

Министерство высшего и среднего специального
образования СССР

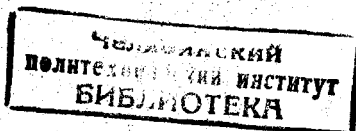
Челябинский политехнический институт
имени Ленинского комсомола

Панова Елизавета Дмитриевна

ИССЛЕДОВАНИЕ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА АВТОМАТИЧЕСКИ
УПРАВЛЯЕМЫХ ДУГОГАСЯЩИХ КАТУШЕК
С ПРОДОЛЬНОМ ПОДМАГНИЧИВАНИЕМ

Специальность 05.13.05 -
"Элементы и технические средства
управления и регулирования"

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Челябинск, 1973

Работа выполнена в Челябинском политехническом институте им. Ленинского комсомола на кафедре электроснабжения промышленных предприятий и городов.

Научный руководитель - кандидат технических наук,
доцент И.М. УШАКОВ

Официальные оппоненты: заслуженный деятель науки и техники, доктор технических наук,
профессор С.П. ЛЕБЕДЕВ,
кандидат технических наук,
доцент Н.Д. МОИШКО.

Ведущее предприятие - районное энергетическое управление "Челябэнерго".

Автореферат разослан "___" _____ 1973 года.

Защита диссертации состоится "___" _____ 1973 года.

в _____ часов на заседании Совета приборостроительного и энергетического факультетов Челябинского политехнического института им. Ленинского комсомола.

Адрес: г. Челябинск, 454044, проспект им. В.И. Ленина,
76, главный корпус, ученому секретарю Совета
института.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке.

Ученый секретарь Совета,
кандидат технических наук, доцент



/Д.А.КОРОЛЕНКО/

При высоких темпах энергетического строительства, предусмотренных пятилетним планом развития народного хозяйства СССР, одной из важнейших проблем является обеспечение высокой надежности и экономичности всех элементов электрических систем, в том числе, электрических сетей 6, 10, 35 кВ.

Одним из наиболее эффективных средств увеличения надежности работы сетей этого класса является применение резонансного заземления нейтрали. При дуговых замыканиях на землю резонансное заземление нейтрали, полностью компенсируя ток в месте замыкания, способствует погасанию дуги и в последующем обеспечивает малую скорость восстановления напряжения на дуговом промежутке, что резко уменьшает вероятность его повторного пробоя. Уменьшаются и перенапряжения на здоровых фазах.

Как показывает, проведенное в диссертации исследование уже при расстройке компенсации порядка 5 % создается опасность повторных зажиганий дуги, а при степени компенсации $k < 0,8$ или $k > 1,4$ процесс дугового замыкания мало отличается от такового в сети с изолированной нейтралью.

Обеспечение необходимого уровня надежности работы электрической сети в условиях непрерывных изменений её эксплуатационной схемы требует автоматизации процесса настройки дугогасящих катушек (ДК) в резонанс с ёмкостью сети. Внедрение систем автоматической компенсации в сетях 6-35 кВ выдвигает задачу конструирования высоконадежных и экономичных управляемых дугогасящих аппаратов.

В работе теоретически обоснованы основные требования, предъявляемые к указанным аппаратам.

I. Целесообразные пределы регулирования составляют $K_p = 2-3$. Для сетей, имеющих бóльший диапазон изменения величины ёмкостного тока, следует предусмотреть возможность применения базовых нерегулируемых дугогасящих катушек и реакторов индивидуального исполнения с $K_p > 3$, что вполне осуществимо, так как ДК с плавным регулированием индуктивности могут иметь достаточно большие пределы изменения тока. При этом значение регулируемого параметра (воздушного зазора, тока подмагничивания) должно выбираться, исходя из экономических соображений. Для дугогасящих катушек с продольным подмагничиванием область экономически эффективного регулирования ограничивается величиной

$$n_s = \frac{dI_n W_k}{dI_n W_0} = \frac{1}{3}.$$

2. Содержание высших гармонических составляющих в намагничивающем токе ДК допустимо (4-6) %, при этом объём активных материалов и стоимость катушки существенно снижаются, а увеличение остаточного тока замыкания на землю незначительно.

3. Максимальная величина потерь активной мощности в дугогасящих аппаратах определяется допустимым значением активной составляющей тока в месте замыкания, величиной перенапряжений в сети и вероятностью их появления, и наконец, экономическими показателями катушки. При проектировании следует принимать

$$P_{\text{и макс.}} = 0,04 - 0,06 .$$

4. Допустимая величина нелинейности вольтамперных характеристик ДК $\delta(\text{max})$ составляет 10 %, при этом, как показали результаты моделирования переходных процессов в компенсированной сети, качество их не ухудшается.

