учёту температурных изменений длины проводов электролиний повышается чувствительность предлагаемого способа обнаружения гололёда, а следовательно, надёжность и точность определения момента его появления.

Таким образом, предлагаемый способ обнаружения гололёда на проводах электролиний [15] заключается в том, что ограничивают участок провода высокочастотными заградителями, а в качестве контрольного параметра принимают время распространения зондирующих импульсов от начала ограниченного участка провода до его конца и обратно, затем определяют среднее значение температуры участка провода, а о появлении гололёда судят по изменению времени распространения зондирующих импульсов, вызванному появлением гололёда, с учётом влияния на контролируемый параметр температурного изменения длины участка провода.

В результате длительных исследований и многочисленных экспериментов разработаны два варианта практической реализации предло-

женного способа. На рис.3 показана функциональная схема первого варианта устройства с косвенным определением температуры участка провода по нагрузочному току, температуре воздуха и скорости ветра. На рис.4 представлена схема второго варианта устройства с непосредственным измерением температуры участка провода при помощи манометрического термометра.

Устройство содержит генератор зондирующих импульсов 1 и приёмник 2, подключённые через систему присоединения 3 к контролируемому участку провода 4 линии электропередачи. Участок провода 4 ограничен высокочастотными заградителями 5 и 6, установленными соответственно в его начале и конце. Высокочастотный заградитель 5 служит для предотвращения прохождения зондирующих импульсов от генератора 1 на шину 7 подстанции, а заградитель 6 – для обеспечения полного от-

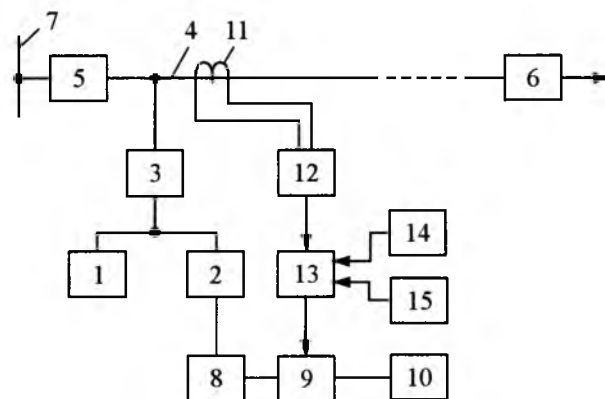


Рис.3. Функциональная схема первого варианта устройства обнаружения гололёда с косвенным определением температуры участка провода

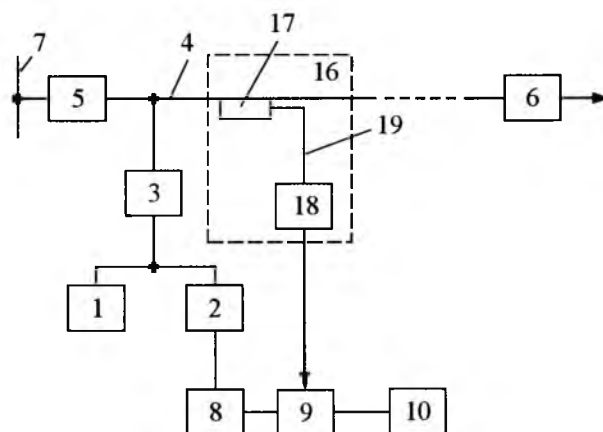


Рис.4. Функциональная схема второго варианта устройства обнаружения гололёда с непосредственным измерением температуры участка провода

ражения зондирующих импульсов от конца участка провода 4. При этом для ограничения контролируемого участка провода 4 на линиях электропередачи 35 кВ и выше, по которым, как правило, осуществляется высокочастотная связь, могут использоваться высокочастотные заградители, установленные там для защиты каналов связи. Вследствие того, что участок провода ограничен высокочастотными заградителями с большим входным сопротивлением для импульсных сигналов, зондирующие импульсы отражаются от них с незначительным уменьшением амплитуды и небольшими искажениями переднего фронта импульса. Это обеспечивает наиболее высокую точность измерения времени распространения зондирующих импульсов от начала контролируемого участка провода до его конца и обратно. К выходу приёмника 2 подключён вход блока 8 измерения времени, выход которого соединён с первым входом вычислительного устройства 9. Выход вычислительного устройства 9 подключён к сигнализатору образования гололёда 10.

Измерительная схема устройства содержит канал определения температуры.

В первом варианте исполнения, показанном на рис.3, этот канал включает установленный на участке провода 4 трансформатор тока 11, подключённый к входу датчика нагрузочного тока 12, к выходу которого подключён первый вход блока определения температуры 13. Второй и третий входы блока определения температуры 13 соединены с помощью телемеханической линии связи (проводной или беспроводной) соответственно с датчиками температуры воздуха 14 и скорости ветра 15, установленными на гололёдных постах, размещённых в нескольких местах вдоль линии электропередачи. Выход блока определения температуры 13 подключён ко второму входу вычислительного устройства 9. С помощью блока 13 по известным зависимостям, в которых в качестве исходных данных используются нагрузочный ток участка провода 4 и метеорологические характеристики окружающей среды – температура воздуха и скорость ветра, косвенным путём определяется среднее значение температуры участка провода 4.

Во втором варианте исполнения, представленном на рис.4, канал определения температуры состоит из манометрического термомет-

ра 16, включающего термобаллон 17, закреплённый непосредственно на участке провода 4, и блок измерения температуры 18, соединённый с термобаллоном 17 непроводящим электрический ток капилляром 19, длина которого может достигать 60 м. Использование в устройстве манометрического термометра 16 позволяет дистанционно определять температуру участка провода 4 и обеспечивает изоляцию термобаллона 17, имеющего контакт с высоковольтным проводом, от блока измерения температуры 18, расположенного дистанционно от линии электропередачи. Блоки измерения температуры 18, имеющие телемеханическую связь с вычислительным устройством 9, могут располагаться в нескольких местах на линии электропередачи.

Устройство работает следующим образом. Зондирующие импульсы от генератора 1 через систему присоединения 3 поступают в начало участка провода 4. Эти импульсы распространяются вдоль участка провода 4 и отражаются от заградителя 6, установленного на его конце. Отражённые от конца участка провода 4 импульсы возвращаются к его началу и через систему присоединения 3 поступают на вход приёмника 2, где фильтруются и усиливаются, а затем поступают в блок 8 измерения времени, где производится определение времени t распространения зондирующих импульсов от начала участка провода 4 до его конца и обратно.

Одновременно по каналу определения температуры косвенным путём (первый вариант исполнения устройства) или непосредственно (второй вариант исполнения) производится определение среднего для линии электропередачи значения температуры θ участка провода 4, с учётом которого вычисляется длина участка провода L_θ при температуре θ .

Время t распространения зондирующих импульсов зависит от скорости v распространения импульсного сигнала по участку провода 4 и его длины L_θ при температуре θ .

При появлении гололёда скорость v распространения импульсного сигнала снижается за счёт изменения диэлектрических свойств среды, окружающей провода воздушной линии, и как следствие, увеличения погонной ёмкости участка провода 4. Кроме того, под действием массы гололёда происходит дополнительное

увеличение длины участка провода l относительно значения L_0 .

В результате этого появление гололёда вызывает увеличение на Δt времени t распространения зондирующих импульсов по сравнению с его значением, определённым при той же температуре θ участка провода при отсутствии гололёда. В вычислительном устройстве 9 по полученным значениям времени t распространения зондирующих импульсов и температуры θ определяется это увеличение времени Δt и при превышении им заданного значения выдаётся команда на срабатывание сигнализатора образования гололёда 10.

Итак, предложен способ обнаружения появления гололёда на основе локации участка провода зондирующими импульсами, заключающийся в том, что участок провода воздушной линии ограничивают высокочастотными заградителями, а в качестве контрольного параметра, связанного с изменением условий распространения зондирующих импульсов, используется время распространения зондирующих импульсов от начала ограниченного участка провода до его конца и обратно, т.е. параметр, измерение которого обеспечивается с наиболее высокой точностью. Вследствие того, что изменение этого параметра обусловлено двумя факторами, связанными с появлением гололёда (уменьшением скорости распространения импульсного сигнала под влиянием гололёда и удлинением участка провода под действием массы гололёда), а также благодаря учёту температурного изменения длины ограниченного участка провода значительно повышается чувствительность способа.

Технический расчёт устройства, реализующего предложенный способ, и его экспериментальные исследования, проведённые на модели линии электропередачи, показали возможность определения гололёдных отложений толщиной от 0,5 мм, что гарантирует раннее обнаружение появления гололёда. В этом состоит преимущество предложенного устройства над имеющимися в настоящее время устройствами обнаружения гололёдообразования.

Если высокая точность обнаружения гололёдообразования не нужна, то устройство может быть упрощено. Схема измерения температуры проводов, которая находится в составе устройства, может отсутствовать. В этом случае

для определения текущего значения L_0 можно воспользоваться температурой окружающей среды, измеряемой обычным уличным термометром.

Внедрение данного локационного устройства обеспечит раннее обнаружение появления гололёда на проводах линии электропередачи с оперативным определением его места, что позволит своевременно начать его плавку. В результате будет решена проблема предотвращения гололёдных аварий, которые относятся к наиболее тяжёлым и трудноустраняемым, имеют массовый характер и наносят значительный ущерб. Это позволит сохранить значительные финансовые и материальные ресурсы. В социальном плане основным результатом реализации проекта является повышение надёжности электроснабжения потребителей, облегчение и сокращение аварийных работ в зимнее время. Одновременно предлагаемая система диагностики будет играть роль охранной сигнализации, что поможет решать проблему хищения электрических проводов.

Авторы выражают благодарность студентам Казанского государственного энергетического университета Сухомяткину М.О., Латипову А.Г., Березину И.А., Лукину Э.И. за помощь при выполнении измерений.

Исследования выполнены на средства фонда НИОКР ОАО "Татэнерго" за 2004 г., а также фонда НИОКР Республики Татарстан (грант Академии наук Республики Татарстан, проект 06-6.7-178/2002-2004-Ф).

Список литературы

1. Милуцкий Г.В., Скитальцев В.С. Высокочастотная связь по линиям электропередачи. М.: Энергия, 1977.
2. Дьяков А.Ф. Системный подход к проблеме предотвращения и ликвидации гололёдных аварий в энергосистемах. М.: Энергоатомиздат, 1987.
3. Ишкин В.Х., Цитвер И.И. Высокочастотная связь по линии электропередачи 330–750 кВ. М.: Энергоиздат, 1981.
4. Минуллин Р.Г., Фардиев И.Ш. Построение электрических распределительных сетей нового поколения. Казань: КГЭУ, 2005.
5. А.с. 94038387. Датчик гололёдных нагрузок / Тюняев Г.А., Волков В.А., Хромов Н.П., Горин В.А. 10.09.1996.
6. А.с. 1497678. Устройство для обнаружения гололёдных отложений / Зинов Г.А., Рудакова Г.М. 30.07.1989.
7. А.с. 2098904(13). Устройство для контроля массы гололёдных отложений на высоковольтных проводах воздушных линий электропередач / Белоус М.В., Генкин А.М., Генкина В.К., Гозак Д.Ч. 10.12.1997.
8. А.с. 754543. Линия электропередачи / Брауде Л.И., Ишкин В.Х., Коваленко В.П. и др. 07.08.1980.

9. Дьяков А.Ф., Засыпкин А.С., Левченко И.В. Предотвращение и ликвидация гололёдных аварий в электрических сетях энергосистем. Пятигорск: Изд-во РП "Юж-энерготехнадзор", 2000.

10. Казадаев А.П., Лившиц А.Л., Рудакова Р.М. О датчиках гололёда для воздушных линий электропередачи // Материалы II Всесоюзного совещания "Плавка гололёда на воздушных линиях электропередачи". Уфа: 1975. С.165–174

11. А.с. 1617517. Линия электропередачи с устройством контроля гололёдной нагрузки /Лившиц А.Л. 30.12.1990.

12. А.с. 764032. Устройство для контроля уровня гололёдной нагрузки на проводах линий электропередачи / Брауде Л.И., Шалыт Г.М. 25.09.1980.

13. А.с. 508843. Линия электропередачи /Лившиц А.Л. 17.05.1976.

14. Минуллин Р.Г., Фардиев И.Ш., Губаев Д.Ф. и др. Локационный мониторинг неоднородностей распределительных электрических сетей // Электротехника. 2006. №5. С.2–10.

15. Пат. 2402495 РФ. Н02 G7/16. 20.02.2006. Способ обнаружения появления гололёда на проводах линии электропередачи / Минуллин Р.Г., Фардиев И.Ш., Петрушенко Ю.Я. и др. Приоритет с 15.04.05.

Минуллин Ренат Гизатуллович – профессор кафедры релейной защиты и автоматизации электроэнергетических систем (РЗАЭС) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Окончил в 1959 г. радиотехнический факультет Казанского авиационного института (КАИ). В 1989 г. защитил докторскую диссертацию по теме "Прогностическая радиофизическая модель среднеширотного спорадического слоя E" в ИЗМИРАН.

Фардиев Ильшат Шаехович – заведующий кафедрой РЗА КГЭУ. Окончил в 1984 г. электроэнергетический факультет МЭИ.

Петрушенко Юрий Яковлевич – ректор КГЭУ, заведующий кафедрой механики КГЭУ. Окончил в 1973 г. факультет летательных аппаратов КАИ. В 1995 г. защитил докторскую диссертацию по теме "Задачи о собственных колебаниях, устойчивости и нестационарного деформирования предварительно нагруженных статической нагрузкой составных слоистых оболочек сложной геометрии и численные методы их решения" в КАИ.

Губаев Дамир Фатыхович – соискатель кафедры РЗА КГЭУ. Окончил в 1984 г. электроэнергетический факультет МЭИ.

Мезиков Аркадий Константинович – научный редактор ООО "Редакция журнала "Энергетика Татарстана". Окончил в 1969 г. приборостроительный факультет КАИ. В 1994 г. защитил кандидатскую диссертацию по теме "Средства измерений уровня, расхода и количества, используемые в производстве взрывчатых веществ и в криогенной технике" в Казанском государственном технологическом университете.

Коровин Александр Владимирович – технический редактор ООО "Редакция журнала "Энергетика Татарстана". Окончил в 1970 г. Казанский государственный университет. В 1984 г. защитил кандидатскую диссертацию по теме "Экспериментальная модель искусственных ионосферных неоднородностей и рассеянных на них сигналов" в Горьковском государственном университете.

Ускоренная диагностика высоковольтных выключателей

МИХЕЕВ Г.М., ФЁДОРОВ Ю.А., ШЕВЦОВ В.М., БАТАЛЫГИН С.Н.

Рассмотрена диагностика высоковольтных выключателей (ВВ) на базе анализа цифrogramм, полученных многоканальным цифровым регистратором. Описана методика ускоренного контроля характеристик ВВ в режимах включения и отключения без вскрытия его баков. Приведены осциллограммы, характеризующие временные, скоростные и ходовые параметры ВВ, а также собственное время включения и отключения выключателя.

The diagnostic of circuit breaker based on the analysis oscillograms which received by multitrace digital recorder is considered in this article. The method of accelerated monitoring of the circuit breaker's characteristics in breaking conditions without opening it's tanks is presented. The real oscillograms characterizing circuit breaker's parameters, it's closing and opening time are shown.

В электроэнергетических системах высоковольтные выключатели (ВВ) относятся к одним из наиболее ответственных видов электрооборудования. Качество функционирования ВВ определяет степень надёжности и энергобезопасности работы всей системы передачи и распределения электроэнергии как в нормальных, так и в аварийных режимах. Очевидно, что диагностике ВВ в эксплуатации любых энергообъектов следует уделять повышенное внимание. Важную роль в настоящее время в электроэнергетике, в том числе и в диагностике высоковольтного электрооборудования, начинают играть цифровые методы, устройства и системы на микропроцессорной элементной базе [1–5]. Первостепенное значение эти методы имеют для изношенного электрооборудования, в первую очередь для масляных выключателей, количество которых в настоящее время в эксплуатации значительно больше, чем других типов. Например, на предприятиях Чувашской энергосистемы масляные выключатели составляют более 60% общего числа ВВ (рис. 1). Следует отметить, что диагностика масляных выключателей требует измерения многих параметров и больших трудозатрат из-за их конструктивных особенностей.

В связи с этим предлагается метод ускоренного контроля характеристик ВВ без вскрытия бака выключателя и слива трансформаторного масла. Контроль осуществляется путём цифрового осциллографирования процесса комму-

тации ВВ как в режиме включения, так и в режиме отключения (причём рабочим электроприводом), что позволяет повысить точность определения параметров выключателя и его характеристик. Такой метод исключает возможность загрязнения окружающей среды, сокращает трудозатраты при его осуществлении, улучшает условия производства работ, вместо ручной обработки измеряемых величин легко обеспечивает автоматизацию формирования базы данных в электронном виде.

На рис. 2 приведена упрощённая схема устройства для ускоренного контроля характеристик ВВ. Она содержит источник постоянного напряжения (ИПН), в котором имеются блок прецизионных активных сопротивлений (БПАС) и блок преобразования напряжения в ток (БПНТ) с общей "землёй". Ключевым элементом схемы является цифровой регистратор (ЦР), соединённый трёхпроводным (ТПК) и четырёхпроводным (ЧПК) кабелями с двумя выходными каналами блока скорости и перемещения (БСД и П), имеющий общий нулевой вывод и соответственно высоковольтные выводы ВВ.

В свою очередь блок (БСД и П) механически жёстко закрепляется на внешнем подвижном стержне (ВПС) полюса выключателя.

Цифровой регистратор содержит блоки напряжения (БН) с двумя идентичными измерительными каналами напряжения, тока (БДТ) с тремя идентичными измерительными датчиками тока, аналого-цифрового преобразователя

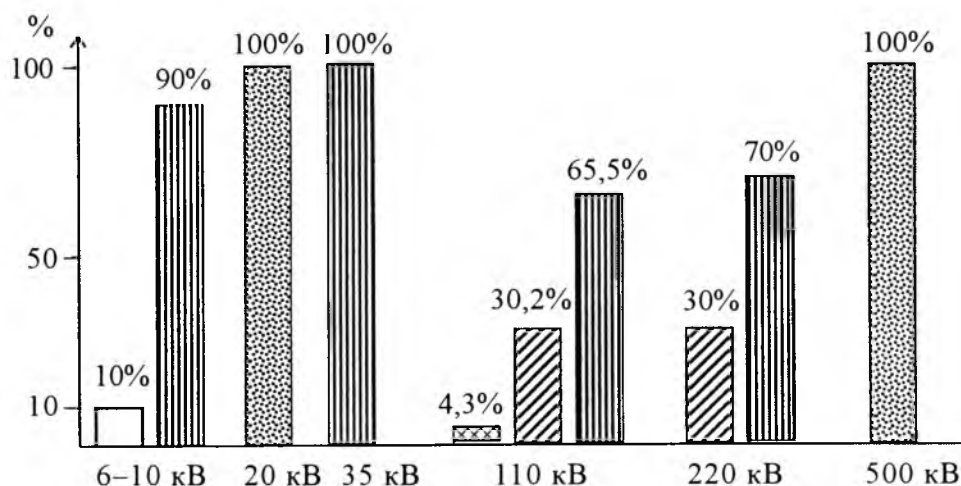


Рис. 1. Относительный количественный состав высоковольтных выключателей по типам и классу напряжения на предприятиях энергосистемы Чувашской Республики (по состоянию на 2006 г.):

□ — вакуумные выключатели; ▨ — элегазовые выключатели; ▩ — маломасляные выключатели; ▤ — масляные выключатели; ▧ — воздушные выключатели

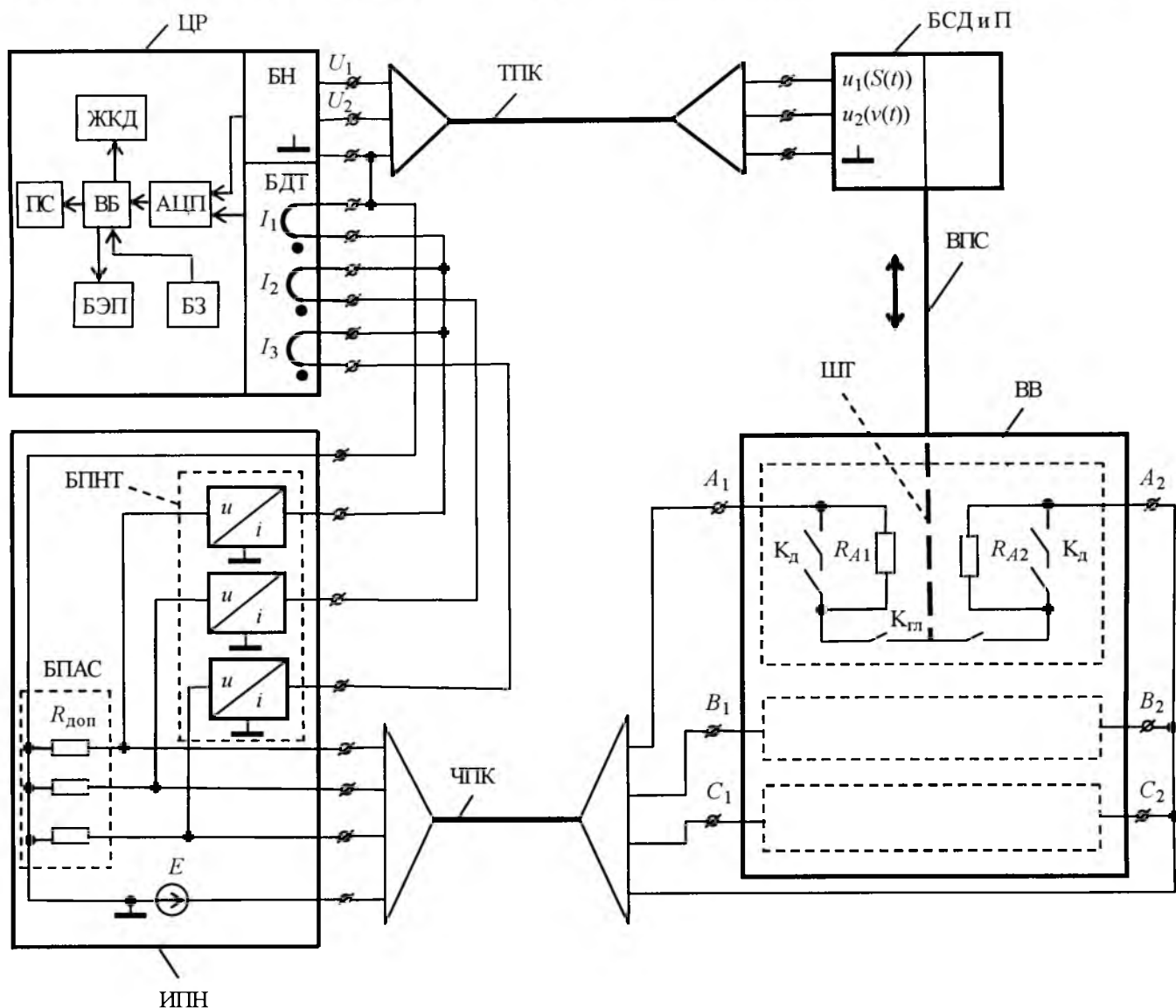


Рис.2. Схема устройства контроля характеристик высоковольтных выключателей:

ЦР – цифровой регистратор (БН – блок датчиков напряжения; БДТ – блок датчиков тока; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; БЭП – блок энергонезависимой памяти; ВБ – вычислительный блок; БЗ – блок запуска цифровой регистрации; ЖКД – жидкокристаллический дисплей; ПС – порт связи с компьютером); ИПН – источник постоянного напряжения (БПАС – блок прецизионных активных сопротивлений; БПНТ – блок преобразователя напряжения в ток; ТПК – трёхпроводный кабель; ЧПК – четырёхпроводный кабель); БСД и П – блок скорости движения и хода подвижных частей высоковольтного выключателя; ВПС – внешний подвижной стержень фазы *A* выключателя; ВВ – высоковольтный выключатель (R_{A1} , R_{A2} – шунтирующие сопротивления фазы *A* выключателя; K_d – дугогасительные контакты; $K_{гл}$ – главные контакты фазы *A* выключателя; ШТ – шток)

(АЦП), запуска (БЗ), энергонезависимой памяти (БЭП), вычислительный (ВБ), жидкокристаллический дисплей (ЖКД) и порт связи (ПС) с персональным компьютером.

Предлагаемый способ состоит из последовательности следующих основных этапов.

На первом этапе производится одновременная цифровая регистрация трёх токов в контак-

тной системе трёх фаз ВВ и синхронно регистрируются скорость движения, а также ход подвижных частей выключателя в режиме его включения и отключения без вскрытия бака и слива трансформаторного масла. На следующем этапе производится анализ полученных осциллограмм путём автоматической их разбивки на четыре интервала как в режиме вклю-

чения, так и в режиме отключения выключателя. Благодаря высокой разрешающей способности цифrogramм удастся последовательно фиксировать работу главных и дугогасительных контактов с шунтирующими сопротивлениями.

Для пояснения способа приведём краткое описание работы, например, выключателя типа У-110 [6]. В цикле "включения" масляного выключателя с электромагнитным приводом после подачи на электромагнит электропитания начинается движение посредством единой тяги так называемых траверс выключателя (элемент выключателя в виде символа "┐" с изолированной штангой (ШТ) и главными контактами). В ходе движения траверс вначале замыкаются главные контакты и между выводами выключателя в каждой фазе оказываются включёнными последовательно два шунтирующих сопротивления. При дальнейшем движении штока замыкаются дугогасительные контакты и шунтируются оба сопротивления.

В связи с этим в предложенном способе анализ цифровых осциллограмм осуществляет сначала их разбиение по форме кривых в режиме включения (рис.3) и в режиме отключения (рис.4) каждой из фаз условно на несколько интервалов времени, соответствующих разному состоянию контактной системы выключателя.

В режиме включения, например, первым из этих интервалов является интервал времени от момента начала движения траверс до замыкания главного контакта, соответствующие времена на осциллограммах обозначены соответственно в фазах А, В и С: $(0-t_{A1})$, $(0-t_{B1})$, $(0-t_{C1})$.

Вторым интервалом считается время от момента замыкания главных контактов до замыкания дугогасительных контактов одного плеча полюсов дугогасительных камер,

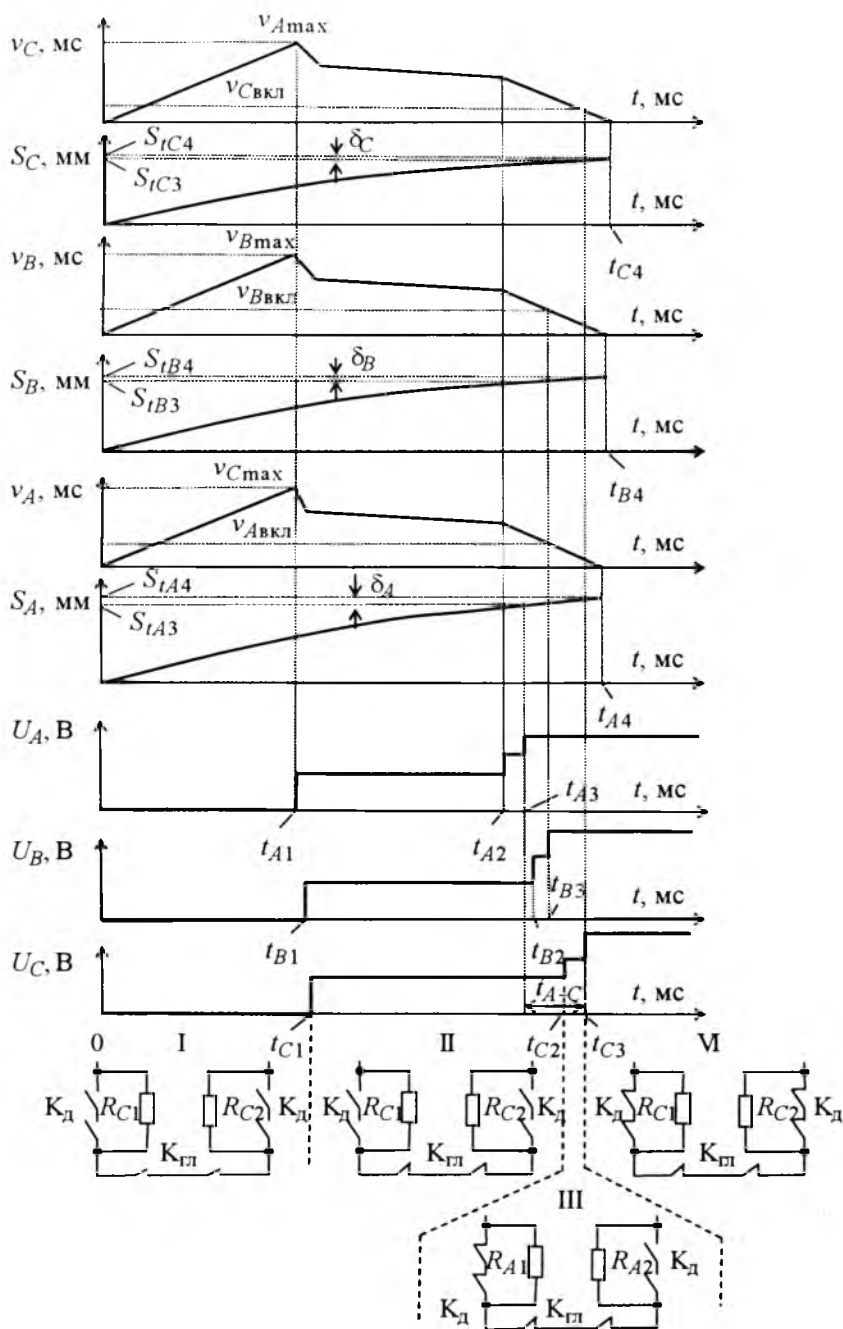


Рис.3. Совмещённые осциллограммы характеристик высоковольтных выключателей с шунтирующими сопротивлениями в режиме включения:

t_{x1} – время замыкания главных контактов; t_{x2} – время замыкания дугогасительных контактов первого плеча полюса; t_{x3} – время замыкания дугогасительных контактов второго плеча полюса; t_{x4} – время полного включения полюса; t_{A-C} – разновременность замыкания контактов между полюсами, мс; $\Delta S_B [t_{A3}, t_{B3}]$, $\Delta S_C [t_{A3}, t_{C3}]$ – разновременность замыкания контактов между полюсами АВ и АС по ходу контактной штанги, мм; δ_A , δ_B , δ_C – ход контактов (вжимов) каждого полюса; v_{Amax} , v_{Bmax} , v_{Cmax} – максимальная скорость соответственно в фазах А, В и С; $v_{Aвкл}$, $v_{Bвкл}$, $v_{Cвкл}$ – скорость включения соответственно в фазах А, В и С; S_{tx4} – полный ход подвижных частей выключателя; х – наименование фаз А, В, С

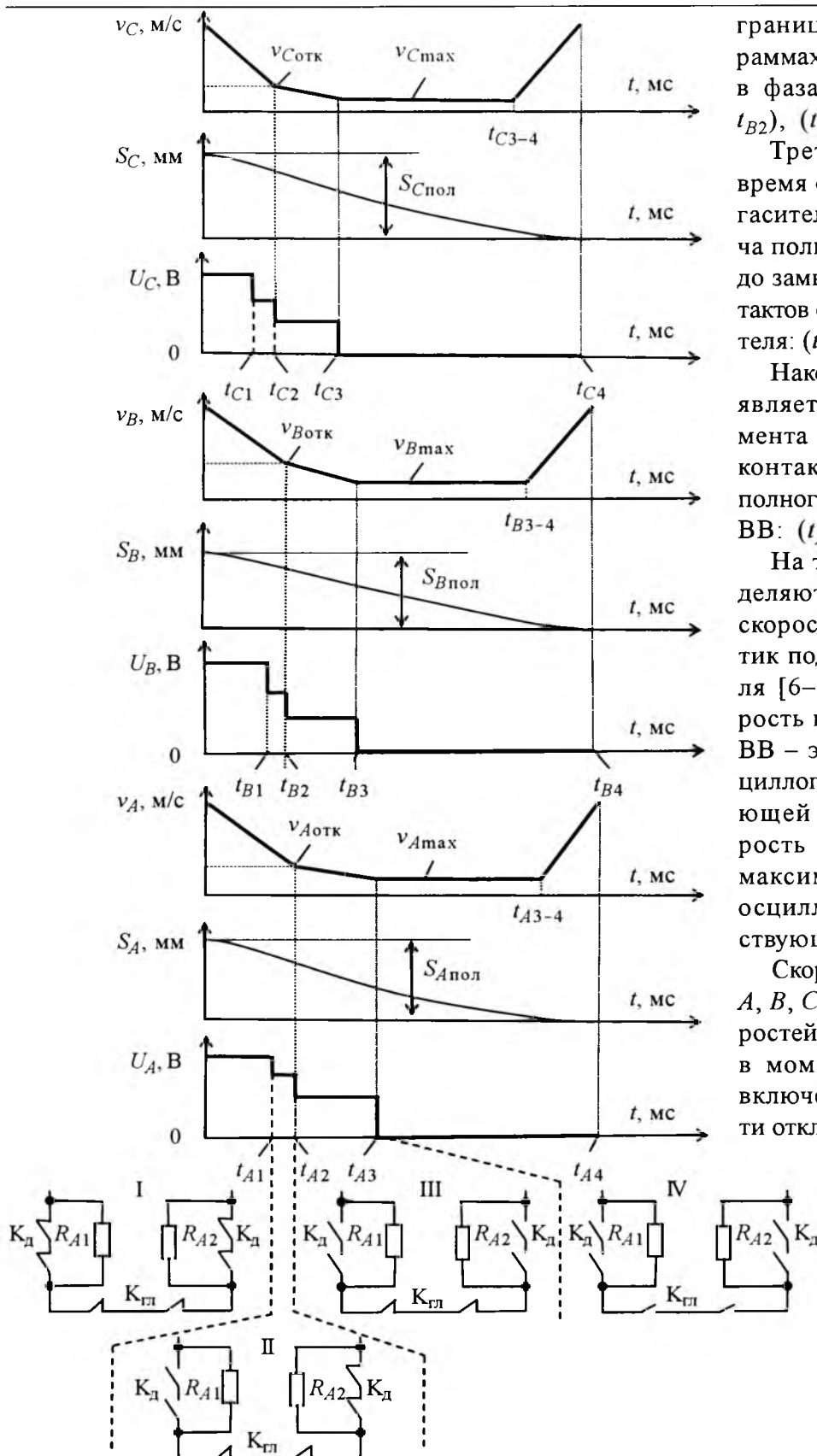


Рис. 4. Совмещённые осциллограммы характеристик масляного высоковольтного выключателя с шунтирующими сопротивлениями в режиме отключения:

t_{x1} – время размыкания дугогасительных контактов первого плеча полюса; t_{x2} – время размыкания дугогасительных контактов второго плеча полюса; t_{x3} – время размыкания главных контактов; t_{x4} – время полного отключения полюса; v_{Amax} , v_{Bmax} , v_{Cmax} – максимальная скорость соответственно в фазах A , B и C ; $v_{Aотк}$, $v_{Bотк}$, $v_{Cотк}$ – скорость отключения соответственно в фазах A , B и C ; $S_{пол}$ – полный ход подвижных частей выключателя; x – наименование фаз A , B , C .

границы интервалов на осциллограммах обозначены соответственно в фазах A , B и C : $(t_{A1}-t_{A2})$, $(t_{B1}-t_{B2})$, $(t_{C1}-t_{C2})$.

Третьим интервалом является время от момента замыкания дугогасительных контактов одного плеча полюсов дугогасительных камер до замыкания дугогасительных контактов обоих плеч полюсов выключателя: $(t_{A2}-t_{A3})$, $(t_{B2}-t_{B3})$, $(t_{C2}-t_{C3})$.

Наконец, четвёртым интервалом является интервал времени от момента замыкания дугогасительных контактов обоих плеч полюсов до полного останова подвижных частей ВВ: $(t_{A3}-t_{A4})$, $(t_{B3}-t_{B4})$, $(t_{C3}-t_{C4})$.

На третьем этапе способа определяются нормируемые параметры скоростных и ходовых характеристик подвижных частей выключателя [6–8]. Так, максимальная скорость полюса в режиме включения ВВ – это максимум кривой на осциллограмме скорости соответствующей фазы. Максимальная скорость в режиме отключения ВВ – максимум абсолютного значения осциллограммы скорости соответствующей фазы в этом режиме.

Скорости включения ВВ полюсов A , B , C находятся как значения скоростей в соответствующих полюсах в моменты t_{A3} , t_{B3} , t_{C3} в режиме включения выключателя, а скорости отключения ВВ полюсов A , B , C –

соответственно в моменты t_{A1} , t_{B1} , t_{C1} в режиме отключения выключателя.

Полный ход подвижных частей соответствующих полюсов ВВ находится по осциллограммам в режиме включения выключателя (рис.5) как перемещение на интервалах $\Delta S_A[0, t_{A4}]$, $\Delta S_B[0, t_{B4}]$, $\Delta S_C[0, t_{C4}]$. Ход (вжим) подвижных контактов полюсов ВВ определяется по осциллограммам в режиме включения выключателя как перемещение на интервалах $\Delta S_A[t_{A3}, t_{A4}]$, $\Delta S_B[t_{B3}, t_{B4}]$, $\Delta S_C[t_{C3}, t_{C4}]$.

Разновременность замыкания дугогасительных контактов симметричных плеч полюсов ВВ в режиме включения находится по осциллограммам перемещения на интервалах $\Delta S_A[t_{A2}, t_{A3}]$, $\Delta S_B[t_{B2}, t_{B3}]$, $\Delta S_C[t_{C2}, t_{C3}]$.

Разновременность размыкания дугогасительных контактов симметричных плеч полюсов ВВ в режиме отключения находится аналогично: $\Delta S_A[t_{A1}, t_{A2}]$, $\Delta S_B[t_{B1}, t_{B2}]$, $\Delta S_C[t_{C1}, t_{C2}]$.

Разновременность замыкания контактов (в миллиметрах) в режиме включения выключателя находится следующим образом: выбирается фаза с наиболее опережающим моментом времени включения и затем определяется перемещение двух других траверс ВВ за время от момента замыкания дугогасительных контактов включаемой первой фазы до момента замыкания дугогасительных контактов двух других фаз. Например, если фаза *A* включается первой, то определяется разновременность хода контактов вначале между фазами *A* и *B* из ходовой характеристики фазы *B* ($\Delta S_B[t_{A3}, t_{B3}]$), затем между фазами *A* и *C* из ходовой характеристики фазы *C* ($\Delta S_C[t_{A3}, t_{C3}]$) (рис.3). Аналогично находится разновременность размыкания контактов в режиме отключения ВВ (рис.4).

На следующем этапе способа автоматически сравниваются найденные параметры характеристик ВВ с нормируемыми значениями.

Кроме того, полученные характеристики ВВ могут сравниваться с ранее снятыми осциллограммами (например, сравниваются осциллограммы, полученные до и после ремонта выключателя).

В режиме отключения выключателя первый интервал – период от начала движения подвижных частей до размыкания дугогасительных контактов первого плеча полюса выключателя. Второй интервал – время от размыкания дуго-

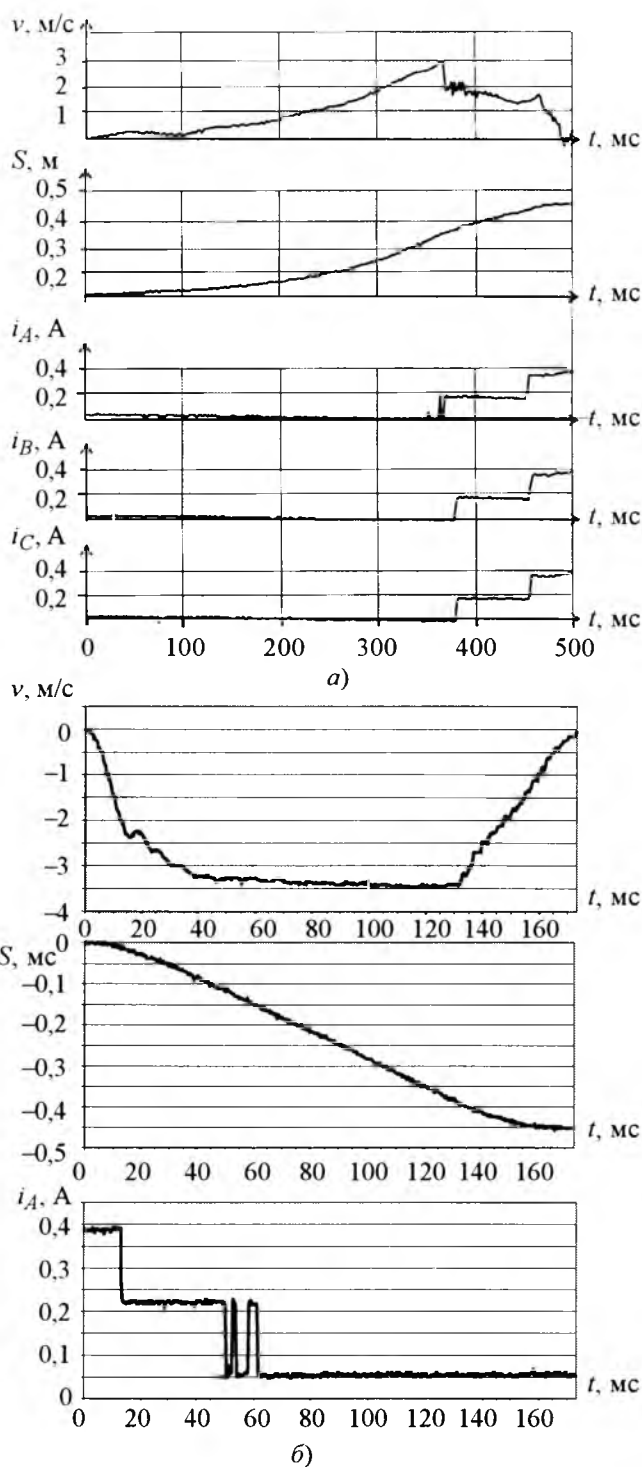


Рис.5. Осциллограммы скорости, хода подвижных частей одной фазы и тока в контактной системе всех трёх фаз высоковольтного выключателя типа У-110-2000-40У1 в режиме включения (а) и одной из фаз в режиме отключения (б)

гасительных контактов первого плеча полюса выключателя до размыкания дугогасительных контактов второго плеча полюса выключателя. Третий интервал – время от размыкания дугогасительных контактов второго плеча полюса

до размыкания главных контактов выключателя и, наконец, четвёртый интервал – время от момента размыкания главных контактов полюса до остановки подвижных частей выключателя.

Заметим, что продолжительность третьего интервала в режиме включения выключателя и длительность второго интервала в режиме отключения ВВ находятся в прямой зависимости от точной регулировки контактной системы и практически равны нулю в случае правильной её настройки.

Прецизионные сопротивления выбираются равными двойному шунтирующему сопротивлению выключателя. Шунтирующие сопротивления выключателя совместно с дополнительными активными прецизионными сопротивлениями в данном устройстве образуют три делителя напряжения.

Безынерционные преобразователи напряжения в ток на выходе делителей напряжения задают уровень, существенно превышающий уровень шумов датчиков тока цифрового регистратора.

Требуемые для осуществления способа осциллограммы включения и отключения регистрируются на данном устройстве путём трёх (по числу фаз ВВ) последовательных включений и отключений. При этом перед каждым последующим включением блок преобразователей скорости движения и хода подвижных частей в напряжение переносится на следующий полюс и закрепляется на внешнем подвижном стержне (ВПС). Далее фазные осциллограммы совмещаются по времени с помощью встроенного программного обеспечения цифрового регистратора. Для этого используются характерные точки – границы интервалов осциллограмм токов.

Благодаря высокой разрешающей способности ЦР и вследствие неодновременности работы дугогасительных контактов в разных плечах ВВ удаётся выявить не только различие моментов их замыкания и размыкания, но и определить шунтирующие сопротивления в каждом плече дугогасительных камер во всех трёх фазах (рис.6).

С помощью цифрового осциллографирования определяются и другие параметры ВВ: собственное время включения ($t_{c,в.в.}$) и отключения ($t_{c,в.о.}$).

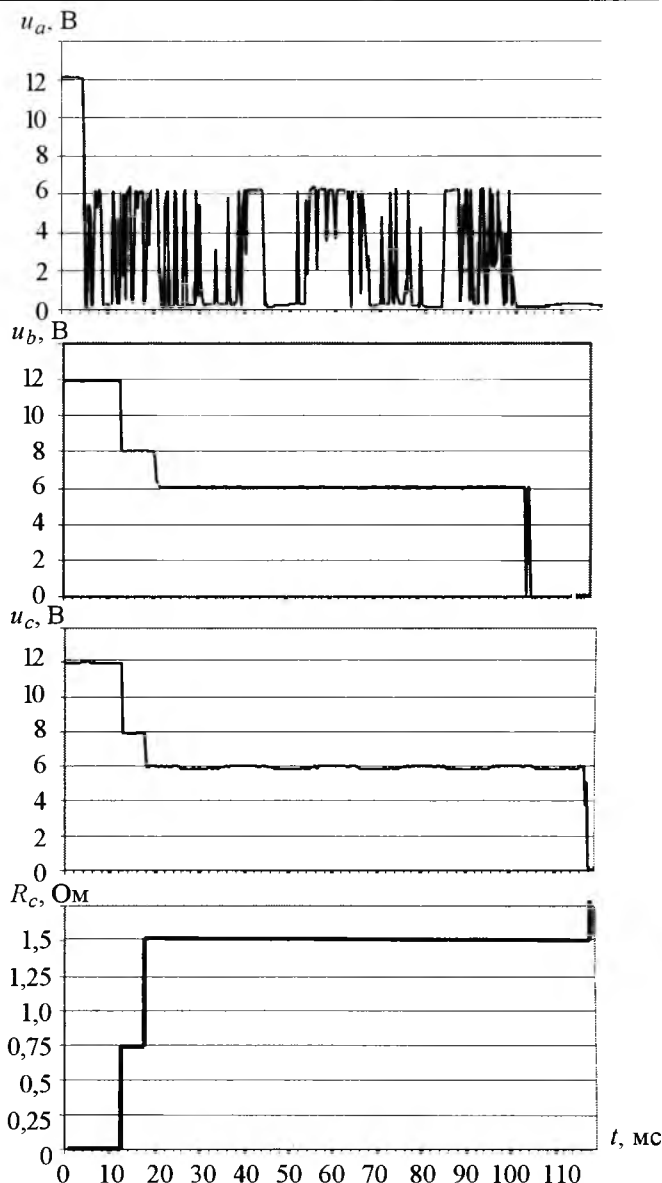


Рис.6. Осциллограммы напряжения на добавочных прецизионных активных сопротивлениях $R_{доп} = 1,5$ кОм фаз А, В, С и активное сопротивление фазы С при отключении масляного выключателя типа МКП-110Б-1000/630-20У1

На рис.7 представлена схема устройства для определения этих параметров [9–12]. Работа цифрового регистратора по этой схеме аналогична работе предыдущего устройства.

Во время, например, дистанционного включения ВВ замыкается двухполюсный выключатель АВ-1 и на электромагнит включения (ЭВ) выключателя и на канал датчика напряжения ДН цифрового регистратора подается напряжение от второго источника напряжения (ИОН). Аналоговые сигналы с датчика напряжения (БН) и датчиков тока (БДТ) поступают в ана-

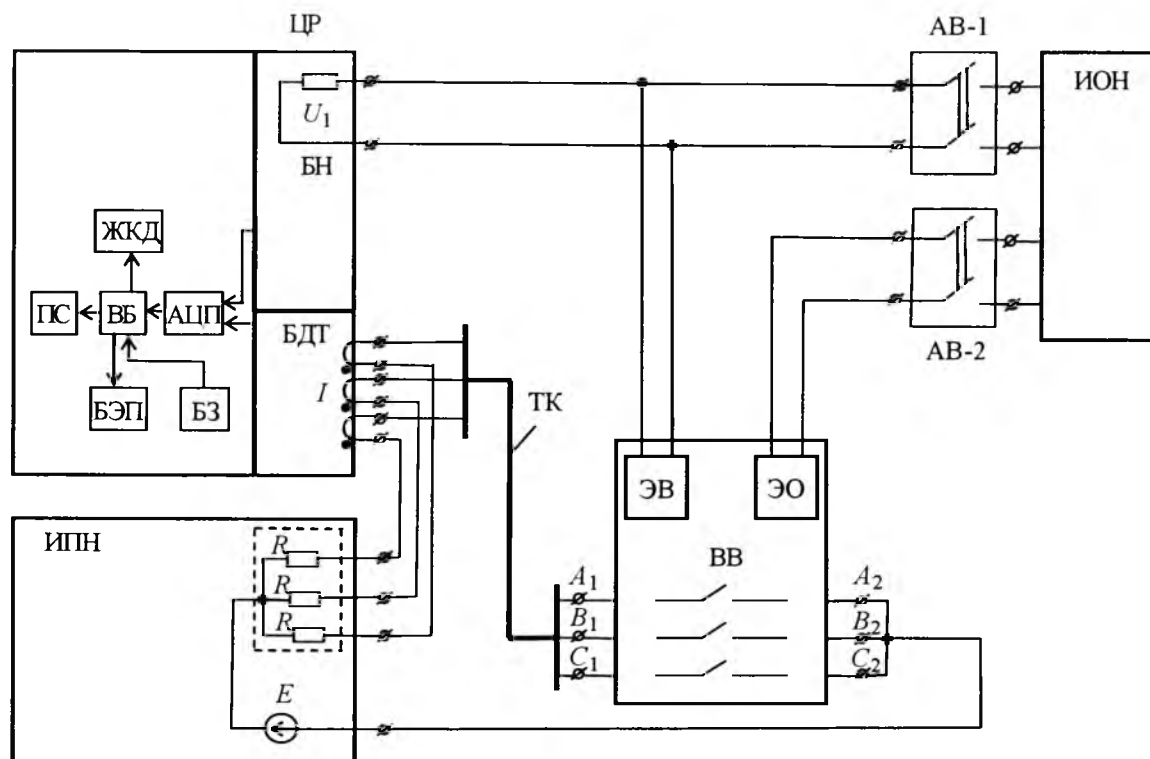


Рис. 7. Общий вид электрической схемы для определения параметров ВВ:

ЦР – цифровой регистратор (БН – блок датчиков напряжения; БДТ – блок датчиков тока; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; БЭП – блок энергонезависимой памяти; ВБ – вычислительный блок; БЗ – блок запуска цифровой регистрации; ЖКД – жидкокристаллический дисплей; ПС – порт связи с компьютером); ИПН – источник постоянного напряжения; ТК – трёхпроводный кабель; ВВ – высоковольтный выключатель

лого-цифровой преобразователь (АЦП), после чего они подаются в вычислительный блок (ВБ) и в случае превышения уставки на срабатывание происходит запуск пусковых органов и цифровой регистратор переводится в режим записи: оцифрованные предпусковые и послепусковые значения сигналов со входов напряжения и тока цифрового регистратора записываются в энергонезависимую память (БЭП) и передаются на жидкокристаллический дисплей (ЖКД).

На рис. 8, а, б приведена осциллограмма определения собственного времени включения ($t_{с.в.в.}$) маломасляного выключателя типа ВМТ-220 кВ.

В вычислительном блоке встроенный программный модуль измерения времени рассчитывает собственное время включения выключателя ($t_{с.в.в.}$) от переднего фронта цифrogramмы напряжения, поданного на ЭВ, до переднего фронта осциллограммы тока последней включившейся фазы выключателя.

Для определения собственного времени отключения ВВ выводы канала ДН цифрового

регистратора подсоединяется параллельно к выводам ЭО. Далее производят дистанционное отключение ВВ, которое сопровождается замыканием двухполюсного выключателя АВ-2, и на электромагнит отключения ЭО выключателя и на канал БН цифрового регистратора подаётся напряжение от источника напряжения ИОН. Далее процесс регистрации осциллограмм осуществляется аналогично описанному процессу включения ВВ. Расчёт собственного времени отключения ($t_{с.в.о.}$) производится до заднего фронта осциллограммы тока последней отключившейся фазы выключателя (рис. 8, в и г).