5. Требуемое быстродействие автоматически настраиваемых дугогасящих аппаратов зависит от режима сети, в котором осуществляется регулирование. В нормальном режиме допускается время регулирования порядка единиц и десятков секунд, при дуговых замыканиях на землю, а также пофазных отключениях в сети оно измеряется десятками долями секунды.

6. Мощность, расходуемая в цепи управления, должна быть минимальна, что обуславливает незначительный расход активной энергии.

В настоящее время в разработке автоматических дугогасящих катушек по способу регулирования индуктивности наметились три основных направления: путем мелкоступенчатого переключения отпечек с помощью вольтдобавочного трансформатора с подмагничиванием или дросселя насыщения, включаемых последовательно с ДК; путем введения переменного воздушного зазора в магнитную систему ДК и путем подмагничивания магнитной системы аппарата постоянным током - ДК с параболической зависимостью между потоком и намагничивающим током, ДК с поперечным подмагничиванием и ДК с продольным подмагничиванием.

В диссертации проведено сравнение существующих типов дугогасящих катушек с учетом требований, предъявляемых к ним при регулируемой компенсации ёмкостных токов, и поддерживается точка зрения на дугогасящие устройства с продольным подмагничиванием, как один из самых экономичных аппаратов для резонансного заземления нейтрали.

Применительно к аппаратам этого типа дан анализ, происходящих в них процессов, разработана методика расчета регулировочных и других характеристик, рекомендованы мероприятия по улучшению формы тока, уменьшению потерь активной мощности. Предложен инженерный метод расчета основных конструктивных параметров ДК с подмагничиванием и показаны широкие возможности применения их в сетях 6 - 35 кВ.

Конструкция дугогасящей катушки с продольным подмагничиванием

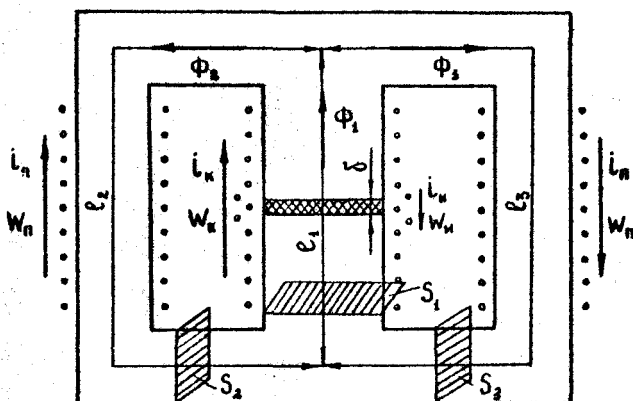


Рис. I

Магнитная система - трехстержневая. На среднем стержне располагаются обмотки компенсации и измерительная, на крайних - две идентичные обмотки подмагничивания, включенные последовательно и согласно, при этом ЭДС, наводимые в них от переменного магнитного потока, направлены навстречу и компенсируют одна другую. В среднем стержне с целью улучшения формы кривой намагничивания предусматривается единый или распределенный воздушный зазор.

Предлагаемая дугогасящая катушка отличается от всех имеющих-ся подобных аппаратов технологичностью изготовления, простотой конструкции и вместе с тем обеспечивает плавную как ручную, так и автоматическую регулировку индуктивности без отключения устройства от сети за счет изменения тока в цепи управления при мощности

обмотки подмагничивания, не превышающей 1 % от номинальной мощности катушки.

Математическая модель ДК с продольным подмагничиванием

Рассматриваемый аппарат представляет собой магнитную цепь с воздушным зазором, электромагнитное состояние которой определяется электрическими параметрами обмоток управления и компенсации. Изучение устройств со стальным сердечником, обладающим переменной магнитной проницаемостью, в значительной мере затрудняется невозможностью пользоваться принципом наложения при рассмотрении магнитных потоков в элементах конструкции. Поэтому при анализе работы дугогасящих катушек с подмагничиванием следует исходить непосредственно из результирующей картины магнитного поля. Эта картина сложна и непрерывно изменяется с изменением тока в цепи управления.