Основными достоинствами предложенного способа и устройства являются увеличение точности при определении характеристик ВВ и наглядность полученных результатов в виде цифровых осциллограмм.

Достоинствами метода и устройства также являются сокращение времени для подготовки и осуществления испытательного процесса, автоматизация измерения, автоматическая обработка измеряемых величин. Предложенное ус-

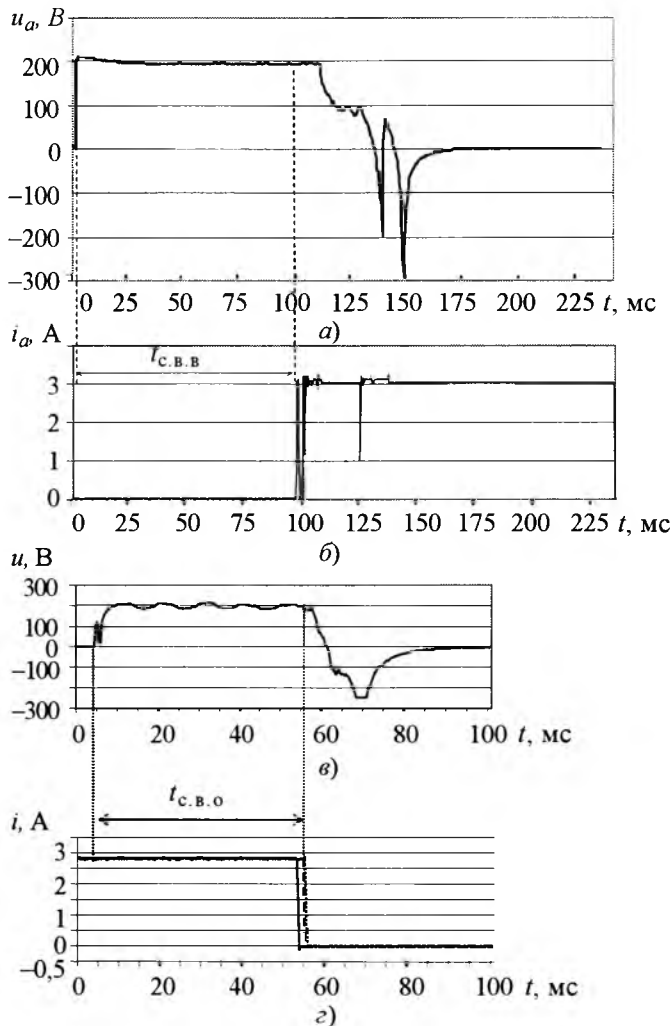


Рис.8. Осциллограммы в режиме включения выключателя типа ВМТ-220 кВ (а, б) и в режиме отключения масляного выключателя В-110 кВ типа У-110-2000-40У (в, г):

а – напряжения на катушке включения (ЭВ); б – тока фазы А; в – напряжения на электромагните отключения (ЭО); г – фазных токов в интервале времени от 0–100 мс (— $-i_A$; ... $-i_B$; --- $-i_C$)

тройство дополнительно позволяет автоматизировать протоколирование результатов измерений с выводом на печать и создать базу данных в электронном виде. Кроме того, по кривой осциллограммы напряжения на электромагнитах отключения ЭО и отключения ЭВ возможно определить их работоспособность.

Выводы

1. Предложен метод ускоренного контроля временных, скоростных и ходовых характеристик ВВ без вскрытия бака выключателя и слива трансформаторного масла.

2. Ускоренную диагностику всех типов выключателей можно осуществить с помощью

цифрового осциллографирования работы контактной системы совместно с регистрацией напряжений на катушках включения и отключения, а также путём синхронной многоканальной цифровой регистрации в режимах включения и отключения коммутационной аппаратуры осциллограмм электрических величин, пропорциональных скорости движения и хода подвижных частей всех полюсов и осциллограмм электрических величин, полученных преобразованием значений активных сопротивлений полюсов выключателя.

3. Целостность шунтирующих сопротивлений легко определяется без вскрытия бака и слива трансформаторного масла путём цифрового осциллографирования при выводе в ремонт ВВ в режиме его включения и отключения.

Список литературы

1. Чернышов Н.А., Ракевич А.Л. Аппаратура и метод раннего обнаружения дефектов в механизмах высоковольтных выключателей // Электрические станции. 2004. №11. С.61–65.
2. Апольцев Ю.А., Воробьев М.Н. Проблемы испытаний вакуумных выключателей // Энергетик. 2003. №1.
3. Михеев Г.М., Федоров Ю.А. Устройство цифрового осциллографирования для диагностики состояния контактора быстродействующего РПН силового трансформатора // Промышленная энергетика. 2005. №8. С.5–7.
4. Михеев Г.М., Федоров Ю.А., Шевцов В.М., Баталыгин С.Н. Диагностика устройств регулирования напряжения силовых трехфазных трансформаторов // Электрические станции. 2006. №4.
5. Пат. № 2290653 РФ. Способ оценки в силовых трехфазных трансформаторах параметров процесса переключения контактов контактора быстродействующего регулятора под нагрузкой без его вскрытия и устройство для его осуществления / Федоров Ю.А., Михеев Г.М., Шевцов В.М., Баталыгин С.Н. // Б.И. 2006. №36.
6. Руководство по капитальному ремонту высоковольтного трехполосного выключателя У-110-2000-40 У1 (У-110-8). М.: СПО Союзтехэнерго, 1983.
7. Сборник методических пособий по контролю состояния электрооборудования. Раздел 4 Методы контроля состояния коммутационных аппаратов. М.: ОРГРЭС, 1997.
8. Объём и нормы испытаний электрооборудования. (РД 34.45-51.300-97) // Под общ. ред. Б.А. Алексеева, Ф.Л. Когана, Л.Г. Мамиконянца. М.: НЦ ЭНАС, 2002.
9. Пат. на изобретение № 2280879 РФ. Устройство для определения параметров разряда защиты от перенапряжения / Федоров Ю.А., Михеев Георг. М., Михеев Ген. М. // Бюл. 2006. №21.
10. Пат. на изобретение № 2281523 РФ. Устройство для измерения сопротивления постоянному току обмоток трёхфазного силового трансформатора с выведенной нейтралью / Михеев Г.М., Федоров Ю.А., Баталыгин С.А., Шевцов В.М. // Бюл. 2006. №22.
11. Михеев М.Г., Федоров Ю.А., Баталыгин С.П., Шевцов В.М. Цифровой метод контроля круговой диаграммы РПН силовых трансформаторов // Электротехника. 2007. № 1.

12 Пат. РФ на изобретение № 2304345. Способ снятия в силовых трансформаторах круговой диаграммы регулятора под нагрузкой и устройство для его осуществления / Михеев Г.М., Федоров Ю.А., Баталыгин С.Н., Шевцов В.М. // Бюл. 2007. № 22.

Михеев Георгий Михайлович – главный инженер ООО "Инженерный центр", доцент кафедры "Электро-снабжение" Чувашского ГУ, канд. техн. наук. Окончил факультет электрификации промышленности Чувашского ГУ им. И.Н. Ульянова в 1982 г. Защитил диссертацию по теме "Автоматизация приборов для исследования и контроля диэлектрических жидкостей в энергетике" в 1998 г.

Фёдоров Юрий Алексеевич – ведущий научный сотрудник НИЛ ООО "Инженерный центр", заслуженный

изобретатель Чувашской Республики. Окончил электротехнический факультет Чувашского ГУ в 1986 г. и заочную аспирантуру. Член СИГРЭ.

Шевцов Виктор Митрофанович – доцент кафедры ТОЭ Чувашского ГУ, канд. техн. наук, заслуженный изобретатель Чувашской Республики. Окончил энергетический факультет Новочеркасского политехнического института в 1961 г. Защитил диссертацию по теме "Анализ и синтез схем защиты мощных выпрямителей" в 1971 г. Член СИГРЭ.

Баталыгин Сергей Николаевич – директор ООО "Инженерный центр". Окончил Краснодарское высшее военное командно-инженерное училище ракетных войск по специальности "Электроснабжение ракетно-космических комплексов" в 1997 г.

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

Сравнение режимных возможностей ветроэнергетических установок

ЦГОЕВ Р.С.

Проанализированы режимы ветроэнергетических установок отечественной разработки с учётом аэродинамических характеристик ветроколеса.

The analysis of domestic manufactured wind-driven powerplant modes is carried out, taking into account an aerodynamic characteristics of windwheel.

Ветроэнергетическая установка (ВЭУ) "Радуга 1" мощностью 1000 кВт смонтирована на Калмыцкой ВЭС в районе г. Элисты и предназначена для параллельной работы с энергосистемой. Основное оборудование ВЭУ размещено в гондоле. Регулирование частоты вращения трёхлопастного ветроколеса (ВК) обеспечивается изменением угла установки лопастей специальным механизмом с гидроприводом. Коэффициент вращающего момента ВК в функции от быстроходности ($C_m = F(Z)$) получен предприятием МКБ "Радуга" при продувках модели ветроколеса в аэродинамической трубе ЦАГИ. График функции, согласно технического проекта, приведён на рис. 1.

Рассчитанные по известным формулам [1–3] графики мощностных характеристик в функции скорости ветра $P_{ВК} = f(u)$ ветроколеса ВЭУ "Радуга 1" при $n = 10 \div 42$ об/мин с шагом 1 об/мин с учётом характеристики ВК по рис. 1 приведены на рис. 2. В зоне работы с переменной частотой вращения ($10 \leq n \leq 36$ об/мин) огибаю-

щая указанного семейства характеристик имеет быстроходность $Z = 7,3$ и коэффициент мощности $C_{P1} \approx 14,5/27 \approx 0,53704$, по сути являющийся КПД ветроколеса. В зоне работы с постоянной частотой вращения ($n = 36$ об/мин = const) мощность ветроколеса $P_{ВК} = 1,132$ МВт = const и соответствует режиму 3 генератора при $\cos \varphi = 1$ (столбец 6 таблицы). На рис. 2 также приведена характеристика $P_{ВК} = f(u)$ идеального ветроколеса (самый левый график) с коэффициентом мощности $C_{Pmax} = 16/27 \approx 0,59259$ (критерий Жуковского–Бетца).

На рис. 3 и 4 для сравнения показаны аналогичные рис. 1 и 2 характеристики для ветроколеса, имеющего лопасти с английским винтовым профилем [4]. При этом коэффициент мощности $C_{P2} \approx 11,5/27 \approx 0,42593$. В первом случае соотношение коэффициентов мощности составляет

$$\frac{C_{P1}}{C_{Pmax}} \approx 0,91, \text{ а во втором случае } \frac{C_{P2}}{C_{Pmax}} \approx 0,72.$$

Расчёты для ВК с другими профилями лопас-

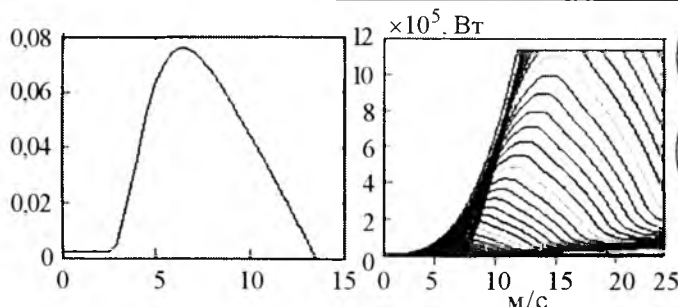


Рис.1. Характеристика $C_m = F(Z)$ Рис.2. Графики $P = F(U)$

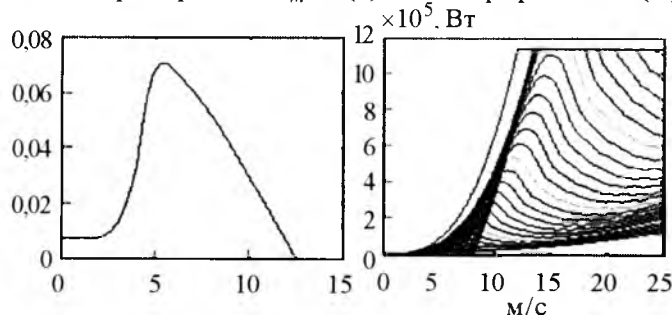


Рис.3. Характеристика $C_m = F(Z)$ Рис.4. Графики $P = F(U)$

тей, характеристики которых также приведены в [4], подтвердили эту тенденцию. Из этого следует, что ветроколесо ВЭУ "Радуга 1" для работы в зоне с переменной частотой вращения при изменениях скорости ветра (т.е. при $Z = \text{const}$) **удачно спроектировано**. Очевидно, это требует повышенной эффективности и от других элементов ВЭУ. Вращающий момент, развиваемый ВК, через главный вал и компенсирующие зубчатые муфты передаётся на трёхступенчатый многопоточный мультипликатор частоты вращения (МЧВ) и далее на генератор. Мультипликатор разработан на базе серийно выпускаемого в авиационной промышленности редуктора вертолёта МИ-26. Для ВЭУ используются с доработками две ступени редукции, а третья ступень разработана специально для МЧВ в двух вариантах: с одним и четырьмя выходами и с разными передаточными числами с учётом **трёх** [5, 6] вариантов модификаций генератора.

1. ВЭУ с четырьмя авиационными синхронными высокооборотными генераторами мощностью по 250 кВт с циклоконверторами (т.е. с тиристорными преобразователями частоты [7, 8] с непосредственной связью и естественной коммутацией (НПЧ)) в цепях статоров для связи с энергосистемой, схема которой приведена на рис. 5.

Для упрощения анализа примем, что ВЭУ содержит одну синхронную машину (СМ) мощ-

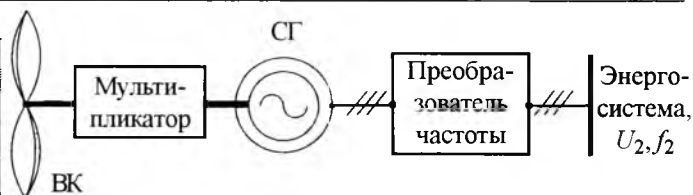


Рис.5. Схема ВЭУ с циклоконвертором в цепи статора синхронного генератора

ностью 1 МВт и один циклоконвертор с такой же "пропускной" мощностью. Примем, что параметры режимов на входе НПЧ имеют индекс 1, а на выходе – индекс 2. Так как частота на выходе НПЧ равна частоте энергосистемы ($f_2 = 50 \text{ Гц} = \text{const}$), то при мостовой схеме плеч НПЧ (пульсность схемы $m = 6$) минимальная частота напряжения на статоре СМ (т.е. на входе НПЧ) согласно [7] должна определяться условием:

$$f_{1\min} \geq \frac{f_2 \cdot 15}{m} = \frac{50 \cdot 15}{6} = 125 \text{ Гц}.$$

В [5, 6] указан рабочий диапазон частоты вращения ветроколеса 21–42 об/мин. Примем, что при $n_{\max} = 42 \text{ об/мин} = \text{const}$ ВК благодаря МЧВ синхронный генератор обеспечивает, например, частоту $f_1 = 400 \text{ Гц}$ статорного напряжения U_1 . Тогда согласно (1) диапазон частоты вращения ветроколеса можно расширить в сторону уменьшения нижнего предела:

$$n_{\min} = n_{\max} \frac{f_{1\min}}{f_1} = 42 \cdot \frac{125}{400} = 13,125 \text{ об/мин}.$$

При определённом по огибающей характеристике $Z = 7,3 = \text{const}$ этому соответствует скорость

$$\text{ветра } u = \frac{\pi R n_{\min}}{30z} = \frac{3,1416 \cdot 24 \cdot 13,125}{30 \cdot 7,3} = 4,52 \text{ м/с},$$

т.е. возможна работа ВЭУ во всём предусмотренном диапазоне [5, 6] скоростей ветра $5 \text{ м/с} \leq u \leq 25 \text{ м/с}$. Как следует из (1), (2), схема в принципе обеспечивает и указанный диапазон частоты вращения ветроколеса. Однако необходимо оценить и другие параметры. Рассмотрим мощности. Определим активную и реактивную мощности [7–9] на **входе** НПЧ при наиболее широко применяемом арксинусоидальном законе управления по параметрам на его выходе:

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta_{\text{НПЧ}}} = \frac{\lambda}{\eta_{\text{НПЧ}}} S_2 \cos \varphi_2; \quad (3)$$

$$Q_1 = -S_2 \frac{2}{l} \sum_{r=1}^l \left[\sin \left[\omega_2 t - (r-1) \frac{2\pi}{l} + \psi_{12} \right] \times \right. \\ \left. \times \sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \left[\omega_2 t - (r-1) \frac{2\pi}{l} + \psi_\beta \right]} \right], \quad (4)$$

где $\eta_{\text{НПЧ}}$ – КПД преобразователя;

$$S_2 = \frac{m l U_{1m} I_{2m}}{2\pi} \sin \frac{\pi}{m} - \text{полная мощность, отда-}$$

ваемая НПЧ в энергосистему; l – число фаз на выходе НПЧ; $\varphi_2 = \psi_{12} - \psi_\beta$ – угол нагрузки; $\omega_2 = 2\pi f_2$; $\omega_1 = 2\pi f_1$; U_{1m} , I_{2m} – амплитудные значения соответственно фазного напряжения на входе и фазного тока на выходе НПЧ.

В (4) коэффициент $0 \leq \lambda = U_{2m}/U_{1m} \leq 1$ определяет отношение выходного напряжения к входному напряжению НПЧ. Выясним, как это ограничение НПЧ повлияет на синхронную машину. При упомянутом арксинусоидальном законе угол управления [9]

$$\beta_r = \arcsin \left\{ \lambda \sin \left[\omega_2 t - (r-1) \frac{2\pi}{l} - \psi_\beta \right] \right\} = f(u_y), \quad (5)$$

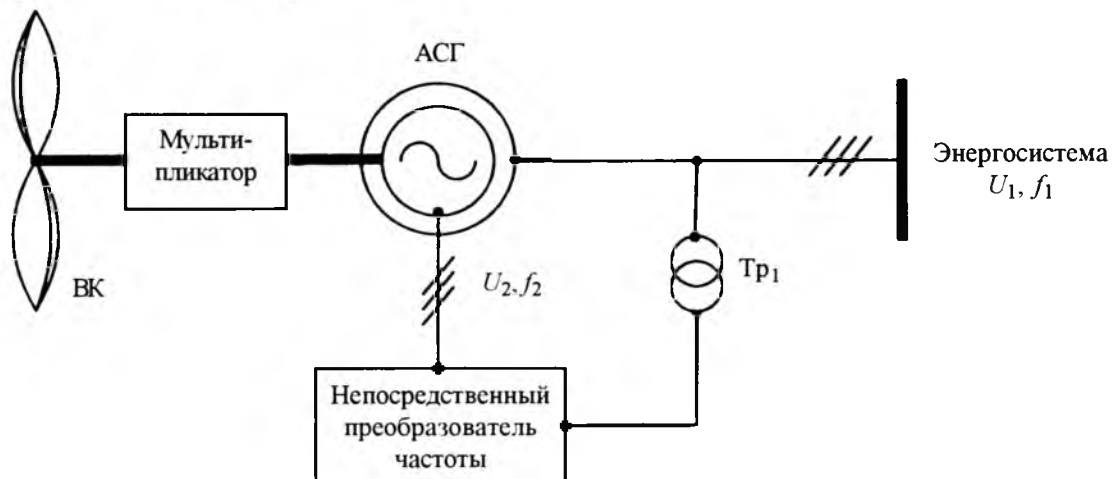
где u_y – закон управления.

Продифференцируем (5):

$$\frac{d\beta_r}{dt} = \frac{\lambda \omega_2 \cos \left[\omega_2 t - (r-1) \frac{2\pi}{l} + \psi_\beta \right]}{\sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \left[\omega_2 t - (r-1) \frac{2\pi}{l} + \psi_\beta \right]}}. \quad (6)$$

Функция (6) имеет экстремум по модулю при условии

$$\left\{ \cos \left[\omega_2 t - (r-1) \frac{2\pi}{l} - \psi_\beta \right] \right\} = 1. \quad (7)$$



Однако известно [7–9], что непрерывное управление НПЧ по (5) обеспечивается при выполнении условия

$$\left| \frac{d\beta_r}{dt} \right| < \omega_1. \quad (8)$$

С учётом (6) и (7) из (8) следует:

$$\omega_1 > \lambda \omega_2 = \frac{U_2}{U_1} \omega_2. \quad (9)$$

Так как параметры энергосистемы $U_2 = \text{const}$, $\omega_2 = \text{const}$, то из (9) следует, что снижение частоты напряжения статора синхронной машины с $f_1 = 400$ до 125 Гц потребует увеличения напряжения статора примерно в 3,2 раза, т.е. соответственного увеличения мощности системы возбуждения и класса изоляции машины. По сути, необходимо в 3,2 раза увеличить установленную мощность генератора независимо от того, выполнен он с постоянными магнитами или с системой возбуждения.

2. ВЭУ с асинхронизированным синхронным генератором (АСГ) с полупроводниковым преобразователем частоты (НПЧ) в цепи питания фазных обмоток ротора генератора.

Известно [10], что для АСГ необходимо соблюдение условия

$$\omega_{f2} = \omega_1 - \omega_p = \frac{(\omega_1 - \omega_p) \omega_1}{\omega_1} = -s \omega_1, \quad (10)$$

где $s = \frac{\omega_p - \omega_1}{\omega_1}$ – скольжение АСГ; для энергосистемы (рис.6) $\omega_1 = 2\pi f_1 = \text{const}$; ω_p – угловая скорость вращения ротора АСГ.

Из уравнения движения установившегося режима АСГ следует:

Рис.6. Схема ВЭУ с циклоконвертором в цепи многофазного ротора асинхронизированного генератора

$$M_m = M_s = \operatorname{Re} j(\vec{i} \cdot \vec{e}_f), \quad (11)$$

где M_m – механический момент, приложенный к валу АСГ; M_s – электромагнитный момент АСГ; \vec{i} – вектор тока статора АСГ; \vec{e}_f – сопряжённый вектор тока ротора, численно равный ЭДС.

Умножив (11) на ω_p , с учётом (10) получим: $M_m \omega_p = M_s(\omega_1 - \omega_{f2}) = M_s \omega_1 - M_s(-\omega_1 s)$. (12)

Из (12) следует баланс активных мощностей

$$P_m = P_s + sP_s = P_s + P_{f2}, \quad (13)$$

где P_{f2} – активная мощность обмоток возбуждения АСГ.

По аналогии с (3)

$$P_{f2} = P_{\text{НПЧ}} \eta_{\text{НПЧ}} = \lambda S_{f2} \cos \varphi_{f2}, \quad (14)$$

где $P_{\text{НПЧ}}$ – активная мощность непосредственно

на входе НПЧ; $S_{f2} = \frac{mIU_{1m}I_{2m}}{2\pi} \sin \frac{\pi}{m} = \frac{U_{f\text{пот}}e_f}{\mu x T_f}$ –

полная мощность возбуждения АСГ, выраженная через параметры машины; $U_{f\text{пот}}$ – потолочное значение напряжения возбуждения на кольцах ротора АСГ при $\lambda = 1$; μ – коэффициент магнитной связи между обмотками статора и ротора; x – индуктивное сопротивление статора; T_f – постоянная времени обмотки возбуждения АСГ.

Направление P_{f2} зависит от знака скольжения. При $s < 0$ мощность P_{f2} направлена в обмотки возбуждения АСГ, при $s > 0$ – наоборот. Соответственно активные мощности, отдаваемые в энергосистему,

$$P_{\text{ЭС}(s<0)} = P_{\text{БК}} \eta_{\text{МП}} \eta_{\text{АСГ}} \frac{(\eta_{\text{Трф}} \eta_{\text{НПЧ}} - s)}{(1-s)\eta_{\text{Трф}} \eta_{\text{НПЧ}}}, \quad (15)$$

$$P_{\text{ЭС}(s>0)} = P_{\text{БК}} \eta_{\text{МП}} \eta_{\text{АСГ}} \frac{(1+s\eta_{\text{Трф}} \eta_{\text{НПЧ}})}{(1+s)}, \quad (16)$$

где $P_{\text{БК}}$ – мощность ветроколеса; $\eta_{\text{МП}}$, $\eta_{\text{АСГ}}$, $\eta_{\text{Трф}}$, $\eta_{\text{НПЧ}}$ – КПД соответственно мультипликатора, АСГ, трансформатора и циклоконвертора.

Из (15) и (16) следует, что чем меньше скольжение АСГ, тем больше общий КПД ВЭУ. Кроме того, из (15) следует, что нижний предел скольжения АСГ ограничивается произведением КПД трансформатора и циклоконвертора. Как следует из (1), при выполнении условия

$f_2 \leq \frac{f_1 \cdot 15}{m}$ – и если $(\eta_{\text{Трф}} \eta_{\text{НПЧ}} - s) < 0$, то мощность $P_{s<0} < 0$, т.е. забирается из энергосистемы, что связано с циркуляцией мощности P_{f2} в контуре статор АСГ → трансформатор → циклоконвертор → ротор АСГ.

Реактивная мощность на входе НПЧ, как следует из (4), всегда отрицательна, т.е. всегда потребляется из узла подключения входа НПЧ. Рассмотрим частные случаи.

1. $\lambda \Rightarrow 0$, т.е. напряжение возбуждения стремится к нулю. Такое допущение в (4) даёт возможность оценить изменение реактивной мощности на входе НПЧ при нулевых или близких к нулю скольжениях АСГ. При трёхфазной обмотке возбуждения ($l = 3$) машины

$$Q_1 = -S_{f2} \cdot \frac{2}{3} \sum_{r=1}^3 \left| \sin \left[\omega_2 t - (r-1) \frac{2\pi}{3} + \psi_{12} \right] \right|. \quad (17)$$

Разложив модули функций в тригонометрический ряд, получим:

$$Q_1 = -S_{f2} \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{4}{\pi} \left(\frac{3}{2} + \frac{3}{35} \cos 6\omega t + \dots \right). \quad (18)$$

Даже с учётом высших гармоник разложения реактивная мощность на входе НПЧ имеет шесть колебаний за период скольжения АСГ в диапазоне

$$-1,333S_{f2} \leq Q_1 \leq -1,155S_{f2}. \quad (19)$$

При этом глубина колебаний составляет примерно 15,5% большего значения Q_1 .

2. $\lambda \Rightarrow 1$, т.е. напряжение возбуждения на кольцах ротора АСГ равно наибольшему (потолочному) значению. В установившемся режиме это возможно при работе АСГ с предельным значением скольжения. Учитывая в (4) только положительное значение корня, получаем:

$$Q_1 = -S_{f2} \cdot \frac{2}{l} \sum_{r=1}^l \left| \sin \left[\omega_2 t - (r-1) \frac{2\pi}{l} + \psi_{12} \right] \right| \times \\ \times \cos \left[\omega_2 t - (r-1) \frac{2\pi}{l} + \psi_{\beta} \right] = -S_{f2} \frac{1}{3} \times \\ \times \sum_{r=1}^3 \left| \sin \left[2\omega_2 t - (r-1) \frac{4\pi}{3} + \psi_{12} + \psi_{\beta} \right] + \sin \left[\varphi_{f2} \right] \right|. \quad (20)$$

Рассмотрим два крайних случая.

2.1. $\varphi_{f2} \Rightarrow 0$, т.е. нагрузка стремится к чисто активной. Это означает, что реактивная

Режимы ВЭУ с АСГ

Параметры режима ¹			Режим							
			1		2		3		4	
			скольжение АСГ $s_1 \approx 0$ ($f_1 \approx 0$ Гц), $n_{АСГ} = 1000$ об/мин, $n_{ВК} = 32,3$ об/мин		скольжение АСГ $s_2 \approx -0,4$ ($f_2 \approx -20$ Гц), $n_{АСГ} = 600$ об/мин, $n_{ВК} = 19,4$ об/мин		скольжение АСГ $s_3 \approx +0,114$ ($f_3 \approx +5,7$ Гц), $n_{АСГ} = 1114$ об/мин, $n_{ВК} = 36$ об/мин, $P_{ст} + P_f = 1000$ кВт		скольжение АСГ $s_4 \approx +0,175$ ($f_4 \approx +8,75$ Гц), $n_{АСГ} = 1175$ об/мин, $n_{ВК} = 38$ об/мин, $P_{ст} + P_f = 1175$ кВт	
			1	2	3	4	5	6	7	8
Активная, реактивная и полная мощности на клеммах обмоток статора АСГ	$P_{ст}, \frac{\text{кВт}}{\text{о.е.}}$	1	$\frac{+724}{+0,63}$	$\frac{+724}{+0,63}$	$\frac{+261}{+0,227}$	$\frac{+261}{+0,227}$	$\frac{+900}{+0,783}$	$\frac{+900}{+0,783}$	$\frac{+1000}{+0,87}$	$\frac{+1000}{+0,87}$
	$Q_{ст}, \frac{\text{квар}}{\text{о.е.}}$	2	$\frac{+567}{+0,493}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{+567}{+0,493}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{+567}{+0,493}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{+567}{+0,493}$	$\frac{0}{0}$
	$S_{ст}, \frac{\text{кВ} \cdot \text{А}}{\text{о.е.}}$	3	$\frac{920}{0,8}$	$\frac{724}{0,63}$	$\frac{624}{0,543}$	$\frac{261}{0,227}$	$\frac{1064}{0,925}$	$\frac{900}{0,783}$	$\frac{1150}{1}$	$\frac{1000}{0,87}$
	$\cos \varphi_{ст}$	4	0,788	1	0,418	1	0,846	1	0,87	1
ЭДС, напряжение возбуждения, полная, активная и реактивная мощности на кольцах ротора АСГ (на выходе НПЧ)	$E_f, \text{о.е.}$	5	2,948	2,017	2,453	1,183	3,219	2,396	3,387	2,617
	$U_f, \text{о.е.}$	6	2,948	2,017	118,695	109,741	31,349	28,634	50,1	45,99
	$S_f, \frac{\text{кВ} \cdot \text{А}}{\text{о.е.}}$	7	$\frac{14,03}{0,0122}$	$\frac{6,56}{0,0057}$	$\frac{469}{0,408}$	$\frac{209}{0,182}$	$\frac{163}{0,141}$	$\frac{110}{0,0962}$	$\frac{274}{0,238}$	$\frac{194}{0,169}$
	$P_f, \frac{\text{кВт}}{\text{о.е.}}$	8	$\frac{-14,03}{-0,0122}$	$\frac{-6,56}{-0,0057}$	$\frac{-104}{-0,091}$	$\frac{-104}{-0,091}$	$\frac{+100}{+0,087}$	$\frac{+100}{+0,087}$	$\frac{+175}{+0,152}$	$\frac{+175}{+0,152}$
	$Q_f, \frac{\text{квар}}{\text{о.е.}}$	9	0	0	$\frac{-457}{-0,398}$	$\frac{-181}{-0,158}$	$\frac{-129}{-0,111}$	$\frac{-46}{-0,041}$	$\frac{-211}{-0,183}$	$\frac{-84}{-0,074}$
	$\cos \varphi_f$	10	1	1	0,222	0,498	0,613	0,909	0,639	0,902
Мощности: полная на выходе, установленная тиристоров и реактивная (с учётом глубины её колебаний) на входе НПЧ при $U_{флот} = 118,695$	$S_{f2}, \frac{\text{кВ} \cdot \text{А}}{\text{о.е.}}$	11	$\frac{563}{0,49}$	$\frac{386}{0,336}$	$\frac{469}{0,408}$	$\frac{227}{0,197}$	$\frac{616}{0,536}$	$\frac{459}{0,399}$	$\frac{648}{0,564}$	$\frac{500}{0,435}$
	$P_{ТС}, \text{кВ} \cdot \text{А}$	12	5405	3706	4502	2179	5914	4407	6221	4800
	$\frac{Q_{НПЧ \max}}{Q_{НПЧ \min}}, \text{квар}$	13	$\frac{-650}{-750}$	$\frac{-446}{-515}$	$\frac{-457}{-465}$	$\frac{-197}{-217}$	$\frac{-700}{-810}$	$\frac{-518}{-600}$	$\frac{-718}{-825}$	$\frac{-543}{-632}$
	$\lambda = U_f / U_{флот}$	14	~0,025	~0,017	1	1	0,264	0,261	0,422	0,419
Мощности: полная на выходе, установленная тиристоров и реактивная (с учётом глубины её колебаний) на входе НПЧ при $U_{флот} = 109,741$	$S_{f2}, \frac{\text{кВ} \cdot \text{А}}{\text{о.е.}}$	15	$\frac{521}{0,454}$	$\frac{357}{0,311}$	$\frac{439}{0,382}$	$\frac{220}{0,192}$	$\frac{569}{0,495}$	$\frac{424}{0,369}$	$\frac{599}{0,521}$	$\frac{463}{0,403}$
	$P_{ТС}, \text{кВ} \cdot \text{А}$	16	5002	3427	4216	2112	5464	4067	5749	4442
	$\frac{Q_{НПЧ \max}}{Q_{НПЧ \min}}, \text{квар}$	17	$\frac{-603}{-695}$	$\frac{-413}{-475}$	$\frac{-428}{-435}$	$\frac{-190}{-210}$	$\frac{-645}{-744}$	$\frac{-479}{-553}$	$\frac{-658}{-757}$	$\frac{-503}{-585}$
	$\lambda = U_f / U_{флот}$	18	~0,027	~0,018	1	1	0,286	0,261	0,457	0,419
Мощность на валу ветроколеса	$P_{ВК}, \text{кВт}$	19	+820	+820	+117	+117	+1132	+1132	+1471	+1471
Мощности (без собственных нужд ВЭУ): активная и реактивная (с учётом глубины её колебаний) на клеммах энергосистемы	$P_{ЭС}, \frac{\text{кВт}}{\text{о.е.}}$	20	-724	-724	-152	-152	-996	-996	-1292	-1292
	$\frac{Q_{ЭС \max}}{Q_{ЭС \min}}, \text{квар}$ (при $U_{флот} = 118,695$)	21	$\frac{+83}{+183}$	$\frac{+446}{+515}$	$\frac{-102}{-110}$	$\frac{+197}{+217}$	$\frac{+133}{+243}$	$\frac{+518}{+600}$	$\frac{+151}{+258}$	$\frac{+543}{+632}$
	$\frac{Q_{ЭС \max}}{Q_{ЭС \min}}, \text{квар}$ (при $U_{флот} = 109,741$)	22	$\frac{+36}{+128}$	$\frac{+413}{+475}$	$\frac{-132}{-139}$	$\frac{+190}{+210}$	$\frac{+78}{+177}$	$\frac{+479}{+533}$	$\frac{+91}{+190}$	$\frac{+503}{+585}$

¹ Знаки "+" и "-" означают соответственно выдачу и потребление мощности элементом схемы

мощность на кольцах ротора стремится к нулю. Получим уравнение, аналогичное (17). С учётом высших гармоник разложения реактивная мощность на входе НПЧ имеет двенадцать колебаний за период скольжения АСГ в диапазоне

$$-0,667S_{f2} \leq Q_1 \leq -0,577S_{f2}. \quad (21)$$

При этом глубина колебаний также составляет примерно 15,5% большего значения Q_1 .

2.2. $\varphi_{f2} \Rightarrow \pi/2$, т.е. нагрузка стремится к чисто реактивной. При этом

$$Q_1 = -S_{f2} = \text{const.}$$

В диапазоне между случаями 2.1 и 2.2 есть режим $\varphi_{f2} \Rightarrow \pi/6$, когда с учётом высших гармоник разложения реактивная мощность на входе НПЧ имеет шесть колебаний за период скольжения АСГ в диапазоне

$$-0,833S_{f2} \leq Q_1 \leq -0,5S_{f2}. \quad (23)$$

При этом глубина колебаний составляет примерно 66,6% большего значения Q_1 .

Параметры режимов, рассчитанные по формулам (3), (4), (10)–(23), приведены в таблице. В расчётах использованы данные технического проекта ВЭУ, а также [5–7]: $P_{АСГ} = 1000$ кВт, $\mu = 0,94$, $\chi = 2,78$, $T_f = 273$ рад, $\cos\varphi = 0,87$, $\eta_{МП} = 0,95$, $\eta_{АСГ} = 0,93$, $\eta_{НПЧ} = \eta_{Трф} = 0,98$.

В расчётах КПД приняты постоянными. Для каждого из четырёх указанных в таблице режимов приведены в соответствующих столбцах: режим с выдачей реактивной мощности и режим с нулевой реактивной мощностью на клеммах обмоток статора АСГ (т.е. при $\cos\varphi = 1$). Очевидно, что определяющим для расчёта потолочного значения напряжения возбуждения является режим 2 (соответственно в таблице выделены полученные значения $U_{фпот} = 118,695$ и $U_{фпот} = 109,741$). Как следует из таблицы, во всех режимах с $\cos\varphi = 1$ из энергосистемы потребляется реактивная мощность, а в режимах 1 и 3 – до половины номинальной активной мощности АСГ. Кроме того, в режиме 3 статор АСГ недогружен по активной мощности, поэтому в режиме 4 рассмотрен режим номинальной нагрузки АСГ. Однако в этом случае необходимо дополнительно проверить трансмиссию ВЭУ на приемлемость этого режима.

Известно, что при нулевых или близких к нулю скольжениях АСГ тиристоры одной вентильной группы НПЧ проводят ток в течение длительного времени. Поэтому по методике, изложенной в [7], для трёхфазно-трёхфазного

преобразователя по шестипульсной мостовой схеме типовая (установленная) мощность полного комплекта тиристоров

$$P_{Т\Sigma} = 9,6S_{f2}. \quad (24)$$

Её значения приведены в строках 12 и 16 таблицы. Например, для режима 3 в столбце 6 при $U_{фпот} = 118,695$ $P_{Т\Sigma} = 4407$ кВт·А, а при $U_{фпот} = 109,741$ $P_{Т\Sigma} = 4067$ кВт·А.

3. Использование бесщёточного синхронного генератора (БСГ) с полупроводниковым преобразователем частоты со звеном постоянного тока в цепи статора для связи с энергосистемой. Схема аналогична рис. 5, но преобразователь частоты содержит неуправляемый выпрямитель на стороне статора синхронной машины и инвертор, ведомый сетью, на стороне сети. По сути, это известная классическая схема [11]. Такая компоновка позволяет обеспечить работу ВЭУ в указанном выше диапазоне скоростей ветра. Следует отметить, что инвертор потребляет из энергосистемы примерно $0,5P_d$, где P_d – номинальная мощность в цепи постоянного тока, равная произведению напряжения ХХ на номинальный ток. В [7] указано, что типовая мощность диодов может быть приведена к типовой мощности тиристоров с коэффициентом 0,45. Тогда для выпрямительно-инверторного блока (ВИБ) со звеном постоянного тока типовая (установленная) мощность полного комплекта тиристоров при $P_d = 1000$ кВт равна

$$P_{Т\Sigma(1)} = P_T + P_D = 3P_d + 0,45(3P_d) = 4350 \text{ кВт·А.}$$

Соотношение типовых (установленных) мощностей полных комплектов тиристоров для ВЭУ с АСГ (соответственно при $U_{фпот} = 118,695$ и при $U_{фпот} = 109,741$) и с БСГ составляет $P_{Т\Sigma}/P_{Т\Sigma(1)} = 4407/4350 = 1,013$ и $P_{Т\Sigma}/P_{Т\Sigma(1)} = 4067/4350 = 0,935$.

Выводы

1. Ветроколесо ВЭУ "Радуга 1" в зоне работы с переменной частотой вращения с постоянным коэффициентом быстроходности обеспечивает наибольший коэффициент мощности (КПД) по сравнению с другими известными профилями лопастей ветроколеса.

2. Компоновка ВЭУ связью синхронной машины с энергосистемой через НПЧ для обеспечения работы во всём предусмотренном диапазоне скоростей ветра $5 \leq u \leq 25$ м/с, требует увеличения напряжения статора пример-

но в 3,2 раза, т.е. соответственного увеличения мощности системы возбуждения и класса изоляции машины. По сути, это потребует в 3,2 раза увеличить установленную мощность генератора независимо от того, выполнен он с постоянными магнитами или с системой возбуждения.

3. Использование асинхронизированного синхронного генератора (АСГ) с преобразователем частоты с непосредственной связью (НПЧ) в цепи питания фазных обмоток ротора с ростом скольжения АСГ снижает общий КПД ВЭУ. При нулевых или близких к нулю скольжениях АСГ реактивная мощность на входе НПЧ, потребляемая из узла подключения, имеет шесть колебаний за период скольжения АСГ. При этом глубина колебаний составляет примерно 15,5% большего значения Q_1 . В рабочем диапазоне есть режим $\varphi_{f2} \Rightarrow \pi/6$, когда глубина колебаний составляет примерно 66,6% большего значения Q_1 . Во всех режимах с $\cos\varphi = 1$ по статору АСГ ВЭУ из энергосистемы потребляет реактивную мощность в режиме $P_{ст} + P_f = 1000$ кВт, а в режиме с нулевым скольжением – до половины номинальной активной мощности АСГ.

4. С учётом особенностей режимов ВЭУ с АСГ и с БСГ и соотношения типовых (установленных) мощностей полных комплектов тиристорных НПЧ (для АСГ) и ВИБ (для БСГ) перспективна ВЭУ с БСГ.

Список литературы

1. Андрианов В.Н., Быстрицкий Д.Н., Вашкевич К.П., Секторов В.Р. Ветроэлектрические станции. М.: Госэнергоиздат, 1960.
2. Шефтер Я.И. Использование энергии ветра. М.: Энергоатомиздат, 1983.
3. Твайделл Дж., Уэйр А. Возобновляемые источники энергии. М.: Энергоатомиздат, 1990.
4. Вашкевич К.П. Аэродинамические характеристики ветродвигателей ветроэлектрических установок // Изв. АН. Энергетика. 1997. №3.
5. Селезнев И.С. Состояние и перспективы работ МКБ "Радуга" в области ветроэнергетики // Конверсия в машиностроении – Conversion in machine building of Russia, 1995. №5.
6. Дьяков А.Ф., Пермиков Э.М., Шакарян Ю.Г. Ветроэнергетика России. Состояние и перспективы развития. М.: Издательство МЭИ, 1996.
7. Жемеров Г.Г. Тиристорные преобразователи частоты с непосредственной связью. М.: Энергия, 1977.
8. Бернштейн И.Я. Тиристорные преобразователи частоты без звена постоянного тока. М.: Энергия, 1968.
9. Блоцкий Н.Н. Электромагнитные процессы в преобразователях частоты с непосредственной связью // Труды ВНИИЭ. 1972. Вып.41.
10. Ботвинник М.М., Шакарян Ю.Г. Управляемая машина переменного тока. М.: Наука, 1969.
11. Аракелян А.К., Афанасьев А.А., Чиликин М.Г. Вентильный электропривод с синхронным двигателем и зависимым инвертором. М.: Энергия, 1977.

Цгоев Руслан Сергеевич – профессор кафедры "Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии" МЭИ (ТУ), доктор техн. наук. Окончил электроэнергетический факультет МЭИ в 1971 г. по специальности "Кибернетика электрических систем". В 1992 г. защитил докторскую диссертацию по управляемым связям электроэнергетических систем.

ЭЛЕКТРОПРИВОД

Снижение ударных динамических нагрузок асинхронного тягового привода перспективного тепловоза при аварийных режимах

ФЕДЯЕВА Г.А.

На основе компьютерного моделирования определены ударные динамические нагрузки при сквозных коротких замыканиях в инверторе напряжения асинхронного тягового привода магистрального тепловоза и намечены пути их снижения.

Stress dinamic loaders taking place during clutch break in voltage inverters of diesel locomotive asynchronous traction drive are determine and ways of theirs lowering are fix on the basis of computer modeling.

В асинхронных тяговых приводах (АТП) современных тепловозов наибольшее распространение получили электрические схемы, в которых для питания асинхронных двигателей (АД) применяются автономные инверторы напряжения (АИН) на IGBT (биполярных транзисторах с изолированным затвором). На магистральном тепловозе 2ТЭ25А, разрабатываемом Брянским машиностроительным заводом (БМЗ) совместно с Всероссийским научно-исследовательским и конструкторско-технологическим институтом подвижного состава (ВНИКТИ МПС), также используется схема с АИН. В таких схемах защиту от аварийных режимов на аппаратном и алгоритмическом уровнях обеспечивают специальные интеллектуальные драйверы, управляющие IGBT-модулями, однако полностью исключить аварийные режимы, например пробой транзисторов, не удаётся. Для повышения надёжности тягового привода необходимо оценить ударные динамические нагрузки в нештатных режимах на стадии проектирования и выработать рекомендации по их снижению.

Наиболее опасным является сквозное КЗ в АИН, сопровождаемое замыканием фаз АД через пробитые IGBT и обратные диоды, которое вызывает ударный тормозной электромаг-

нитный момент двигателя, в 4–6 раз превышающий номинальный момент [1, 2]. Ударный электромагнитный момент может как смягчаться, так и усиливаться в механической части привода. В силу того, что АТП тепловоза является сложной нелинейной электромеханической системой, включающей электрическую часть, механическую передачу и нагрузку (локомотив и поезд), для определения ударных динамических нагрузок в элементах тягового привода следует использовать компьютерное моделирование.

С целью качественной и количественной оценки ударных динамических нагрузок при аварийных режимах разработана математическая модель [3], включающая электрическую, механическую и управляющую подсистемы АТП тепловоза. Расчёт электрической схемы привода оси (рис. 1), в которую входят источник питания (синхронный генератор), статический преобразователь (выпрямитель и инвертор), цепь реостатного торможения, фильтры выпрямителя и инвертора, асинхронный двигатель (АД), выполняется на основе контурных топологических уравнений в матричной форме:

$$\|B\| \|U_B\| = 0, \quad (1)$$

где $\|B\|$ – блочная топологическая матрица; $\|U_B\|$ – блочная матрица напряжений ветвей.

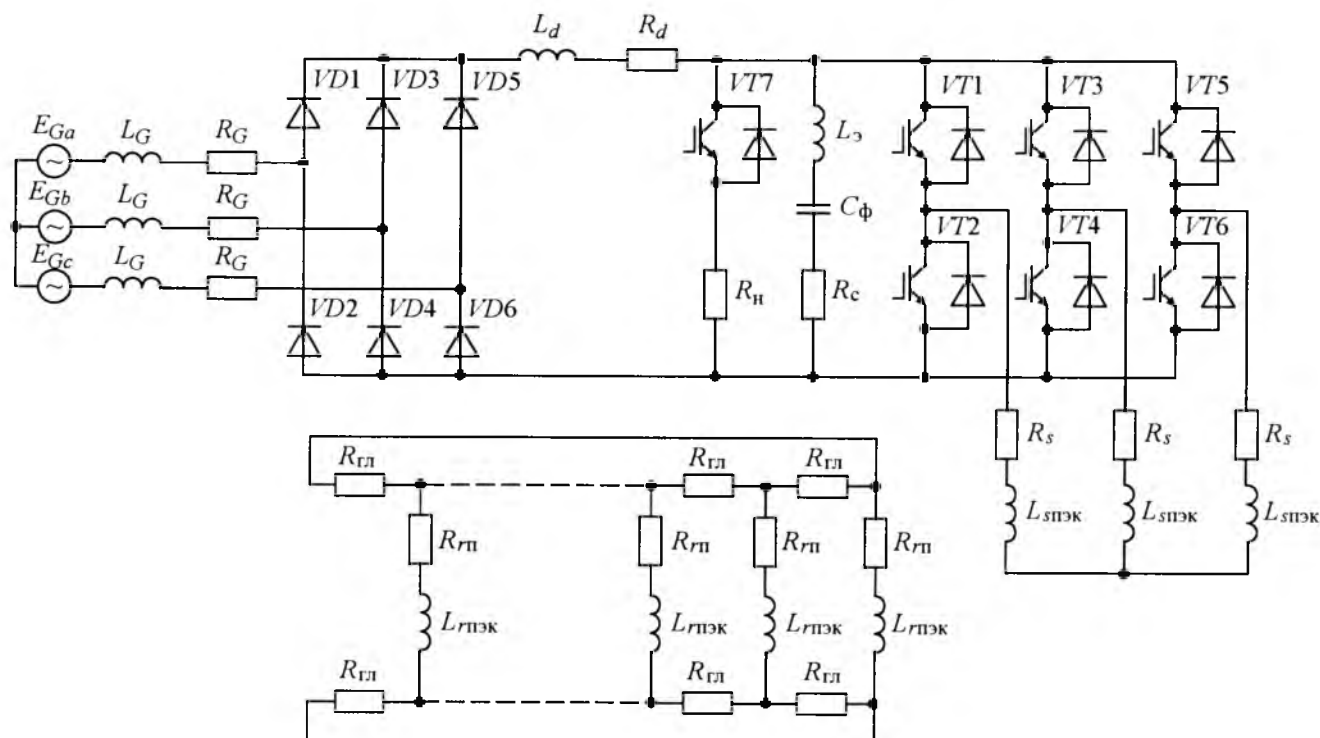


Рис.1. Схема силовой электрической части АТП оси тепловоза при представлении АД на основе метода проводимостей зубцовых контуров

В случае изменения структуры силовой схемы изменяется только матрица $\|B\|$, а система контурных дифференциальных уравнений, сформированная на основе (1), остаётся неизменной:

$$\frac{d \|L_k\| \|I_{Lk}\|}{dt} = \|E_k\| - \|R_k\| \|I_{Lk}\|,$$

где $\|L_k\|$ – матрица контурных индуктивностей; $\|I_{Lk}\|$, $\|E_k\|$, $\|R_k\|$ – матрицы контурных токов, ЭДС и контурных сопротивлений.

При формировании матрицы суммарных контурных ЭДС учитываются напряжения на конденсаторах u_C , определяемые из уравнения

$$\frac{d \|u_C\|}{dt} = \left\| \frac{i_B}{C_B} \right\|,$$

где i_B – токи ветвей, содержащих конденсаторы; C_B – ёмкости конденсаторов соответствующих ветвей;

$$\|i_B\| = \|B\|^t \|I_k\|;$$

t – знак транспонирования.

Работа полупроводниковых вентилях моделируется изменением матрицы сопротивлений ветвей по определённому закону в соответствии с алгоритмом управления.

Обмотки статора и ротора АД являются ветвями силовой электрической схемы и учитываются при составлении топологической матрицы. При этом АД в данной схеме в зависимости от поставленных задач может рассчитываться либо классическими методами, базирующимися на представлении реального двигателя трёхфазной "обобщённой машиной", либо с использованием метода проводимостей зубцовых контуров (ПЗК) [4].

На строящемся магистральном тепловозе 2ТЭ25А применено опорно-осевое подвешивание тяговых двигателей. Модель механической подсистемы тягового привода оси локомотива с опорно-осевым подвешиванием, составленная с использованием результатов [5, 6] учитывает угловые колебания элементов передачи в продольной вертикальной плоскости по отношению к оси пути, определяющим образом влияющие на абсолютное скольжение ротора и электромагнитный момент АД. В расчётную схему включён один колёсно-моторный блок тележки, содержащий ротор, остов двигателя, и колёсную пару. Упруго-диссипативные свойства вала ротора и подвески остова АД учи-

тываются введением соответствующих жёсткостей и коэффициентов вязкого трения. Тяговое усилие от колёсных пар передаётся через контакт колесо-рельс на локомотив. Сила тяги определяется через сцепной вес и коэффициент сцепления:

$$F_k = P_{сц} \Psi,$$

где F_k – сила тяги колеса; $P_{сц}$ – сцепной вес; Ψ – коэффициент сцепления.

Коэффициент сцепления колеса и рельса

$$\Psi = K \Psi_0,$$

где Ψ_0 – потенциальный коэффициент сцепления; K – коэффициент сцепления в относительных единицах, $K = \Psi / \Psi_0$.

Значения Ψ_0 в зависимости от скорости движения локомотива задаются таблично с интерполяцией в промежуточных точках на основе сплайн-функции. Для моделирования влияния остальных факторов (например, наезд на масляное пятно, подсыпка песка) Ψ_0 можно варьировать.

Коэффициент сцепления в относительных единицах K определяется в функции скорости проскальзывания колёс, выраженной в процентах по отношению к скорости локомотива, на основе нелинейной характеристики сцепления, которая задаётся по точкам с интерполяцией промежуточных значений.

В случае пробоя транзисторов трёхфазное замыкание АД, а значит и ударный тормозной электромагнитный момент, отключением от источника питания устранить нельзя. При этом система управления двигателями также существенной роли не играет, так как для оценки динамических нагрузок при сквозных КЗ в АИН не важно, каким образом двигатель доехал до аварии.

Значение ударного электромагнитного момента определяют скорость ротора и значение магнитного потока АД в момент аварии [7]. Поэтому чтобы оценить влияние механической передачи на ударные динамические нагрузки, моделирование КЗ производилось для режимов, близких к номинальному, когда ударный момент двигателя максимален. Использовалась классическая скалярная система управления: в процессе пуска до номинальной скорости амплитуда напряжения, приложенного к обмотке статора, изменялась по закону

$$U_1 = U_0 + k_u f_1,$$

где U_1 – амплитуда напряжения статора; f_1 – частота напряжения статора; k_u – коэффициент пропорциональности; U_0 – начальное значение напряжения.

Адекватность модели АТП была проверена путём сравнения результатов моделирования с осциллограммами [3], полученными на экспериментальной установке. При хорошем совпадении качественной картины процессов максимальная погрешность моделирования составляет 19%.

С целью определения путей снижения ударных динамических нагрузок выполнялось моделирование аварийных режимов для построенного на БМЗ опытного образца магистрального тепловоза 2ТЭ25А с двигателями ДТА470. В результате установлено, что в АТП с опорно-осевым подвешиванием тяговых двигателей ударный тормозной электромагнитный момент АД смягчается в элементах подвески остова АД за счёт эффекта планетарного механизма редуктора: остов (корпус) двигателя как бы "обкатывается" по зубчатой передаче, поворачиваясь вокруг оси колёсной пары. При этом ударные нагрузки на валу ротора существенно снижаются. В качестве примера на рис.2–5 приведены результаты моделирования сквозного

го КЗ в АИН при номинальной скорости тепловоза (25 км/ч) и разных параметрах механической передачи.

Электромагнитный момент и ток АД (рис.2) от параметров механической передачи практически не зависят и имеют один и тот же вид для всех рассматриваемых опытов (рис.3–5).

Существенное влияние на характер динамических процессов оказывают коэффициент эквивалентного вязкого трения подвески остова двигателя β_d и жёсткость подвески C_d . Ударный тормозной электромагнитный момент вызывает срыв сцепления и снижение скорости ротора и колёсной пары, но при малых значениях коэффициента β_d изменение скорости колёсной пары носит колебательный (рис.3,а), а при больших – импульсный характер (рис.4,а).

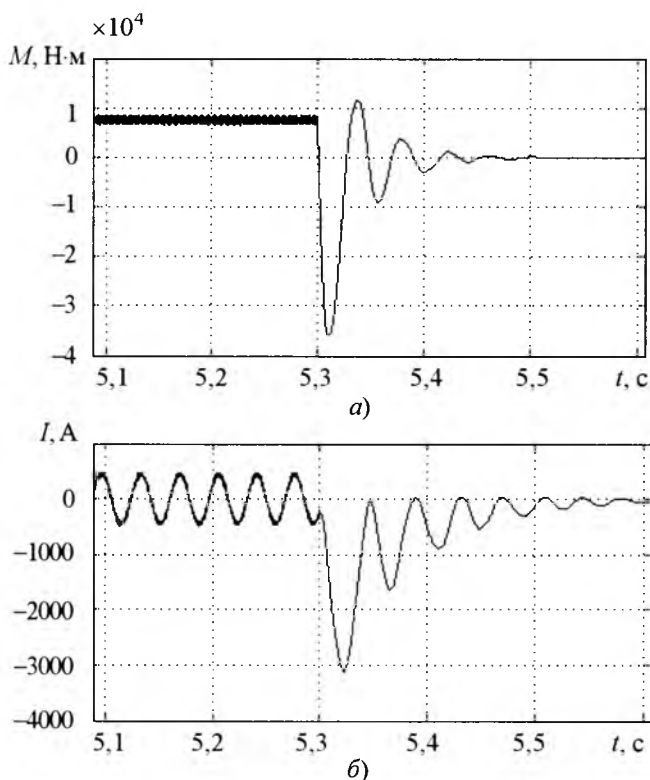


Рис.2. Результаты моделирования сквозного КЗ в АИН: а – электромагнитный момент АД; б – ток фазы АД

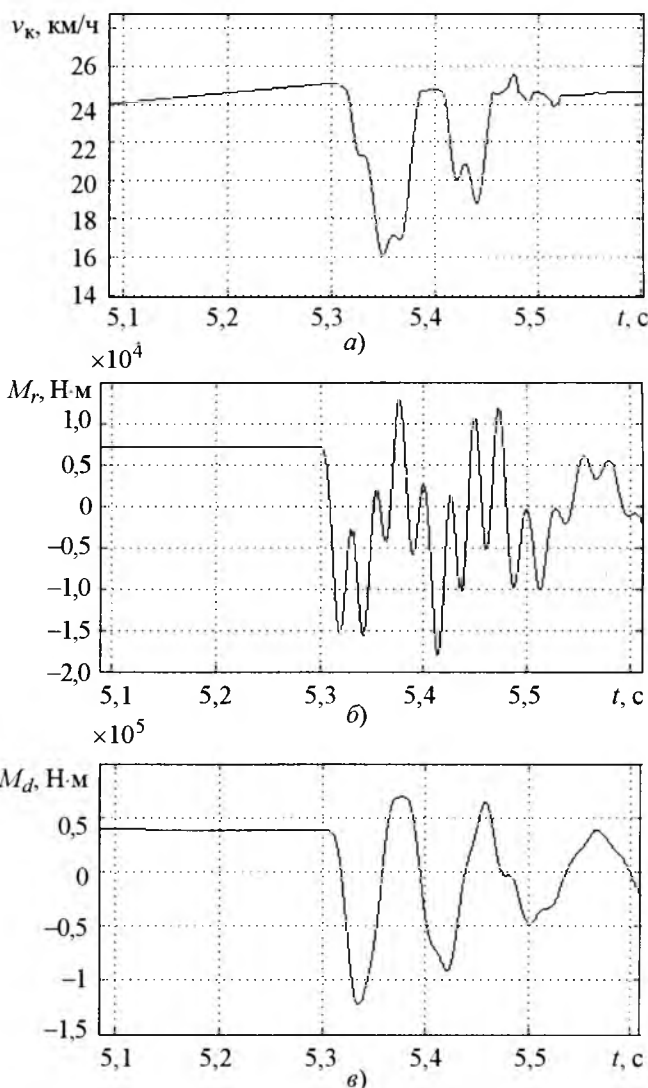


Рис.3. Результаты моделирования сквозного КЗ в АИН при коэффициенте эквивалентного вязкого трения подвески двигателя $\beta_d = 5$ кН·с/м:

а – скорость колесной пары; б – момент на валу ротора АД; в – момент в подвеске остова АД

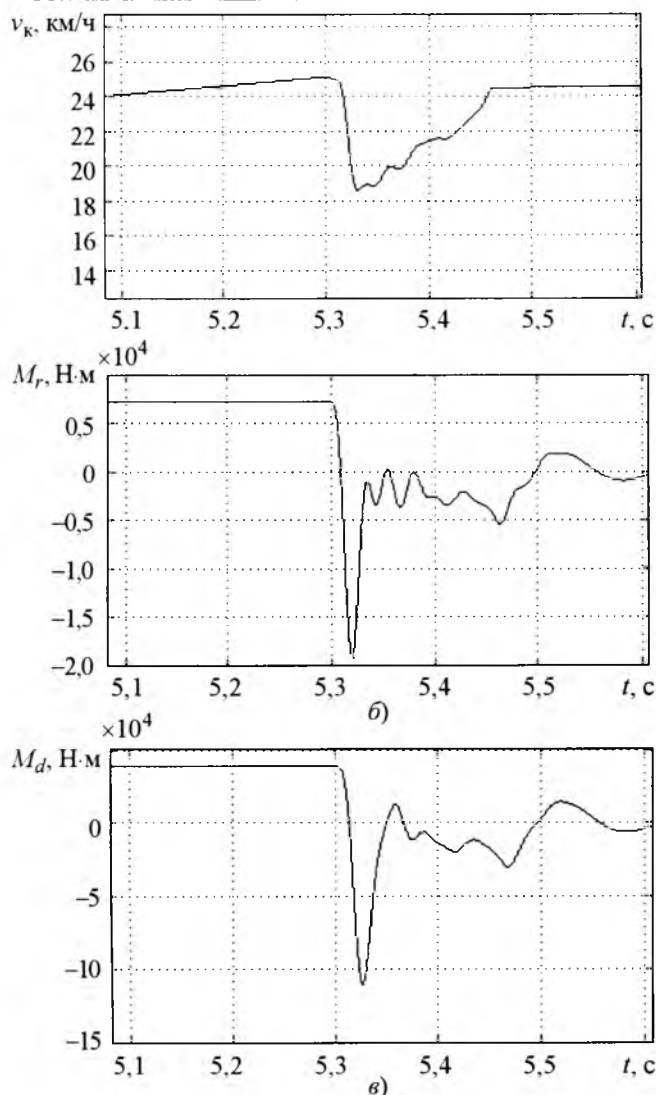


Рис.4. Результаты моделирования сквозного КЗ в АИН при коэффициенте эквивалентного вязкого трения подвески двигателя $\beta_d = 40$ кН·с/м:

а – скорость колесной пары; б – момент на валу ротора АД; в – момент в подвеске остова АД

Меняются также качественные и количественные значения динамических моментов на валу ротора и в подвеске остова (рис.3, 4,б,в). Номинальный момент двигателя ДТА470 (электромагнитный и на валу ротора) $M_n = 7759$ Н·м. В подвеске остова АД момент номинального режима

$$M_{dn} = (\mu + 1)M_n = 41976 \text{ Н·м,}$$

где $\mu = 4,41$ – передаточное число редуктора.

Ударный электромагнитный момент (рис.2,а) превышает номинальный в 4,7 раза. Ударные электромагнитные моменты в элементах механической передачи: на валу ротора и в подвеске остова при коэффициенте эквивалентного вяз-

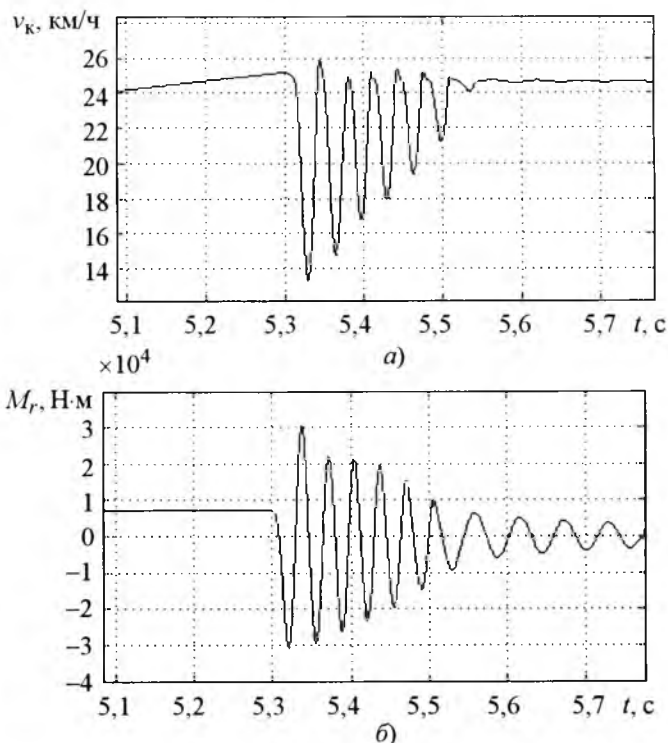


Рис.5. Результаты моделирования сквозного КЗ в АИН без учёта колебаний остова АД:

а – скорость колесной пары; б – момент на валу ротора АД

кого трения подвески остова двигателя $\beta_d = 5$ кН·с/м превышают значения номинального режима в 2,3 и 3 раза соответственно (рис.3,б,в). Увеличение коэффициента вязкого трения до $\beta_d = 40$ кН·с/м повышает ударный момент на валу ротора до $2,45 M_n$ и снижает ударный момент в подвеске остова до $2,6 M_{dn}$ (рис.4,б,в). Уменьшение жёсткости подвески двигателя также ведёт к существенному снижению ударных нагрузок в подвеске остова и незначительному увеличению нагрузок на валу ротора.

Моделирование сквозных КЗ в АИН без учёта колебаний остова (при увеличении его инерционности в 100000 раз) показывает, что динамические нагрузки на валу ротора возрастают при аварийном режиме в 4–4,5 раза по отношению к номинальному значению.

Выводы

1. В тяговых приводах с опорно-осевым подвешиванием ударный тормозной электромагнитный момент асинхронного двигателя при сквозных КЗ в инверторе напряжения существенно смягчается за счёт поворота остова двигателя вокруг оси колесной пары.

2. На перспективном магистральном тепловозе 2ТЭ25А с асинхронными двигателями ДТА470 максимальный ударный тормозной электромагнитный момент при авариях в инверторе превышает номинальный момент двигателя в 5 раз.

3. Рациональным выбором коэффициента эквивалентного вязкого трения и коэффициента жёсткости подвески остова двигателя можно снизить максимальные ударные динамические нагрузки в элементах тяговой передачи тепловоза 2ТЭ25А при КЗ в инверторе напряжения до 2,5 номинальных значений.

Список литературы

1. Электроподвижной состав с асинхронными тяговыми двигателями / Под ред. Н.А. Ротанова. М.: Транспорт, 1991.

2. Степанов А.Д., Андерс В.И., Пречиский В.А., Гусевский Ю.И. Электрические передачи переменного тока тепловозов и газотурбовозов. М.: Транспорт, 1982.

3. Михальченко Г.С., Федяева Г.А., Власов А.И. Моделирование переходных режимов в асинхронном тяго-

вом приводе локомотивов // Вестник ВНИИЖТ. 2003. №4. С.42–47.

4. Иванов-Смоленский А.В., Абрамкин Ю.В., Власов А.И. и др. Универсальный метод расчета электромагнитных процессов в электрических машинах. М.: Энергоатомиздат, 1986.

5. Бирюков И.В., Беляев А.И., Рыбников Е.К. Тяговые передачи электроподвижного состава железных дорог. М.: Транспорт, 1986.

6. Львов Н.В., Шаров В.А. Методика расчета переходных процессов в асинхронном тяговом приводе локомотива // Тр. МИИТ. 1974. Вып.42. С.53–61.

7. Федяева Г.А., Феоктистов В.П. Влияние характеристик асинхронного двигателя на ударные динамические нагрузки в тяговом приводе // Соискатель. Приложение к журналу "Мир транспорта". 2005. №2. С.118–125.

Федяева Галина Анатольевна – доцент кафедры "Автоматизированный электропривод" ГОУ ВПО "Брянский государственный технический университет", канд. техн. наук. Окончила в 1979 г. факультет энергетического машиностроения Брянского института транспортного машиностроения (БИТМ). Защитила диссертацию по теме "Динамические нагрузки в асинхронном тяговом приводе маневрового тепловоза при аварийных режимах в системе электропитания" в 2001 г.

Электродуговая эрозия металлических пластин дугогасительных устройств автоматических выключателей при предельных токах коммутации

МАРКЕВИЧ Н.В., КИЯТКИН Р.П., МАКСИМОВ О.П.

Проведены исследования электродуговой эрозии деионных пластин дугогасительных устройств автоматических выключателей при отключении предельных токов коммутации. По предложенной методике выполнена оценка влияния электродинамических усилий на электрическую дугу отключения при предельных режимах КЗ.

Повышение предельной коммутационной способности автоматических выключателей низкого напряжения, выпускаемых отечественной промышленностью в настоящее время, связано с проблемами отключения предельных токов КЗ. При предельных режимах КЗ происхо-

The investigations of arc erosion of deion plates of an arc control device of automatic switches at extreme commutation currents disabling are provided. The estimation of the electrodynamic efforts influence on switch-off electric arc at extreme modes of short-circuiting based on the proposed methodic is done.

дит разрушение металлических пластин дугогасительной решётки, дугогасительных и главных контактов, а также изоляционных стенок дугогасительной камеры [1, 2].

Анализ электродуговой эрозии металлических пластин дугогасительных устройств при

тока предельной коммутационной способности связан с введением эмпирических зависимостей, которые не раскрывают влияние электродинамических усилий, взаимного расположения дугогасительных камер в трёхфазной системе, состояния контактных ламелей, влияние фаз и разрушение металлических пластин от деформации ствола электрической дуги при отключении предельных токов КЗ, когда объём дугогасительной камеры ограничен [2].

Оптимизация дугогасительных устройств направлена на повышение предельной отключающей способности без изменения их габаритных размеров и при ограниченном количестве металлических пластин.

Исследования выключателей, опытных образцов отечественного производства, зарубежными аналогами которых являются автоматические выключатели фирмы "Masterpact" серии М, при амплитуде тока 90 кА по циклу В-О (включение-отключение) показали сильный износ дугогасительного устройства. Однако разрушения металлических пластин не наблюдалось, эрозийные следы дуги локальны. На рис. 1, а пред-

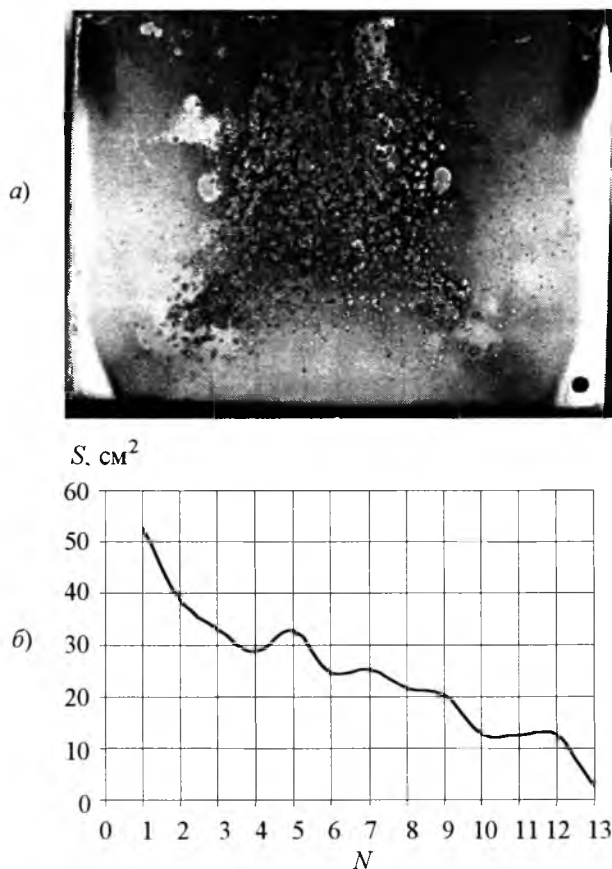


Рис.1. Электродуговая эрозия металлических пластин дугогасительной камеры при коммутации тока с амплитудой 90 кА (а) и площадь дуговой эрозии S по пластинам N дугогасительной камеры (б)

ставлена электродуговая эрозия металлических пластин дугогасительной камеры, а на рис. 1, б – площадь следов дуговой эрозии S по пластинам N дугогасительной камеры. Более 1/3 дугогасительной камеры практически не работает, так как наблюдаются слабые следы плазмы на пластинах дугогасительной решётки. Вся плазма перемещается в первую половину дугогасительной камеры и практически не распределяется равномерно по пластинам.

При увеличении термической нагрузки при амплитуде тока 105–120 кА суммарной длительностью 0,074 с наблюдалось разрушение металлических пластин. На рис. 2 представлена электродуговая эрозия металлических пластин дугогасительной камеры фаз А, В, С после коммутационного цикла: О-П-ВО-П-ВО и одноразовой предельной коммутационной способности ВО. Сплошной линией показан контур исходной пластины. Эрозия пластин имеет вид сплошного оплавления с видимым разрушением и выносом массы металла в плазму, что вызвало засорение межконтактного промежутка продуктами эрозии. Сильное разрушение пластин и перемещение электрической дуги по

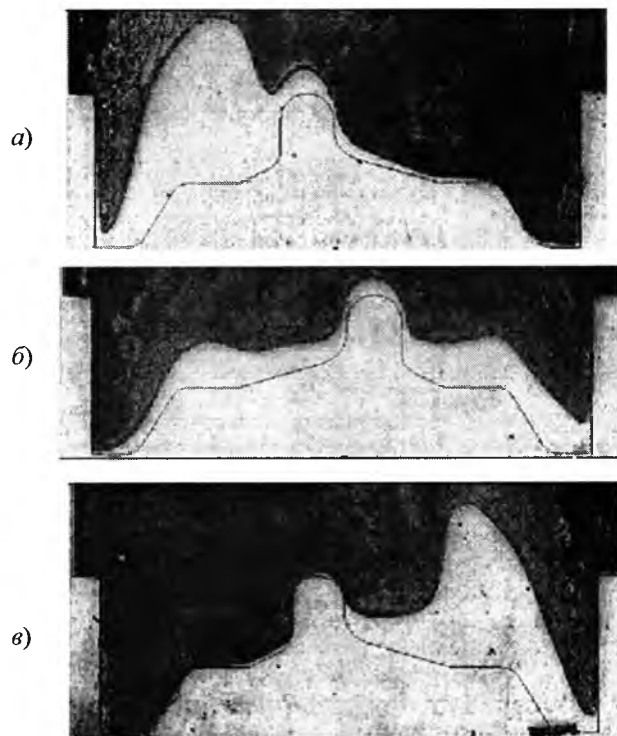


Рис.2. Электродуговая эрозия металлических пластин дугогасительной камеры при коммутации тока с амплитудой 105–120 кА:

а – фаза А; б – фаза В; в – фаза С

пластинам дугогасительной камеры наблюдалось при больших токах. На рис.3 представлено изменение площади пластин дугогасительной камеры фаз A и C , где N – номер пластины. В фазе A (рис.3,а) для $N = 5$ отношение площади S_5 правой половины пластины к исходной площади $S_{пр}$ составляет 0,98. Для $N = 3$ отношение площади S_3 левой половины пластины к исходной площади $S_{лп}$ составляет 0,81. В фазе B (рис.2,б) оплавление пластин и изменение их массы произошло относительно равномерно. В фазе C (рис.3,б), для $N = 5$ отношение площади S_5 правой половины пластины к исходной площади $S_{пр}$ составляет 0,82. Для $N = 2$ отношение площади S_2 левой половины пластины к исходной площади $S_{лп}$ равно 0,98. Смещение электрической дуги фаз A и C по отношению к фазе B произошло в разные стороны.

Анализ разрушения пластин, представленных на рис.2, 3, показал, что существенную роль играют электродинамические усилия, которые воздействуют на электрическую дугу отключения.

Далее рассмотрим влияние электродинамических усилий на электрическую дугу при отключении автоматическим выключателем предельных токов КЗ.

В качестве исходной модели дугогасительные камеры с электрической дугой отключения представлены в виде прямоугольных шин. Выполнено расщепление прямоугольной шины на элементарные проводники (ЭП). Система дополнена 0-нитью (фиктивным проводником с радиусом сечения $\rho_0 \rightarrow 0$), играющей роль обратного провода одновременно для ЭП всех шин и образующей с каждым из них условный элементарный виток (УЭВ) [3, 4]. Затем произведена замена дугогасительных камер с электрической дугой отключения приближённой моделью, состоящей из n УЭВ с общим обратным проводом, моделирующим 0-нить. Соответствующая схема замещения представлена на рис.4, чем больше число элементарных проводников ЭП, а также и УЭВ, тем она точнее.

Введены обозначения: $\mathbf{I}_A = \{\dot{I}_k^A\}$ – матрица-столбец высотой n_A комплексных токов ЭП шины фазы A , $\mathbf{I}_B = \{\dot{I}_k^B\}$ – матрица-столбец высотой n_B комплексных токов ЭП шины фазы B и т.д.

Согласно схеме замещения выполнен расчёт токов \dot{I}_k ЭП в результате решения следующей системы $n + 3$ уравнений:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{R}_A + j\omega\mathbf{M}_A & j\omega\mathbf{M}_{AB} & j\omega\mathbf{M}_{AC} & \mathbf{1}_A^t & & \\ j\omega\mathbf{M}_{BA} & \mathbf{R}_B + j\omega\mathbf{M}_B & j\omega\mathbf{M}_{BC} & & \mathbf{1}_B^t & \\ j\omega\mathbf{M}_{CA} & j\omega\mathbf{M}_{CB} & \mathbf{R}_C + j\omega\mathbf{M}_C & & & \mathbf{1}_C^t \\ \mathbf{1}_A & & & & & \\ & \mathbf{1}_B & & & & \\ & & \mathbf{1}_C & & & \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \mathbf{I}_A \\ \mathbf{I}_B \\ \mathbf{I}_C \\ \dot{U}_{JA} \\ \dot{U}_{JB} \\ \dot{U}_{JC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{J}_A \\ \dot{J}_B \\ \dot{J}_C \end{bmatrix}, \quad (1)$$

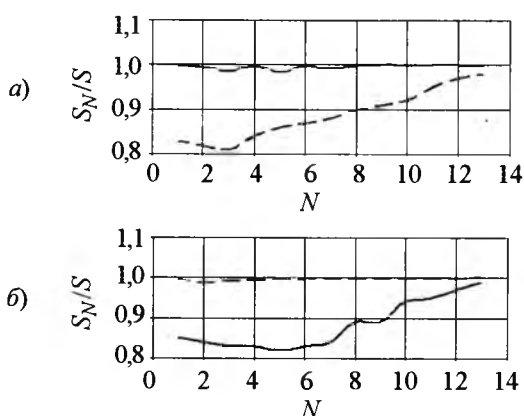


Рис.3. Дуговая эрозия по пластинам дугогасительной камеры при коммутации тока с амплитудой 105 – 120 кА:

а – фаза A ; б – фаза C ; — — $S_N/S_{пр}$; — — — — $S_N/S_{лп}$

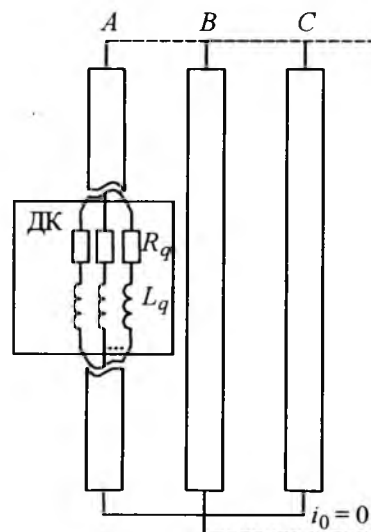


Рис.4. Схема замещения дугогасительного устройства автоматического выключателя

где \mathbf{R}_A – диагональная матрица ($n_A \times n_A$) активных сопротивлений ЭП шины фазы A ; \mathbf{M}_A – симметричная матрица ($n_A \times n_A$) условных собственных и взаимных индуктивностей УЭВ, образованных ЭП шины фазы A и 0-нитью; \mathbf{M}_{AB} – прямоугольная матрица ($n_A \times n_B$) условных взаимных индуктивностей УЭВ "ЭП шины фазы A – 0-нить" и "ЭП шины фазы B – 0-нить"; $\mathbf{M}_{BA} = \mathbf{M}_{AB}^t$; t – знак транспонирования; $\mathbf{1}_A$ – единичная матрица-строка шириной n_A ; \dot{U}_{JA} – комплекс напряжения на источнике тока \dot{J}_A , задающем ток в шине фазы A .

Активное сопротивление k -го ЭП определялось по формуле

$$R_k = l / (\gamma S_k), \quad (2)$$

где l – длина шины; γ – удельная электрическая проводимость материала шины.

Условные индуктивности УЭВ рассчитывались по формулам, полученным с использованием понятий средних геометрических расстояний площадей различных фигур от самих себя и друг от друга [5].

Собственные индуктивности

$$L_k = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln \frac{g_{k0}^2}{g_k g_0} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln \frac{g_{k0}^2}{g_k} + \left[\frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln \frac{1}{g_0} \right] \approx \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln \frac{d_{k0}^2}{g_k} + \left[\frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln \frac{1}{g_0} \right], \quad (3)$$

где g_{k0} – СГР от площади S_k поперечного сечения k -го ЭП до точки расположения 0-нити, приблизительно равное расстоянию d_{k0} между центром сечения k -го ЭП и 0-нитью; g_k – СГР площади S_k поперечного сечения k -го ЭП от самой себя; g_0 – СГР площади сечения 0-нити от самой себя, причём $g_0 \rightarrow 0$ при уменьшении радиуса ρ_0 0-нити до нуля.

Взаимные индуктивности

$$M_{km} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln \frac{g_{k0} g_{m0}}{g_{km} g_0} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln \frac{g_{k0} g_{m0}}{g_{km}} + \left[\frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln \frac{1}{g_0} \right], \quad (4)$$

где g_{km} – СГР площадей S_k и S_m поперечных сечений k -го и m -го ЭП друг от друга.

Если магнитное поле создаётся системой n нитей с синусоидальными токами $\dot{I}_q = I_q e^{j\psi_q}$,

проходящих через точки z_q , то для определения средней за период T электромагнитной силы, действующей на единицу длины нити с током $\dot{I}_k = I_k e^{j\psi_k}$, можно использовать выражение

$$\mathbf{F}_{z_k} = -\frac{\mu_0 I_k}{2\pi} \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq k}}^n \frac{1}{z_k - z_q} I_q \cos(\psi_k - \psi_q). \quad (5)$$

Средняя за период T электромагнитная сила, действующая на выделенную произвольным образом группу ЭП единичной длины, может быть получена суммированием сил, действующих на отдельные ЭП выделенной группы,

$$\mathbf{F} = F_x + jF_y = \sum_k \mathbf{F}_{z_k}, \quad (6)$$

где k – номера выделенной группы ЭП.

В результате численного моделирования первой модели дугогасительных камер с электрической дугой отключения определена роль подводящих шин, их конструкция и электродинамическое взаимодействие. Электродинамическое взаимодействие на фазу A составляет 22,4 Н/мм, на фазу C – 20,4 Н/мм.

Вторая модель дугогасительных камер с электрической дугой отключения представлена в виде расщеплённой шины $n = 10$. Выполнено исследование влияния электродинамических усилий при разных расстояниях между дугогасительными камерами автоматического выключателя. В результате исследования получено электродинамическое усилие на фазу A – 16,4 Н/мм, на фазу C – 18,9 Н/мм. На рис.5 представлена удельная электродинамическая

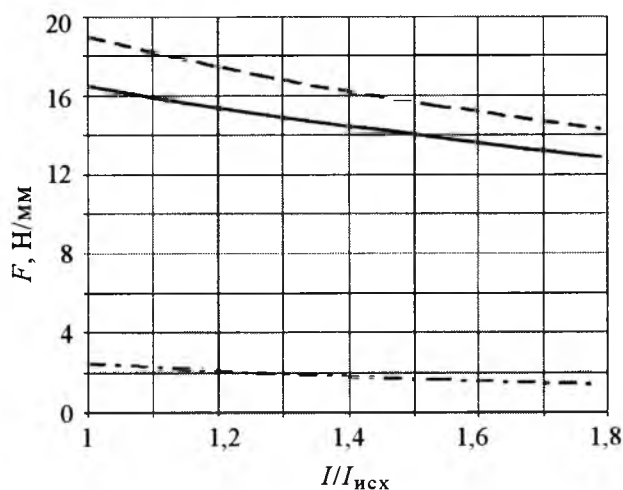


Рис.5. Удельная электродинамическая нагрузка от относительного расстояния между дугогасительными камерами автоматического выключателя:

— — фаза A ; · · · · фаза B ; — · — · фаза C

нагрузка, действующая на фазы A, B, C , от отнositельного расстояния между дугогасительными камерами автоматического выключателя. Расстояние между дугогасительными камерами представлено в относительных единицах, где $l_{исх} = 38$ мм. Увеличение этого расстояния приводит к уменьшению влияния электродинамических усилий на смещение дуги.

Анализ электродуговой эрозии металлических пластин дугогасительных устройств показал, что электродинамические усилия смещают и удерживают электрическую дугу. Это вызывает дополнительно эрозию металлических пластин с разрушением, что ограничивает ресурс по предельной коммутационной способности. По предложенной методике выполнена оценка влияния электродинамических усилий на электрическую дугу отключения при предельных режимах КЗ. Полученные результаты позволяют выбрать оптимальные размеры конструкции дугогасительного устройства автоматического выключателя и обеспечить требуемую предельную отключающую способность.

Список литературы

1. Таев И.С. Электрические аппараты управления. М.: Высшая школа, 1984.

2. Буткевич Г.В. Дуговые процессы при коммутации электрических цепей. М.: Энергия, 1973.

3. Кияткин Р.П. Построение схемных моделей для электромагнитных расчетов токоведущих систем, экранов и волноводов. Дис... доктора техн. наук. СПб.: СПбГПУ, 2005.

4. Кияткин Р.П., Шакиров М.А. Электродинамика токоведущих систем электроэнергетических устройств // Теоретические и практические проблемы развития электроэнергетики России // Тр. Междунар. научно-практической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения Л. Р. Неймана. СПб: СПбГПУ, 2002.

5. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей: Л.: Энергоатомиздат, 1986.

Маркевич Надежда Викторовна – старший преподаватель кафедры электрических и электронных аппаратов СПбГПУ. Окончила электромеханический факультет СПбГПУ в 2003 г.

Кияткин Родион Петрович – профессор кафедры ТОЭ СПбГПУ, доктор техн. наук. Окончил электромеханический факультет Ленинградского политехнического института в 1971 г. Защитил докторскую диссертацию по вопросам расчётов переменных электромагнитных полей в 2005 г.

Максимов Олег Павлович – ведущий инженер ОАО "Новая ЭРА". Окончил факультет радиотехники Ленинградского института авиационного приборостроения в 1970 г.

ИССЛЕДОВАНИЯ И РАСЧЁТЫ

К вопросу расчёта обмотки возбуждения машины постоянного тока

ТОКАРЕВ С.Б.

Предложена методика расчёта потока рассеяния главного полюса машин постоянного тока, основанная на представлении межполюсного пространства машин постоянного тока силовыми трубками магнитного потока. Методика позволяет повысить точность расчёта обмотки возбуждения машины постоянного тока.

Учёт потока рассеяния главного полюса Φ_{σ} машины постоянного тока (МПТ) влияет на точность всего расчёта обмотки возбуждения. Однако в настоящее время Φ_{σ} определяется

The method of calculation flank dispersion the main field poles of direct current machines, based on representation interpolar space of direct current machines by power tubes of a magnetic flux is offered. This method allows to increase accuracy calculation of a exciting winding of the direct current machines.

весьма приближённо. В данной статье предлагается метод достаточно точного определения Φ_{σ} .

В [1] определение Φ_{σ} ведётся через коэффициенты, взятые по отношению к основному

магнитному потоку. В [2] для расчёта даётся следующее выражение:

$$\Phi_{\sigma} = 2\mu l(F_{\sigma} + F_z + F_y)\lambda, \quad (1)$$

где l – длина полюса; F_{σ} , F_z , F_y – МДС основного потока, проходящего соответственно через воздушный зазор, зубцы и ярмо якоря; λ – коэффициент проводимости для потока рассеяния главного полюса.

Основная трудность при использовании (1) состоит в определении составляющих $\lambda = \lambda_{\text{ст}} + \lambda_{\text{п}} + \lambda_{\text{п.н}}$, где $\lambda_{\text{ст}}$ – коэффициент проводимости между внутренней поверхностью полюсных сердечников и станиной, $\lambda_{\text{п}}$ – между внутренними поверхностями сердечников главного и дополнительного полюсов, $\lambda_{\text{п.н}}$ – между внутренними поверхностями полюсных наконечников главного и дополнительного полюсов.

В расчётной практике для МПТ используют зависимости различных составляющих λ в функции размеров межполюсного окна при заданном законе распределения МДС обмотки возбуждения [3,4], полученные графоаналитическим путём на основе анализа картин поля в области межполюсного окна различных МПТ. Форма межполюсного окна и картина поля принимались весьма упрощёнными: отсутствует кривизна станины, оси полюсов расположены параллельно, все силовые линии, выходящие из боковой поверхности полюса, замыкаются только на боковой поверхности соседнего полюса. Значения λ , найденные по [3,4] и в результате решения полевой задачи в области межполюсного окна, могут различаться в 2 раза.

Одним из наиболее точных методов, позволяющих определить проводимость между различными магнитными поверхностями, является метод проводимостей возможных путей потока [5]. Он состоит в том, что прежде всего намечаются пути потоков, которые должны иметь простую, но достаточно правдоподобную форму; проводимость выбранного пути вычисляется по средним значениям длины и ширины (в случае плоскопараллельной задачи).

В данной работе составляющие λ определяются на основании метода проводимостей возможных путей потока с использованием результатов численных расчётов магнитного поля межполюсного окна различной конфигурации.

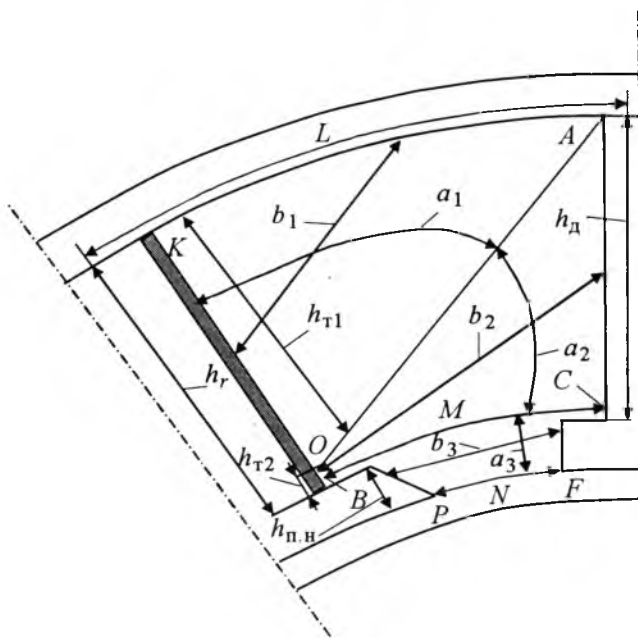
Численный расчёт поля в межполюсном окне МПТ проводился компьютерной програм-

мой путём решения краевой задачи Дирихле методом конечных разностей [6]. Обмотка главного полюса, как и в [2–4], заменяется бесконечно тонким токовым слоем (токовый слой на картине межполюсного окна МПТ заштрихован, рисунок).

Программа производит не только расчёт проводимостей в воздушных промежутках, но и осуществляет построение картины поля.

На картине поля (рисунок) силовые линии OA и BC являются особенными в том смысле, что делят поток рассеяния главного полюса на отдельные составляющие – трубки. Первая трубка OKA заключена между станиной и боковой поверхностью полюса и проводит соответствующий поток. Вторая трубка $OACB$ проводит поток между боковыми поверхностями главного и добавочного полюсов. В третьей трубке $BCFP$ заключён поток, замыкающийся между поверхностями полюсных наконечников. На рисунке указаны размеры средней длины b и ширины a каждой трубки. Согласно принятому методу, проводимость каждой трубки равна отношению a/b .

Все формулы для расчёта λ необходимо привести к полной МДС, действующей на полюсе и полюсном наконечнике, чтобы использовать их при расчёте потоков рассеяния главного полюса МПТ по (1). Учитывая, что линия средней длины первой трубки находится под половиной МДС, приходящейся на высоту $h_{\tau 1}$ этой трубки, выражение для $\lambda_{\text{ст}}$ можно записать в следующем виде:



$$\lambda_{ст} = 1,92 \frac{(h_{т1} + L)h_{т1}0,5}{\sqrt{(h_{т1}^2 + L^2)0,25 h_r}}, \quad (2)$$

где 1,92 – коэффициент пропорциональности, определённый из картины поля (все размеры показаны на рисунке).

В формуле (2) неизвестна высота первой трубки потока $h_{т1}$, замыкающегося по направлению к ярму станины. На основании численных расчётов магнитного поля межполюсного окна, выполненных для различных МПТ, установлена связь между $h_{т1}$ и характерными размерами межполюсного окна h_r и L :

$$h_{т1} = 0,2h_r \cdot 2,07^{(L/h_r)}. \quad (3)$$

Подставляя (3) в (2), после преобразований получаем:

$$\lambda_{ст} = \frac{0,19(0,2h_r \cdot 2,07^{(L/h_r)} + L)2,07^{(L/h_r)}}{\sqrt{(0,2h_r \cdot 2,07^{(L/h_r)})^2 + L^2}}. \quad (4)$$

Используя предложенный метод, можно получить зависимости для других составляющих λ :

$$\lambda_{п} = \frac{1,54h_r(1 - 1 \cdot 2,07^{(L/h_r)})(1 - 0,2 \cdot 2,07^{(L/h_r)})}{\sqrt{M^2 + h_r^2/4}}; \quad (5)$$

$$\lambda_{п.н} = 0,47h_{п.н}/N. \quad (6)$$

Величины L , M и N могут легко быть записаны через основные размеры МПТ.

Необходимо отметить, что формулы (4)–(6), а следовательно, и окончательные зависимости по определению λ справедливы только в диапазоне

$$2,1 < \frac{L}{h_r} < 1. \quad (7)$$

Это связано с изменением характера магнитного поля в области межполюсного окна МПТ, имеющей размер L/h_r и находящейся вне зоны (7). Однако для МПТ обычного исполне-

ния, который находится в диапазоне мощностей от 1 до 100 кВт, условие (7), как правило, выполняется. Машины малой мощности (до 1 кВт) изготавливаются без дополнительных полюсов, поэтому формулы, полученные в этой работе, для этих машин не могут быть применены. Для МПТ без дополнительных полюсов при расчёте Φ_σ может быть рекомендована формула, полученная в [7].

Расчёт по (4)–(6) даёт расхождения со значениями, определёнными численными методами, не более 12%, т. е. существенно точнее, чем расчёт потока рассеяния по [3, 4]. Более точный учёт потока рассеяния по предложенной методике позволит рационально выбирать размеры полюсов, ярем и обмотки возбуждения и сократить время на разработку и выпуск новых типов МПТ.

Список литературы

1. Проектирование электрических машин / Под ред. Копылова И.П. М.: Высшая школа, 2002.
2. Шуйский В.Г. Расчет электрических машин. М., Л.: Энергия, 1968.
3. Гольдберг О.Д., Гуринов Я.С., Свириденко И.С. Проектирование электрических машин. М.: Высшая школа, 2001.
4. Постников М.М. Проектирование электрических машин. Киев: Гостехиздат, 1960.
5. Буль Б.К. Основы теории и расчета магнитных цепей. М.: Энергия, 1964.
6. Кузнецов В.А., Морозкин В.П., Токарев С.Б. К расчету магнитной цепи машины постоянного тока // Электротехника. 1989. №6. С.2–5.
7. Петров Г.Н. Электрические машины. Т.3. М.: Энергия, 1968.



Токарев Сергей Борисович – доцент МГВМИ, канд. техн. наук. Окончил электромеханический факультет МЭИ в 1980 г. Защитил диссертацию по теме "Погружной электродвигатель постоянного тока автономных энергетических систем" в 1989 г.

Куда идёт электромеханика

КОПЫЛОВ И.П.

Рассматриваются основные проблемы электромеханики, которая позволяет подойти к объединению четырёх взаимодействий физики и расширяет границы применения от макро- до микрообъектов.

The main electromechanics problems are considered, was made more realistic to unify four main physics interactions and expanded the suitability from macrostructure to microstructure.

Электромеханика – часть физики, занимающаяся электромеханическим преобразованием энергии. Физика – это наука о природе или иначе об окружающем нас Мире [1]. В [1] отмечается, что электромеханическое преобразование энергии один из сложных разделов физики, который физиками отдаётся для глубокого изучения электротехникам.

При развитии цивилизации представления об окружающем нас Мире изменялись. Первобытный человек считал, что Земля плавает на трёх китах в безбрежном океане, а звёзды находятся на неподвижной полусфере. В самом начале новой эры Птоломей предложил геоцентристскую теорию Мира, по которой в центре Вселенной располагалась Земля, а Солнце и все планеты и их спутники вращались вокруг Земли – центра Вселенной, созданной богом. Эта теория соответствовала религиозным представлениям и просуществовала полтора тысячелетия. Н. Коперник и Д. Бруно в середине XVI в. создали гелиоцентристскую систему, в центре которой помещалось Солнце. Д. Бруно не отрёкся от своих убеждений и его, как еретика, сожгли инквизиторы на костре. Удивительно, но католическая церковь всего несколько лет назад покаялась в содеянном и признала свои ошибки.

Представления о строении Вселенной изменяются и в наши дни. Так, появившаяся несколько десятков лет назад гипотеза электромагнитной Вселенной обосновала устойчивое движение планет на гармониках магнитного поля Солнца, а классическая наука – небесная механика превратилась в небесную электромеханику [2–5].

Одним из главных представлений электромагнитной Вселенной является обмен энерги-

ей между всеми её объектами, который подчиняется цикличности (периодичности) или частоте. Гуманитарный закон в одной из формулировок гласит: отдать природе больше, чем взять [4].

По теории электромагнитной Вселенной окружающий нас Мир состоит из преобразователей и накопителей энергии.

Преобразователи энергии делятся на простые и сложные.

В простых преобразователях один вид энергии преобразуется в тот же вид энергии, но с другими показателями. Например, все окружающие нас предметы и тела нагреваются и охлаждаются. При этом изменяются температура и количество тепла, участвующего в преобразовании тепловой энергии. В электропечи электрическая энергия преобразуется в тепло [2,6].

В сложных преобразователях один вид энергии преобразуется в два или несколько видов энергии. Например, в электромеханических преобразователях (ЭН) (электрических машинах) электрическая энергия в двигателях преобразуется в механическую с обязательным преобразованием части электрической энергии – в тепло, в генераторах механическая энергия преобразуется в электрическую и тепло [2,6]. В Космосе существуют преобразователи, в которых один вид энергии преобразуется в несколько видов энергии.

Накопители – это кладовые энергии, в которых нет преобразования энергии. Они занимают определённое пространство, но время в них остановилось ("заморозилось"). В Космосе – это "чёрные дыры".

В земных условиях энергия может накапливаться – храниться в магнитных и электрических

ких полях, а также в виде кинетической и потенциальной энергии в механических системах. Широко распространены СПИНЫ – сверхпроводящие индуктивные накопители и маховики – накопители механической энергии. ЭП в земных условиях одновременно выполняют роль преобразователей и накопителей [2,6].

ЭП – высший тип преобразователей энергии. Они имеют наилучшие технико-экономические показатели. Они обратимы, т.е. могут работать как в генераторном, так и в двигательном режимах. Без ЭП немыслимо существование современной и будущей цивилизации. Даже в далёком будущем нет замены электрической энергии, 99% которой сегодня вырабатывается ЭП, а затем две трети её преобразуется электродвигателями в механическую энергию.

ЭП делятся на три класса – индуктивные, в которых преобразование энергии происходит в магнитном поле, ёмкостные, в которых преобразование энергии осуществляется в электрическом поле, и индуктивно-ёмкостные, объединяющие индуктивные и ёмкостные ЭП [2, 6].

В настоящее время теория индуктивных ЭП на базе обобщённого ЭП позволяет записать дифференциальные уравнения для насыщенной несимметричной m -фазной с n степенями свободы электрической машины. В таком ЭП в воздушном зазоре – пространстве, где концентрируется энергия магнитного поля, имеет место бесконечный произвольный спектр гармоник поля [2, 6].

На рис.1: $w_{1\alpha}^s, \dots, w_{n\alpha}^s, w_{1\beta}^s, \dots, w_{n\beta}^s, w_{1k}^s, \dots, w_{nk}^s, \dots, w_{1m}^s, \dots, w_{nm}^s; w_{1\alpha}^r, \dots, w_{n\alpha}^r, w_{1\beta}^r, \dots, w_{n\beta}^r, w_{1k}^r, \dots, w_{nk}^r, \dots, w_{1m}^r, \dots, w_{nm}^r$ – соответственно обмотки статора и ротора по осям $\alpha, \beta, \dots, k, \dots, m$ для m -фазного ЭП.

На рис.2 дана модель такого ЭП для определения электромагнитного момента [2,6]. На рис.2: $U_1^s, f, U_2^s, f_2, \dots, U_m^s, f_m$ – напряжения и частота первой и m -й гармоник магнитного поля на обмотках статора для одной из фаз ЭП.

При определении электромагнитного момента обобщённого ЭП могут учитываться все пары токов, протекающих в обмотках статора и ротора.

В простейшем, идеальном ЭП с однофазной обмоткой в воздушном зазоре есть прямое и обратное поле, которые моделируются двумя парами обмоток на статоре и роторе. При этом

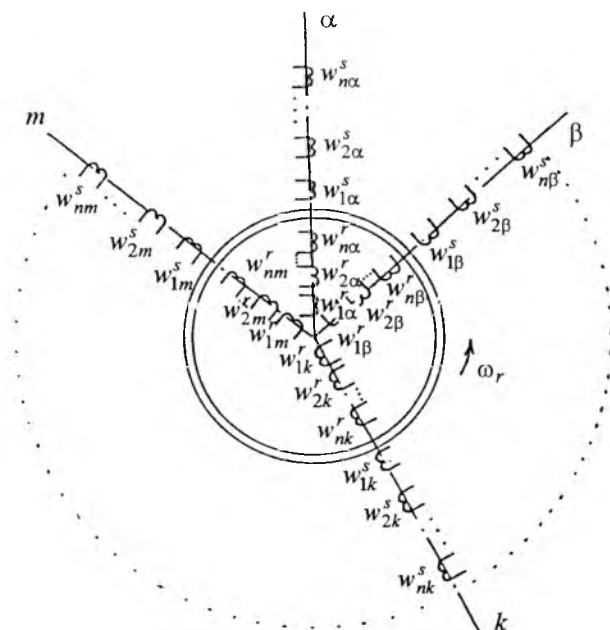


Рис.1. Модель обобщённого электромеханического преобразователя

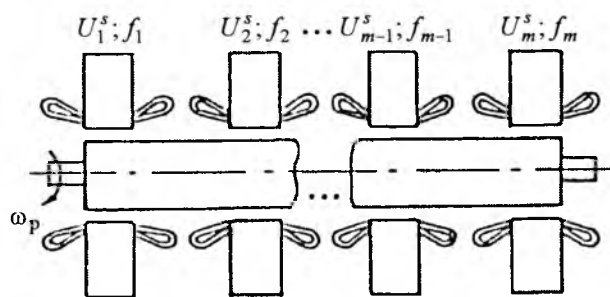


Рис.2 К определению электромагнитного момента обобщённого ЭП

синусоидальное магнитное поле в идеальной машине Г. Крона – частный случай простейшего ЭП в теории обобщённого электромеханического преобразователя. Теория обобщённой машины Г. Крона начинается с двухфазной машины, и теория обобщённого ЭП имеет начальные более сложные уравнения однофазного ЭП, которые снимают все трудности в математическом описании процессов в параметрических ЭП, несимметричных многофазных и многообмоточных машинах, в умножителях и делителях частоты. Недоработки в теории возникают тогда, когда она развивается от частного к общему, а не наоборот.

Многофазная двухполюсная электрическая машина при бесконечно малой ширине паза выражается в однофазную машину. По теории обобщённого преобразователя математическое описание процессов электромеханического преобразования энергии начинается с однофазной

машины и в m -фазной машине заканчивается снова однофазной машиной.

Используя принцип аналогии, когда $I \rightleftharpoons U$, $M \rightleftharpoons C_M$; $I_G \rightleftharpoons C_G$, $R \rightleftharpoons \frac{1}{R}$, можно перенести

достижения в теории индуктивных ЭП на уравнения электромеханического преобразования энергии для ёмкостных ЭП [2,6].

В таблице представлены уравнения для трёх классов ЭП. Здесь $[U]$ и $[I]$ – столбцовые матрицы напряжений и токов; $[Z_L]$ и $[Z_C]$ – сложные матрицы сопротивлений индуктивной и ёмкостной машины; $[M_L]$ и $[M_C]$ – взаимные индуктивности и ёмкости для каждой гармоники.

Электромагнитный момент индуктивно-ёмкостного ЭП ($M_{\Sigma LC}$) равен сумме моментов индуктивной и ёмкостной машины [2,6]:

$$M_{\Sigma LC} = \begin{vmatrix} M_{\Sigma L} & 0 \\ 0 & M_{\Sigma C} \end{vmatrix}. \quad (1)$$

В (1) электромагнитный момент индуктивной машины для первой гармоники

$$M_{\Sigma L} = M(I_{\alpha}^s I_{\beta}^r - I_{\beta}^s I_{\alpha}^r),$$

где M – взаимная индуктивность; $I_{\alpha}^s, I_{\beta}^s, I_{\alpha}^r, I_{\beta}^r$ – токи в статоре и роторе по осям α, β .

Электромагнитный момент ёмкостной машины

$$M_{\Sigma C} = M_C(U_{\alpha}^s U_{\beta}^r - U_{\beta}^s U_{\alpha}^r), \quad (3)$$

где M_C – ёмкость между статором и ротором; $U_{\alpha}^s, U_{\beta}^s, U_{\alpha}^r, U_{\beta}^r$ – напряжения на контурах статора и ротора до оси α, β .

Обычно в индуктивно-ёмкостных ЭП связь осуществляется в уравнениях моментов (1), а матрицы сопротивлений моделируются раздельно.

Сегодня развитие теории электромеханического преобразования энергии позволяет записать дифференциальные уравнения для любо-

го ЭП. Однако уравнения ещё не определяют конструкцию, проектирование и технологию изготовления новых типов ЭП. Здесь огромный объём для творческой работы инженеров-электромехаников.

Самый маломощный ёмкостный двигатель привода ворсинки бактерии имеет мощность 10^{-17} Вт. У бактерии таких двигателей несколько десятков. Самый мощный турбогенератор, созданный человеком, имеет мощность 160 МВт. Самый мощный индуктивно-ёмкостный ЭП в Солнечной системе – звезда Солнце. ЭП распространены на всей шкале электромагнитных волн.

Примерные границы четырёх основных взаимодействий физики даны на рис.3.

Область электромагнитных взаимодействий, в основном, занимают индуктивные ЭП, которым посвящено большинство работ электромехаников.

Гравитация занимает область ультранизких частот. Хотя частоты ниже 1 Гц в электротехнике принято относить к постоянному току и все события рассчитывать по закону Ома, частоты от деци- (10^{-1}) до пикогерц (10^{-12}) определяют жизнь гравитационных волн, принадлежащих планетам, звёздам, галактикам и Вселенной. В последних работах показано, что гравитация – это электромеханика ультранизких частот [3–5].

Подход к расчёту и описанию гравитации с позиций электродинамики позволил создать новые направления в электромагнитной Вселенной: гео- и гелиоэлектромеханику – науки о электромеханике планеты Земля и Солнечной системы. Определение электромагнитного момента планеты обеспечило чёткое объяснение вращения Земли, морских течений, наличие тёплых и холодных зон, природы приливов и отливов и многих других событий в биосфере [3–5].

Классы ЭП	Рабочее поле	Концентрация энергии	Уравнения
Индуктивные (L)	Магнитное	Воздушный зазор	$[U] = [Z_L][I]$ $M_{\Sigma L} = [M_L][I^s I^r]$
Ёмкостные (C)	Электрическое	Диэлектрики	$[I] = [Z_C][U]$ $M_{\Sigma C} = [M_C][U^s U^r]$
Индуктивно-ёмкостные (LC)	Электромагнитное	Воздушный зазор, диэлектрики	$[U] = [Z_L][I]$ $[I] = [Z_C][U]$ $M_{\Sigma L} = [M_L][I^s I^r]$ $M_{\Sigma C} = [M_C][U^s U^r]$

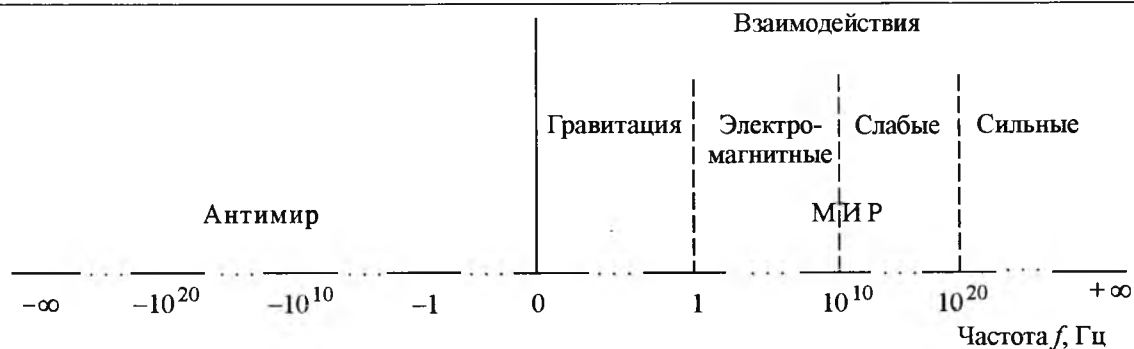


Рис.3 Основные взаимодействия на шкале электромагнитных волн

Электромагнитный момент вращающего магнитного поля Солнца позволил объяснить энергетику нашей звезды и заложил основы нового научного направления – небесную электромеханику, в основе которой все планеты Солнечной системы вращаются на гармониках магнитного поля Солнца [3,4].

Слабые взаимодействия связаны с химическими реакциями, в которых взаимодействуют в сложных соединениях ионы, молекулы и атомы. В электрохимии источником энергии являются химические, а по роду преобразования энергии – электромеханические процессы.

Типичным примером служат топливные элементы, которые отвечают по роду преобразования энергии всем требованиям ЭП. Они имеют высокие технико-экономические показатели (КПД $\approx 80\%$), обратимы и даже могут преобразовывать тепло в электрическую и механическую энергию [2,6].

Получившая признание в последнее время в ядерной физике теория гиперструн вселяет надежду на то, что и сильные взаимодействия могут описываться уравнениями многомерной электромеханики [7]. Представление частицы как струны, имеющей свою волну и массу, близко подходит к основным положениям электромеханики, когда любая материальная частица имеет массу и электромагнитное поле [4,7].

Таким образом, электромеханика может претендовать на объединение четырёх фундаментальных преобразований энергии и подход к решению основной проблемы физики.

При всех преобразованиях присутствуют электромагнитная энергия и движение. Скопления галактик с огромной скоростью движется в магнитном поле Вселенной, а элементарные частицы с ничтожной массой с огромной частотой движутся в ядре...

И как тут не обратиться к словам великого Д. Бруно, который ещё 400 лет тому назад писал: "Вселенная по существу однообразна, её внешней бесконечности во времени и пространстве соответствует внутренняя бесконечность с бесконечно малыми размерами составляющих её элементов".

Развитие теории и практики электромеханики идёт как в сторону макрообъектов, так и в сторону микрообъектов. Общий подход к преобразованию энергии во всём диапазоне частот шкалы электромагнитных волн таит неисчерпаемые возможности, расширяя границы электромеханики.

Электромеханика расширяет границы применения от макрообъектов до ядерных взаимодействий и имеет неисчерпаемые возможности для практического применения теории в большинстве технических наук, медицине и гуманитарных науках (экологии, экономике, философии и др.).

Подготовка кадров сегодня имеет первостепенное значение. В учебных планах подготовки бакалавров для большинства специальностей необходимо ввести курс "Основы электромеханики". При подготовке специалистов по электромеханике надо ввести курсы по физике твёрдого тела и нанотехнологии.

Физика переживает кризис, так как не в силах объединить теорию относительности и квантовую механику. Законы электромеханики сформулированы совсем недавно (для электромагнитных взаимодействий) и говорить в короткой статье об основных законах рано [2–6, 8].

В повседневной работе нельзя забывать об основных проблемах электромеханики: создании новых источников промышленного получения электроэнергии, замене дефицитных материалов и энергосбережениях.

Бесконечными источниками энергии являются Океан и Космос.

Создание тихоходных безредукторных гидроагрегатов, использующих энергию водных потоков, позволяет создать генераторы на несколько оборотов в минуту и решить проблему надёжности механических опор. Теоретические проблемы погружных гидроагрегатов для бесплотинных ГЭС в известной степени решены в МЭИ (ТУ), но дело за рабочим проектированием и внедрением [2,3].

Создание наземных космических энергетических установок даёт подход к использованию энергии изменения мгновенной скорости вращения Земли вокруг своей оси. Здесь решение проблемы создания автономных энергетических установок находится в начальной стадии, но требует к себе пристального внимания и финансирования [2–4].

Применение новых материалов непосредственно связано с созданием ёмкостных двигателей и генераторов. Уже сегодня созданы суперконденсаторы – аккумуляторы и имеются другие элементы для создания ёмкостных электромеханических систем для автономных энергетических установок.

Применение трёх классов ЭП расширит номенклатуру материалов, применяемых в электротехнической промышленности в зависимости от магнитной (μ) и диэлектрической проницаемости (ϵ) (рис.4).

В индуктивных ЭП целесообразна замена медных и алюминиевых проводов для обмоток электрических машин ферромагнитными проводами. Такие провода уже несколько лет назад созданы в НИИ КП, а расчёты серий машин проведены в МЭИ (ТУ).

Целесообразно уже в ближайшее время выпускать серии машин общепромышленного применения мощностью от 1 до 10 кВт с ферро-

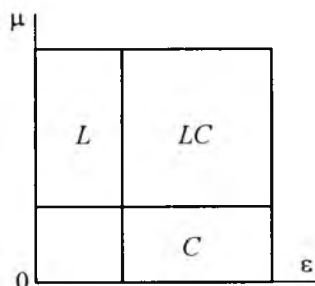


Рис.4. Использование материалов в трёх классах ЭП

магнитными обмотками. Расчёты показывают, что при сохранении энергетических показателей габариты увеличиваются всего на одну ступень.

Энергосбережением электромеханики занимались и занимаются каждый день, но надо расширять это понятие, включая затраты на производство и транспортировку материалов, а также на все аппараты, обслуживающие ЭП. При этом надо стремиться совмещать функции аппаратов и ЭВМ в ЭП.

Необходимо больше внимания уделять биологическим ЭП, созданным в природе в процессе эволюции. Надо суметь повторить движение крыла птиц и насекомых в созданных человеком ЭП для получения и управления сложнейшими движениями исполнительных механизмов, понять и создать ЭП, обеспечивающие перемещение тел в жидкостях и твёрдых сферах, как это делают рыбы и морские животные и даже простые черви.

Высшее достижение природы – человек разумный состоит из бесчисленного числа ЭП и накопителей, а электромеханики почти не занимаются энергетикой человека, хотя и преуспели в создании роботов. Будущее электробиологии определяется привлечением законов и основных положений электромеханики. История электромеханики во многом определялась работами Л. Гальвани, который заведовал кафедрой хирургии в Болонском университете. Будущее электромеханики во многом будет определяться успехами в электробиологии.

Закончить статью хотелось бы словами Луи де Бройля: "... история науки показывает, что прогресс постоянно тормозится тираническим влиянием определённых концепций, которые стали в конце концов рассматриваться как догмы".

XX в. можно считать веком электричества, совершившего техническую революцию и изменившего нашу планету, в чём немалая заслуга электротехников.

Для читателей журнала, в той или иной степени связанных с электротехникой, новый – 2008 г. будет следующей ступенью научных и практических достижений.

Список литературы

1. Фейман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Феймановские лекции по физике. М.: Мир, 1965.

2. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. М.: Высшая школа, 2001.
3. Копылов И.П. Космическая электромеханика.
4. Копылов И.П. Электромагнитная Вселенная. М.: МЭИ, 2007.
5. Копылов И.П. Геоэлектромеханика. М.: МЭИ, 2000.
6. Копылов И.П. Электрические машины. М.: Выс-

шая школа, 2006.

7. Грин Брайан. Элегантная Вселенная. Суперструны, скрытые размерности и поиски окончательной теории. М.: Едиторная УРСС, 2004.

8. Большаков Б.Е. Закон природы или как работает пространство – время. Дубна: Международный университет природы, общества и человека РАЕН, 2002.

ХРОНИКА

Научно-техническая конференция по автоматизированному электроприводу АЭП-2007

КОЗЯРУК А.Е.

18–21 сентября 2007 г. в г. Санкт-Петербурге состоялась V Международная (16 Всероссийская) конференция по автоматизированному электроприводу АЭП-2007, организованная Санкт-Петербургским Государственным политехническим университетом, Московским энергетическим институтом (ТУ) и ОАО "Электропривод" (г. Москва). Конференция проводилась, в соответствии с решением IV Международной (15 Всероссийской) конференции АЭП-2004, состоявшейся в г. Магнитогорске в сентябре 2004 г.

На конференции было представлено 196 докладов по следующим направлениям:

1. Общие и теоретические вопросы автоматизированного электропривода.
2. Новые программы и технические средства автоматизированного привода.
3. Актуальные вопросы автоматизированного электропривода в машиностроении, судостроении, горной, нефтегазовой и других отраслях промышленности.
4. Взаимодействие электропривода с внешними устройствами, электропривод в специальных помещениях.
5. Вопросы подготовки специалистов в области автоматизированного электропривода.

В работе конференции приняли участие более 200 специалистов из многих городов России (Москвы, Санкт-Петербурга, Екатеринбурга, Красноярска, Томска, Новосибирска, Ново-

черкаска, Вологды, Вятки, Нижнего Новгорода, Чебоксар, Липецка, Северодвинска, Железнодорожска и многих других), а также из Германии, Белоруссии, Украины.

2007 г. по нумерологическим признакам может считаться юбилейным по многим событиям в области электропривода.

Началом электропривода можно считать первое промышленное применение первого электродвигателя Б.С. Якоби в 1837 г. в г. Санкт-Петербурге. Прошло 170 лет с момента применения первого электропривода на "электромоторном катере".

В 1897 г. в первом техническом вузе России – Санкт-Петербургском горном институте в дипломные проекты горных инженеров был включён раздел "Электромеханические устройства". В 2007 г. – 110 лет этому событию.

В 2007 г. исполняется 85 лет первой кафедре электропривода в России – кафедре Санкт-Петербургского электротехнического института (ЛЭТИ) и 80 лет первому выпуску инженеров-электроприводчиков.

Традиция совещаний и конференций по электроприводу берёт начало с I Всесоюзного совещания в 1947 г. на базе Ленинградского политехнического института, отсюда 60 летний юбилей проведения совещаний и конференций по электроприводу.

Итак, многоюбилейная конференция АЭП-2007, безусловно, должна была состояться (и состо-

ялась) в г. Санкт-Петербурге, на базе Политехнического университета.

Все доклады, представленные на конференцию, опубликованы в сборнике докладов объемом более 60 п. л.

На пленарном заседании были представлены доклады, раскрывающие проблемы и состояние современного электропривода. Проф. Н.Ф. Ильинский представил доклад "Электропривод в современном мире", проф. А.Е. Козярук – "Электропривод в Санкт-Петербурге: вчера, сегодня, завтра". Актуальные вопросы создания серии модульных встраиваемых микроконтроллерных систем управления осветил В.Ф. Козаченко (МЭИ), а новое поколение полупроводниковых приборов для комплектования средневольтных и высоковольтных устройств электропривода представлено в докладе Ю.А. Евсеева, А.М. Сурмы (ВЭИ, г. Москва).

Важные вопросы по совершенствованию конструкций и технологий производства низковольтных асинхронных двигателей освещены в докладе В.Я. Беспалова (МЭИ) и Л.Н. Макарова (Русэлпром).

Современное состояние и перспективы развития мощного электропривода с полупроводниковыми преобразователями частоты представлено в докладах Н.В. Пинчука, Б.З. Дробкина, М.В. Пронина (ОАО "Силовые машины", филиал "Электросила", г. Санкт-Петербург). Пути и направление внедрения электроприводов переменного тока в ОАО "ММК" осветил В.В. Головин (г. Магнитогорск).

Большой интерес вызвал доклад М. Хемница, А. Иванова (Конвертим ГмбХ, Берлин, Германия) "Высокая производительность за счёт современных и гибких систем электропривода прокатных станов".

Работа конференции по направлениям проходила по соответствующим секциям, где были представлены как пленарные секционные доклады (10–11 докладов на каждой секции), так и стендовые доклады.

В большей части докладов приведены интересные практические и теоретические результаты по созданию высокоэффективных систем электропривода, преимущественно переменного тока, в том числе с новыми типами двигателей, для различных машин, установок и технологических процессов.

Хотелось бы отметить высокий уровень большей части докладов, но в кратком изложении это невозможно. Среди докладов первого направления, освещающих общие вопросы синтеза законов управления электроприводами, оценки энергетических показателей вентильно-индукторных электроприводов, структуры нечёткого прямого управления моментом асинхронного двигателя, методов цифрового прогнозирующего управления с использованием нейронных предсказателей, следует отметить доклады Ю.А. Борцова и др. (СПбГЭТУ), С.А. Ковчина и др. (СПбГПУ, Ливанский университет), В.А. Мищенко (ОАО "АВЕКС", г. Москва), М.Г. Бычкова и др. (МЭИ, ЗАО "Ирис", г. Новочеркасск), М.И. Альтшулера и др. (ООО НПП "Экра", г. Чебоксары), И.Я. Браславского и др. (УГТУ–УПИ).

Из докладов второго направления можно отметить доклады Р.Т. Шрейнера и др. (ЗАО "Автоматизированные системы и комплексы", г. Екатеринбург) о новом поколении промышленных энергосберегающих регулируемых электроприводов переменного тока; М.П. Белова, В.А. Новикова (СПбГЭТУ) об инжиниринговых средствах электроприводных систем; О.Е. Лозицкого и др. (ЮРГТУ, ЗАО "Ирис", г. Новочеркасск) об использовании высокомоментных вентильных индукторных реактивных двигателей для автоматизированных электроприводов; Г.М. Иванова, О.И. Осипова по проблеме выбора и внедрения регулируемого электропривода переменного тока; И.Г. Ефимова и др. (СПбГПУ, ЗАО "Сев-Евродрайв") о стенде для исследований частотно-регулируемых электроприводов; А.Б. Виноградова и др. (Ивановский энергетический институт) о новых исполнениях и функциональных возможностях электроприводов серии ЭПВ, М. Лойхте (Германия, г. Брухзаль, SEW-EURODRIVE), В.Ф. Золотарева и др. (ЗАО "Сев-Евродрайв, г. Санкт-Петербург") по инновационным решениям в децентрализованном электроприводе.

По третьему направлению представлено большое число докладов, освещающих различные аспекты применения электропривода для отдельных отраслей промышленности. Следует отметить практическое отсутствие докладов по станочным электроприводам. Большой интерес вызвали доклады Б.М. Парфенова и

др. (ОАО "Электропривод", г. Москва) по электротехническим комплексам буровых установок и экскаваторов; А.Я. Микитченко и др. (ОАО "Рудавтоматика", г. Железнодорожный) по приводу бурового станка на основе транзисторных преобразователей частоты; А.В. Киреева, Г.Н. Кононова (ВНИИ электровозостроения, г. Новочеркасск), освещающий особенности применения в системе тягового электропривода индукторного двигателя; Ю.Т. Портного и др. (ФГУП НПП "ВНИИЭМ", г. Москва), посвященный созданию малогабаритного высокоскоростного электропривода насоса для нефтедобычи с погружным инвертором; С.И. Лукьянова и др. (МГТУ, ОАО "ММК", ЗАО "Электроремонт", г. Магнитогорск) о системах диагностирования электропривода прокатных стенов; Б.С. Лезнова и др. (ОАО "НИИ ВОД ГЕО", ООО "Ягорба", г. Москва), посвященный управлению разобщенными в пространстве электроприводами, участвующими в общем технологическом процессе; А.П. Сенькова и др. (СПб ГМТУ) о применении в судовых электроприводах вентильных электродвигателей с кольцевыми фазами.

Следует отметить, что несмотря на все усилия оргкомитета, проблемы судового электропривода на Санкт-Петербургской конференции были представлены недостаточно.

Большой интерес вызвали доклады четвертого направления. Из многочисленных докладов можно отметить следующие: А.М. Вейнгера, Д.В. Беляева ("Rockwell Automation", г. Москва) по проблеме взаимодействия мощного регулируемого электропривода и питающей сети; Б.И. Фираго и др. (Белорусский НГУ; Вроцлавский технический университет; Гомельский ТУ) по электромагнитной совместимости преобразователей частоты с системой электроснабжения; В.Н. Пупынича и др. (МГУПС, ПСО "Система – ГАЛС", ОАО "Электропривод", ЗАО "Электронные системы электротехники", г. Москва; ЗАО "Элтон", г. Троицк Московской обл.) по системам тягового электроснабжения метрополитена с емкостными накопителями энергии; Г.М. Иванова и др. (ОАО "Электропривод") об электротехническом комплексе с высоковольтными регулируемым электроприводами; Л.А. Кучумова (СПбГПУ, ЗАО "НПФ "Энергосоюз", г. Санкт-Петербург)

об опыте использования специализированного программного обеспечения для анализа режимов работы систем электроснабжения с нелинейными нагрузками.

Направление подготовки кадров было представлено докладами Ю.Н. Сергиевского и др. (МЭИ), И.М. Семенова (СПбГПУ), Г.Б. Онищенко (Московский государственный открытый университет), Г.И. Прокофьева (СПбГЭТУ), В.Е. Платоновой и др. (ЗАО "Шнайдер Электрик", г. Москва).

Заседание секций, совмещенное с заседанием НМС по специальности УМО по образованию в области энергетики и электротехники, проводилось на базе СПбГЭТУ (ЛЭТИ) и было посвящено 85-летию первой кафедры электропривода. При обсуждении докладов превалирующим было мнение о нецелесообразности для специальности электропривод перехода на обучение по системе бакалавр–магистр. По мнению большинства целесообразно оставить двухступенчатую систему со специалитетом бакалавр–инженер, магистр, хорошо отработанную в большинстве вузов за последние годы и в полной мере соответствующую общим положениям выполнения Болонского соглашения. Большая часть предприятий различных отраслей промышленности требует подготовки высококвалифицированных специалистов–инженеров, а магистры могут быть востребованы в вузах и научно-исследовательских институтах фундаментального профиля. Представитель Белорусской школы электропривода проф. Б.И. Фираго сообщил, что в Белоруссии не отказались от подготовки инженеров–специалистов по электроприводу.

Конференция АЭП-2007 проводилась при поддержке ряда предприятий. Наибольшую помощь в организации конференции и публикации докладов оказало ЗАО "Сев-Евродрайв", г. Санкт-Петербург (Генеральный директор В.Ф. Золотарев).

Во время проведения конференции была развернута выставка разработок и продукции ряда предприятий (АО "Ракурс", г. Санкт-Петербург; СПЭК, г. Санкт-Петербург, ООО "Интермодуль", г. Нижний Новгород и др.).

Выставка и демонстрация электроприводов ЗАО "Сев-Евродрайв" проводилась в помещениях и на базе фирмы в г. Санкт-Петербурге.

Для участников конференции была предусмотрена культурная программа – водная экскурсия по рекам и каналам Санкт-Петербурга, автобусная экскурсия в г. Кронштадт.

Участники конференции ознакомились с историей и архитектурой одного из старейших вузов России – Санкт-Петербургского политехнического института и "Дома Учёных в Лесном".

В решении конференции отмечена целесообразность проведения конференции АЭП-2010 в 2010 г. (конкретные сроки и место будут уточнены в процессе подготовки).

В целом юбилейная конференция по электроприводу АЭП-2007 показала, что прошлое в науке и практике электропривода в России – блестящее.

В настоящем – теория и практика электропривода сохранились на достаточно высоком уровне, а направления и пути развития электропривода определены, и успех будет обеспечен при сохранении научных школ, производств и методов подготовки специалистов.

А.Е. Козярук, доктор техн. наук профессор СПбГИ (ТУ).

ВНИИ кабельной промышленности – 60 лет

ВНИИ кабельной промышленности (в настоящее время ОАО "ВНИИКП") был организован в ноябре 1947 г., когда в условиях восстановления и развития разрушенного войной народного хозяйства выявилась острая необходимость создания новых типов кабелей и проводов, технологии их производства, специальных материалов кабельного производства и кабельного технологического оборудования. ВНИИКП стал научно-техническим центром кабельной промышленности – быстро растущей подотрасли электротехники. Достаточно отметить, что только в период 1945–1970 гг. было построено и введено в эксплуатацию 34 кабельных завода, и в создании каждого из этих заводов принимал участие Всесоюзный научно-исследовательский институт кабельной промышленности, начиная с этапа проектирования и заканчивая выпуском первой продукции.

В активе ВНИИКП важнейшие работы по созданию и внедрению силовых кабелей всех типов для энергетики страны, в том числе маслонаполненных кабелей на напряжение 110–500 кВ, кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 110–220 кВ, кабелей повышенной пожаробезопасности, в том числе огнестой-

ких кабелей, способных функционировать во время пожара.

В настоящее время ВНИИКП придает особое внимание развитию работ в области диэлектрического микроматериаловедения – нового научного направления, базирующегося на использовании новейших методов исследований, прежде всего в области кабелей энергетического назначения.

Ряд крупных работ ВНИИКП выполнил в области кабелей связи, начиная с разработок медных кабелей связи и заканчивая созданием современных волоконно-оптических кабелей.

ВНИИКП совместно с Институтом общей физики АН СССР руководил межотраслевым научно-техническим комплексом (МНТК) "Световод". Результатом работ МНТК является то, что 90% всех волоконно-оптических кабелей, применяемых в России, изготавливаются на отечественных кабельных заводах.

Среди важнейших достижений ВНИИКП – создание метода радиационного модифицирования кабельной изоляции. Эта работа включала в себя разработку специальных полиэтиленовых композиций, оборудования для непрерыв-

ного облучения кабельной изоляции и технологических режимов облучения. Установки непрерывного облучения успешно эксплуатируются на кабельных заводах, на них выпускаются кабели и провода ответственного назначения. Важное значение имеют также работы ВНИИ КП по созданию современных типов кабелей для питания установок погружных электронасосов добычи нефти, проводов для подвижного состава и т.д. Нельзя не отметить работы института в области обмоточных проводов, особенно эмалированных, что обеспечило переход электромашиностроения на более высокий уровень, связанный с повышением рабочих температур обмоток электрических машин и аппаратов.

Особое место занимают исследования ВНИИ КП в области сверхпроводимости. Эти работы были начаты ещё в 60-е годы. Большой научный потенциал в сочетании с современной исследовательской деятельностью и технологической базой позволяет быстро переходить от разработок к их внедрению в производство. В 1980 г. была разработана, изготовлена и испытана первая в мире 50-метровая модель сверхпроводящего кабеля на напряжение

110 кВ, на которой достигнуто рекордное значение критического тока – 126 кА. В настоящее время ВНИИ КП участвует в работах по созданию международного термоядерного реактора – ИТЭР. Одной из наиболее перспективных областей использования явления сверхпроводимости в энергетике являются силовых кабели на основе сверхпроводящей высокотемпературной керамики, которые создаются ВНИИ КП совместно с рядом других известных научно-исследовательских организаций.

При ВНИИ КП работает специализированный Учёный Совет по защите диссертаций на соискание учёной степени доктора технических наук, функционирует аспирантура. Работы института неоднократно удостоивались Государственных премий, премий Совета Министров СССР, премий Правительства России.

ВНИИ КП в настоящее время является одним из немногих институтов электротехнической промышленности, сохранивших и повышающих свой научно-технический потенциал. Институт пользуется заслуженным авторитетом не только в кабельной промышленности, но и в электротехнике в целом.

**Вниманию руководителей предприятий, объединений,
НИИ и КБ, вузов**

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

Справки по телефону: (095) 361-95-96

СПИСОК СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ "ЭЛЕКТРОТЕХНИКА" В 2007 Г.

75 лет кафедре электромеханики Московского энергетического института (Технического университета).....	8	2
Лазарев Г.Б., Рябчинский М.В. Обществу инженеров силовой электроники 15 лет	5	3
ОАО "Электропривод" – 65 лет	10	2
Съедин Е.А., Прозоров В.А. Этапы большого пути	2	2
Шевченко А.Ф., Аносов В.Н. К 50-летию кафедр "Электромеханика" и "Электропривод и автоматизация промышленных установок" НГТУ (НЭТИ).....	9	2

ЭЛЕКТРОПРИВОД

Берестов В.М., Харитонов С.А. Алгоритм управления многоуровневым инвертором напряжения.....	11	7
Браславский И.Я. Четырнадцатая международная научно-техническая конференция «Электроприводы переменного тока»	11	2
Браславский И.Я., Костылев А.В., Мезеушева Д.В. Цифровое прогнозирующее управление с использованием нейронных предсказателей.....	11	43
Браславский И.Я., Костылев А.В., Степанюк Д.П. Пусковые процессы в частотно-регулируемом асинхронном электроприводе при оптимальном управлении	11	48
Вейнгер А.М., Ильин Е.П., Раздин Д.А. Начальная стадия пуска мощного регулируемого асинхронного электропривода на основе инвертора тока с ШИМ	11	3
Волков М.А., Ишматов З.Ш. Синтез систем управления электроприводом с использованием коэффициентных оценок качества	11	38
Востриков А.С., Прохоренко Е.В., Норбоев Б.Р. Построение и исследование модели электромагнитного привода вакуумного выключателя	9	28
Зюзов А.М., Нестеров К.Е. Асинхронный «бездатчиковый» тиристорный электропривод.....	11	58
Ишматов З.Ш., Волков М.А., Гурентьев Е.А. Синтез методом полиномиальных уравнений систем электропривода, инвариантных к параметрическим и внешним возмущениям	11	30
Киянов Н.В., Крюков О.В., Прибытков Д.Н., Горбатушков А.В. Концепция разработки инвариантных автоматизированных электроприводов для водооборотных систем с вентиляторными градиентами	11	62
Косчинский С.Л., Колоколов Ю.В. Управление асинхронным электродвигателем в квазистационарных режимах повторный пуск – "подхват" и "удержание"	11	25
Макаров Л.Н., Ястреба С.В. Особенности работы асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в системе частотного регулирования	11	15
Маркевич Н.В., Кияткин Р.П., Максимов О.П. Электродуговая эрозия металлических пластин дугогасительных устройств автоматических выключателей при предельных токах коммутации	12	43
Омельченко Е.Я. Математическая модель трёхфазного асинхронного электродвигателя с фазным ротором	11	19

Панкратов В.В., Маслов М.О. Синтез и исследование одной структуры бездатчикового асинхронного электропривода с векторным управлением.....	9	9
Федяева Г.А. Снижение ударных динамических нагрузок асинхронного тягового привода перспективного тепловоза при аварийных режимах.....	12	38
Шевченко А.Ф., Комаров А.В., Новокрещенов О.И., Мизевич В.В. Безредукторный электро-механический усилитель рулевого управления легковых автомобилей.....	9	32
Шрейнер Р.Т., Кривовяз В.К., Калыгин А.И., Шилин С.И. Энергосберегающий промышленный регулируемый электропривод нового поколения.....	11	52

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Альтов В.А., Копылов С.И. Повышение надёжности работы энергосистем с помощью сверхпроводящих устройств.....	8	37
Андреанов М.В., Родионов Р.В. Применение метода отдельных потерь при определении КПД асинхронного двигателя, работающего от полигармонического источника напряжения	6	20
Антипов В.Н., Данилевич Я.Б. Быстроходные электрические машины для энергетики: состояние и тенденции развития	6	2
Епифанов О.К., Оськин А.Б., Хрущев В.В. Особенности проектирования униполярного индукторного моментного двигателя с осевым магнитным потоком постоянных магнитов	1	43
Епифанов О.К., Салова И.А., Хрущев В.В., Филиппов М.М. Потери магнитного потока возбуждения в униполярных двигателях с поперечным намагничиванием	2	28
Западня М.Ф., Мартынов О.В., Пискунов С.В., Чижов С.А. Асинхронный частотно-регулируемый электродвигатель с короткозамкнутым ротором АЧБKr315M2БУЗ.....	6	17
Захаренко А.Б., Семенчуков Г.А. Исследование синхронной электрической машины со скосом постоянных магнитов	2	59
Иванов-Смоленский А.В., Кузнецов В.А., Петриченко Д.А. Развитие комбинированного метода анализа электрических машин.....	8	4
Изотов А.И., Мамаев Г.А., Беспалов В.Я., Никулин С.В., Тимошенко В.Н. Улучшение характеристик электрических машин за счёт применения смазывающих щёток, выполненных на основе дисульфида молибдена.....	6	33
Качесов В.Е. Исследование перенапряжений на высоковольтном электродвигателе и корректировка модели обмотки.....	6	50
Копылов И.П., Амбарцумова Т.Т. Развитие методов и средств макро моделирования электрических машин	8	19

Кочергин В.В. Коррекция механической характеристики синхронного вентильного двигателя ...	6 61
Кочергин В.В. Схемы и характеристики синхронного вентильного двигателя с однозубцовой обмоткой	2 23
Куликов В.Н., Батоврин С.А. Разработки вращающихся трансформаторов	2 44
Мельников С.Ю., Наумова Л.И., Пантелеева Е.С., Сударикова Е.В. Контроль точности позиционирования шаговых двигателей с помощью программного комплекса LabView	2 49
Меренков Д.В., Семенчуков Г.А. Оптимизация однофазных асинхронных двигателей с несимметричной трёхфазной обмоткой на статоре	8 25
Мищенко В.А. Векторная теория асинхронного электродвигателя	6 5
Никифоров Б.В., Цветков А.А. Исследование вентильного индукторного двигателя в составе насосного агрегата	6 24
Омельченко В.В. Электромеханические приводы органов управления многоразовых космических систем с высокими энергетическими и динамическими показателями	2 37
Осин И.Л., Мощинский Ю.А. Электрические двигатели с постоянными магнитами в системах возбуждения	8 13
Пашков Н.И. Торцевые асинхронные двигатели малой мощности с меньшей материало- и трудоёмкостью изготовления	7 8
Прозоров В.А. Стратегия системного проектирования электрических машин	2 14
Путников В.В., Путников А.В., Уваров В.Б. Бесконтактные электродвигатели постоянного тока с повышенной наработкой для космических аппаратов	2 18
Пыхтин В.В. Метод экспериментального определения дефектности систем изоляции обмоток асинхронных двигателей с учётом различных механизмов образования дефектов	7 2
Смирнов А.Ю. Исследование момента герметичной индукторной машины	1 51
Смирнов Ю.В. Усовершенствование асинхронных электроприводов машин с периодически изменяющейся нагрузкой	6 13
Соколова Е.М. Сравнительный анализ динамики электроприводов переменного и постоянного тока для механизмов кабельного производства	8 32
Тазов Г.В. Практика автоматизации проектирования малых электрических машин	2 7
Темлякова З.С., Персона М.Г., Соловейчик Ю.Г., Петров Р.В., Гречкин В.В. О новом подходе к проектированию электрических машин на основе численного моделирования	9 15
Токарев С.Б. К вопросу выбора коэффициентов проектирования двигателей постоянного тока .	1 40
Шаншуров Г.А. Математическая модель однофазного асинхронного двигателя с несимметричной обмоткой статора	9 22
Шевченко А.Ф. Многополюсные синхронные машины с дробными $q < 1$ зубцовыми обмотками с возбуждением от постоянных магнитов	9 3

Шетат Б, Кабаш Н., Ладыгин А.Н. Адаптивное управление в асинхронном электроприводе на базе искусственной нейронной сети с вычислением потока ротора	6 43
Шымчак П. Исследование установок колебательно-го движения с линейными электродвигателями	6 40

СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Анишев Е.Ю., Лазарев Г.Б. Особенности применения преобразователей частоты в мощном электроприводе циркуляционных насосов	10 64
Беляев Д.В., Вейнгер А.М., Тарасов Д.В. Нестационарные процессы в регулируемом электроприводе с высоковольтным преобразователем частоты сетевого насоса станции теплоснабжения	10 53
Беляев Д.В., Вейнгер А.М., Лазарев Г.Б., Новиковский А.Н., Султанов А.Т. Электромагнитные и электромеханические процессы в электроприводе при параллельной работе преобразователей частоты на асинхронный двигатель	5 20
Бьерн Баклунд. Выбор класса напряжения силовых полупроводниковых приборов	5 9
Ворфоломеев Г.Н., Евдокимов С.А., Щуров Н.И. Синтез схем многопульсных выпрямителей с ортогональными питающими напряжениями	5 47
Долкарт В.М., Пронина Л.В. Смена аппаратной и программной парадигм компьютеров	10 46
Евсеев Ю.А., Сурма А.М. От кремния к карбиду кремния	5 15
Елисеев В.В., Ковалёв Ф.И., Чибиркин В.В. Развитие разработок и производства силовых полупроводниковых приборов в ОАО "Электровыпрямитель"	5 5
Зотов Л.Г. Метод построения многоуровневых инверторов на основе повышающих конденсаторных преобразователей с изменяющейся структурой	10 34
Иванов А.Г., Ушаков И.И. Анализ пусковых режимов асинхронного электродвигателя от тиристорного регулятора	10 29
Козлов В.В. Расчёт шаговых и синхронных электродвигателей для автомобильных электроприводов	5 34
Кузькин А.В. Моделирование и анализ алгоритма управления микроклиматом на пассажирском транспорте на базе микропроцессорной системы	5 61
Кэрролл Э., Линдер Ш., Блиндберг И., Чекмарев А. Силовые полупроводники в сфере передачи и распределения энергии	10 11
Линдер Ш. Силовые полупроводниковые приборы. Обзор и сравнительная оценка	10 4
Мисриханов М.Ш., Ситников В.Ф. Автоматическое управление электропередачами постоянного тока на основе самоорганизующихся регуляторов с экстраполяцией	10 15
Мисриханов М.Ш., Ситников В.Ф., Шаров Ю.В. Модальный синтез регуляторов энергосистемы на основе устройств FACTS	10 22
Оттерполь Г. Электротехника и силовая электроника АЕГ. История и сегодняшний день	10 60
Пронин М.В., Воронцов А.Г. Система с многофазным асинхронным генератором и несколькими активными преобразователями	10 41

Сазонов В.В. Кондиционеры сети на основе активных фильтров	5 28
Серебряков Д.С. Разработка алгоритма и устройства автоматического включения несинфазной резервной сети без перерыва в питании нагрузки	5 54
Современные полупроводниковые приборы "ABB Semiconductors" и "Infenion"	5 18
Султанов А.Т. Частотно-регулируемый асинхронный электропривод циркуляционных насосов энергетической установки.....	5 41

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ

Александров Г.Н. Управляемые реакторы: принцип действия, основные характеристики и перспективы использования в электрических сетях	4 14
Ахазов И.З., Руссова Н.В., Свинцов Г.П. К разработке электромагнитных приводов слаботочных коммутационных аппаратов, унифицированных по габаритным размерам.....	4 53
Белкин Г.С., Лукацкая И.А., Ромочкин Ю.Г. Влияние формы поверхности контактов на характеристики дугогасительных камер.....	4 8
Бурман А.П., Розанов Ю.К. Основные этапы развития электрических аппаратов	4 3
Кадыков В.К., Руссова Н.В., Свинцов Г.П., Сизов А.В. Обобщённые экспериментальные зависимости потокораспределения, потокосцепления и магнитодвижущей силы в клапанных электромагнитных системах постоянного тока с круглыми полюсными наконечниками	4 41
Коробков Ю.С., Красова Н.С., Хроматов В.Е. Влияние магнитного поля на спектры частот колебаний прямоугольных пластин.....	4 30
Лемаев Р.А. Цифровой киловольтметр с регистрацией формы и спектра сигнала.....	4 57
Павленко А.В., Гринченков В.П., Гуммель А.А., Павленко И.А., Калленбах Э. Комплексное проектирование электромагнитных приводов с заданными динамическими характеристиками..	4 22
Розанов Ю.К., Егоров Е.Г., Егоров Г.Е. Неразрушающие испытания контактной коммутационной аппаратуры методом контроля восстанавливающейся прочности	4 47
Ситников В.Ф., Рябчицкий М.В., Смирнов М.И. Выбор силовых электронных ключей для преобразователей в электроэнергетике.....	4 35

АППАРАТЫ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Афанасьев А.И. Импульсные разрядные характеристики изоляционных систем, характерных для нелинейных ограничителей перенапряжений ...	12 8
Клецель М.Я., Майшев П.Н. Особенности построения на герконах дифференциально-фазных защит трансформаторов.....	12 2
Минуллин Р.Г., Фардиев И.Ш., Петрушенко Ю.Я., Губаев Д.Ф., Мезиков А.К., Коровин А.В. Локационный способ обнаружения появления гололеда на проводах линии электропередачи	12 17
Михеев Г.М., Фёдоров Ю.А., Шевцов В.М., Баталыгин С.Н. Ускоренная диагностика высоковольтных выключателей	12 23

УСТРОЙСТВА УПРАВЛЕНИЯ, РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ И ЗАЩИТЫ

Аносов В.Н. Динамическая модель тяговой аккумуляторной батареи автономного транспортного средства	9 41
Бирюков В.В., Сопов В.И., Прокушев Ю.А., Евдокимов С.А., Спиридонов Е.А. Повышение эффективности работы системы энергоснабжения троллейбуса	9 55
Веселовский А.С., Баев В.П., Буянов Ю.Л. Экспериментальная сверхпроводниковая магнитная система с регулируемой индуктивностью обмотки энергоёмкостью 5 МДж	7 16
Иньков Ю.М., Климаш В.С., Светлаков Д.П. Компенсаторы неактивной энергии со стабилизацией напряжения трансформаторных подстанций.....	7 34
Каттель Л.Г. Быстродействующее включающее устройство для синтетических испытаний выключателей переменного тока высокого напряжения	7 24
Муллин В.В., Смирнов А.А., Сиберт И.И. Результаты ресурсных испытаний вакуумных дугогасительных камер со сферическими контактами	7 30
Нейман В.Ю., Петрова А.А. Сравнение способов форсировки импульсных линейных электромагнитных двигателей	9 47
Щуров Н.И. Филиппов В.Б. Электромагнитная совместимость электроподвижного состава железнодорожного транспорта	9 35

ТРАНСФОРМАТОРЫ

Буль О.Б. Простейшие методы расчёта магнитных проводимостей	1 17
Гребенников И.Ю., Гунько В.И., Дмитришин А.Я., Онищенко Л.И., Топоров С.О., Фещук Т.А. Исследование способов очистки трансформаторного масла для пропитки высоковольтных импульсных конденсаторов с плёночным диэлектриком.....	1 25
Гречко О.Н., Давиденко И.В., Калачёва Н.И., Курбатова А.Ф., Смекалов В.В. Граничные значения концентрации газов в масле трансформаторов тока с конденсаторной изоляцией.....	1 34
Долгополов А.Г. Особенности релейной защиты управляемых подмагничиванием шунтирующих реакторов напряжением 110–500 кВ	1 2
Михеев Г.М., Тарасов В.А., Баталыгин С.Н. Образование углеродосодержащих отложений на элементах конструкций РПН силовых трансформаторов за счёт электроконвекции	1 27
Михеев Г.М., Фёдоров Ю.А., Баталыгин С.Н., Шевцов В.М. Цифровой метод контроля круговой диаграммы РПН силовых трансформаторов	1 11

ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННАЯ ТЕХНИКА

Азизов А.Ш., Андреев А.М., Костельов А.М., Полонский Ю.А. Совершенствование электрической изоляции электрических машин высокого напряжения	3 4
Белько В.О., Бондаренко П.Н., Емельянов О.А. Динамические характеристики процессов самовосстановления в металлоплёночных конденсаторах	3 33

Березинец Н.И., Украинский Ю.М., Родова Л.В. Методика испытаний по оценке возможности применения систем изоляции в тяговом электромашиностроении	3 42
Борисова М.Э., Полонский Ю.А., Цацынкин П.В., Галюков О.В. Изучение свойств плёнки полиимида в процессе термоотверждения многослойной изоляции	3 18
Галичин Н.А., Борисова М.Э. Влияние повышенной влажности на стабильность электротного состояния в полиимидных плёнках	3 24
Журавлёва Н.М., Журавлёв С.П., Маслякова А.В. Влияние структурной модификации на электрофизические свойства пропитанных органических диэлектриков	3 28
Кокцинская Е.М., Ваксер Б.Д., Полонский Ю.А. Выбор наполнителя для нелинейных противокоронных лент, используемых в электрических машинах высокого напряжения	3 13
Папков А.В., Мельниченко А.П., Пак В.М., Куимов И.Е. Новые электроизоляционные материалы для систем изоляции вращающихся электрических машин	3 45
Полонский Ю.А., Орданьян С.С., Вихман С.В., Егоров Н.Ю., Егоров В.М. Теплофизические свойства композиционного материала для силовых резисторов на основе часовьярской глины и шунгита	3 38
Сафонов Г.П., Воробьёв П.В., Сорокин А.М., Булдаков А.В. Продление ресурса систем изоляции за счёт использования химически активных компонентов	3 51
Сафонов Г.П., Гринь Е.Л., Сорокин А.М., Булдаков А.В., Воробьёв П.В. Диагностика состояния систем электрической изоляции	3 56
Сафонов Г.П., Сорокин А.М., Булдаков А.В., Воробьёв П.В. Оптимизация технологического процесса создания электроизоляционных систем ..	3 61
Шикова Т.М. Совершенствование системы изоляции крупных электрических машин из предварительно пропитанных материалов	3 8

КОНДЕНСАТОРЫ

Андреев А.М., Андреев Д.А., Мессер Е.Б., Хаецкий В.С. К вопросу оптимизации конструкции металлоплёночных сегментных конденсаторов ..	8 52
Герасимов Д.Ю., Викторенко А.М. Обеспечение электромагнитной совместимости импульсных установок с питающими сетями	8 42
Гребенников И.Ю., Гунько В.И., Дмитришин А.Я., Онищенко Л.И., Швеи И.С. Оценка достигнутого уровня и перспективы создания высоковольтных импульсных конденсаторов погружных электроразрядных комплексов	8 48
Кавешников В.М., Аносов В.Н., Орёл А.В. Применение электрохимических конденсаторов в качестве буферных источников питания автономных транспортных средств	9 44

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

Цгоев Р.С. Сравнение режимных возможностей ветроэнергетических установок	12 32
---	-------

ИССЛЕДОВАНИЯ И РАСЧЁТЫ

Аракелян В.Г. Исследование теплового старения изоляционных жидкостей. Ч.1. Механизмы и кинетика старения	7 48
---	------

Булъ О.Б. Сравнение инженерных методов расчёта магнитных цепей и полей электромагнитов	7 42
Желтов В.В. Использование метода расчёта электротехнических характеристик сверхпроводника как нелинейного элемента электрической цепи для решения конкретных задач	1 55
Злобин А.Ю. Применение асинхронизированных синхронных генераторов в дизель-электрических агрегатах	2 55
Копейкин А.И. Влияние нелинейного трения на динамику электромеханических систем	7 37
Кузнецов М.А., Кузин А.В. Метод повышения температурной стабильности кварцевых генераторов	2 51
Марков А.В., Юленец Ю.П. Многофункциональный контроль параметров технологического процесса в электротермической установке высокочастотного диэлектрического нагрева	7 60
Пашков Н.И. Метод оценки технологии производства электрических машин на стадии проектирования	8 56
Токарев С.Б. К вопросу расчёта обмотки возбуждения машины постоянного тока	12 47
Юдин Б.И., Чередниченко В.С. Пусковые и рабочие режимы вакуумных плазмотронов с полыми катодами	9 50

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Ворфоломеев Г.Н., Нейман Л.А. Влияние несимметрии напряжений многопульсного выпрямителя с трансформаторным преобразователем числа фаз по схеме Скотта	9 60
--	------

НАУЧНЫЕ ГИПОТЕЗЫ

Копылов И.П. Электромеханика и теория "Большого взрыва"	4 59
Копылов И.П. Куда идёт электромеханика	12 50

ХРОНИКА

Браславский И.Я. Четырнадцатая международная научно-техническая конференция "Электроприводы переменного тока	11 2
ВНИИ кабельной промышленности – 60 лет	12 58
Козярук А.Е. Научно-техническая конференция по автоматизированному электроприводу АЭП-2007	12 55
Сарапулов Ф.Н., Беспалов И.Я. Научно-техническая конференция "Актуальные проблемы энерго- и ресурсосберегающих электротехнологий АПЭЭТ-06"	1 64
Хроника	6 63

НАШИ ЮБИЛЯРЫ

Алексей Петрович Бурман	4 65
Алексею Константиновичу Антонову	5 64
Виктор Ермолаевич Католиков	12 64
Гелий Михайлович Иванов	12 65
Турсун Абдалимович Ахунов	11 69
Юрий Моисеевич Иньков	7 65
Яков Борисович Тубис	6 65

НЕКРОЛОГИ

Альфред Данилович Динкель	10 69
--	-------

Виктор Ермолаевич Католиков

(к 85-летию со дня рождения)

20 октября 2007 г. исполнилось 85 лет главному научному сотруднику ОАО "Электропривод" доктору технических наук Виктору Ермолаевичу Католикову. После окончания Московского горного института в 1945 г. по специальности инженер-электромеханик свою трудовую деятельность он начал с должности инженера в Центральном конструкторском бюро треста "Электропривод".

С 1950 г. В.Е. Католиков – заведующий лабораторией в ЦКБ. В 1977 г. ему присуждена учёная степень кандидата технических наук, а в 1999 г. – доктора технических наук.

В.Е. Католиков является ведущим учёным и талантливым инженером в области создания новых систем автоматизированных электроприводов для шахтных подъёмных установок.



В.Е. Католиков автор 115 научных работ, в том числе 5 монографий, а также ряда изобретений.

Отличительной особенностью научной деятельности В.Е. Католикова является разработка научных идей и положений, обеспечивающих развитие электроприводов шахтных подъёмных установок с существенными практическими результатами. Под его руководством и при его непосредственном участии

создана новая специальная номенклатура средств управления и автоматизации шахтных подъёмных машин которые нашли широкое применение на установках шахтного подъёма.

По разработанным В.Е. Католиковым типовым проектам новых систем электроприводов и автоматизации было изготовлено и внедрено несколько сотен комплектов электрооборудования на шахтах и рудниках Криворожья, Джесказгана, Донбасса, Северного Кавказа и др.

Многолетний творческий опыт В.Е. Католикова востребован и в настоящее время.

Виктор Ермолаевич продолжает творчески трудиться, разрабатывая новые идеи, содействующие дальнейшему развитию электротехнического оборудования подъёмных установок для шахт и рудников.

Коллеги и друзья желают Виктору Ермолаевичу здоровья и творческих успехов.

Гелий Михайлович Иванов

(к 75-летию со дня рождения)

23 ноября 2007 г. исполнилось 75 лет заслуженному деятелю науки и техники Российской Федерации, академику РАН, доктору технических наук, профессору Гелию Михайловичу Иванову.

В 1957 г. Г.М. Иванов окончил МЭИ по специальности инженер-электрик и начал работать в ЦНИИчермет им. И.П. Бардина. Проведённые им в ЦНИИЧМ исследования и разработки в отрасли электрификации прокатных станов получили высокую оценку и были внедрены на ряде предприятий Минчермета. Там же Г.М. Иванов успешно защитил диссертацию на соискание учёной степени кандидата технических наук.

С 1964 г. его творческий путь связан с ВНИИэлектропривод (ныне ОАО «Электропривод»).

Профессор Г.М. Иванов является одним из ведущих учёных РФ в области создания электропривода общепромышленного назначения. Научное



направление, разрабатываемое профессором и его учениками, касается многосвязных электромеханических систем. Научные исследования и разработки Г.М. Иванова широко известны российским и зарубежным специалистам.

Г.М. Иванов опубликовал более 200 научных работ, в том числе 4 монографии, 6 патентов, 21 авторское свидетельство.

Монографии «Автоматизированный электропривод агрегатов непрерывного действия», «Автоматизированный электропривод в химической

промышленности», «Автоматизированный многодвигательный электропривод постоянного тока» получили высокую оценку специалистов-разработчиков электроприводов.

В 1981 г. ему присуждена учёная степень доктора технических наук. Ряд современных разработок выполненных под руководством и при непосредственном участии профессора Г.М. Иванова, в том числе для таких отраслей промышленности, как авиационная, горно-металлургическая, нефтедобывающая, шинная, кабельная, бумагоделательная и другие, стали базовыми.

Многие годы Г.М. Иванов совмещал научную работу с педагогической деятельностью, преподавая в ВЗПИ и в МЭИ.

В настоящее время Г.М. Иванов – директор научно-производственного центра «Электропривод-Индустрия» ОАО «Электропривод».

Гелий Михайлович полон энергии, сил и творческих замыслов.

Коллеги и друзья желают Гелию Михайловичу здоровья и творческих успехов в работе.

Индекс
71111

ISSN 0013-5860 Электротехника. 2007. № 12. 1—64.