Математическая модель строится в предположении, что все линии магнитной индукции, сцепляющиеся с обмотками катушки, можно разделить на четыре группы: линии магнитной индукции, замыкающиеся по сердечнику $\Phi_1(t)$ и $\Phi_2(t)$ и сцепляющиеся как с витками обмотки компенсации $\Phi_3(t)$, так и с витками обмотки подмагничивания $\Phi_n(t)$ и определяющие основной намагничивающий поток ДК; линии магнитной индукции, сцепляющиеся только с обмоткой компенсации и только с обмоткой управления, определяющие их потоки рассеяния $\Phi_{кв}$ и $\Phi_{ув}$, и наконец, линии магнитной индукции, определяющие вытеснение магнитного потока по внешнему контуру (ярмам и крайним стержням) магнитопровода катушки - Φ_4 . Составленная в диссертации картина распределения электромагнитного поля в ДК показала, что последний поток изменяется не только во времени, но и в пространстве - вытеснение магнитного потока усиливается по мере движения по магнитопроводу от среднего стержня к крайнему.

Так как линии потоков рассеяния обмоток замыкаются главным образом по воздуху, то можно считать, что потокосцепления рассеяния $w_k \Phi_{кв}$ и $w_u \Phi_{ув}$ пропорциональны соответствующим токам и записать для обмоток следующие расчетные уравнения:

$$U_k(t) = L_{кк} \frac{di_k(t)}{dt} + \frac{w_k d\Phi_k(t)}{dt} + i_k(t) R_k,$$

$$U_u = L_{уу} \frac{di_u(t)}{dt} + \frac{w_u d\Phi_u(t)}{dt} + i_u(t) R_u.$$

Здесь $L_{ск}, L_{сн}, R_k, R_n$ - соответственно индуктивности рассеяния и активные сопротивления обмоток компенсации и подмагничивания,

$U_k(t) = U_{mk} \cos \omega t$ - синусоидальное напряжение, приложенное к обмотке переменного тока,

U_n - постоянное напряжение в цепи управления.

Учитывая, что для любого участка магнитной цепи напряженность и магнитная индукция изменяются по кривой намагничивания $H = f(B)$, а поток рассеяния равномерно распределен по длине магнитопровода, можно записать уравнения, определяющие электромагнитное состояние магнитной системы ДК:

$$\frac{\partial \Phi_i(x, t)}{\partial x} = -g_s f_i(x, t), \quad \frac{\partial F_i(x, t)}{\partial x} = \ell_i H_i(x, t)$$

■ граничные условия:

$$\left. \frac{\partial \Phi_i(x, t)}{\partial x} \right|_{x=0} = g_s f_i(0, t) = -g_s \{ i_k(t) w_k - [\Phi_i(t) R_{рв} + \frac{f(\Phi_i(t))}{S_i} \ell_i] \};$$

$$\left. \frac{\partial \Phi_i(x, t)}{\partial x} \right|_{x=1} = -g_s i_n(t) w_n;$$

$$\sum \Phi_i(x, t) \Big|_{x=0} = \Phi_i(t); \quad \left| \Phi_2(t) - \Phi_3(t) \right|_{x=1} = \Phi_n(t).$$

Здесь g_s - магнитная проводимость потока рассеяния каждого из участков внешней магнитной цепи магнитопровода катушки;

$R_{рв}$ - магнитное сопротивление воздушного зазора;

$f_i(x, t)$ - намагничивающая сила, действующая вдоль контура магнитной цепи;

Индекс $i = 2, 3$ относится соответственно ко второму ℓ_2 и третьему ℓ_3 участкам внешней магнитной цепи;

x - координата текущей точки участка в относительных единицах.

Решение полученной системы нелинейных дифференциальных уравнений сложно и связано с необходимостью аппроксимации кривой намагничивания и определения параметров магнитной цепи: $L_{ск}, L_{сн}, R_{рв}, g_s, R_n, R_k$.

В диссертации проведен анализ качественного и количественного влияния параметров математической модели на физические процессы, происходящие в дугогасящих катушках, и установлено, что активными сопротивлениями обмоток компенсации и подмагничивания можно пренеоречь в виду их малости, а равномерно распределенный

поток рассеяния по магнитопроводу – заменить сосредоточенным и учесть его одновременно с потоками рассеяния обмоток. Рассмотрена возможность аппроксимации кривой намагничивания дробнолинейной функцией, степенным рядом и гиперболическим синусом, при этом наиболее удобной для расчета является функция $H = d \operatorname{sh} \beta B$, точность же расчета характеристик ДК при любом способе аппроксимации, примерно одинакова. Это позволило упростить расчетную систему уравнений.

Методы расчета характеристик дугогасящих катушек с продольным подмагничиванием

Упрощенная математическая модель ДК с подмагничиванием представляется системой трансцендентных нелинейных уравнений с дифференциальной связью:

$$\Phi_1(t) = \frac{1}{W_n} \int_0^t U_{mk} \cos \omega t \, dt \quad (1)$$

$$i_n(t) W_n = \Phi_1(t) R_{ps} + d d_1 \operatorname{sh} \beta_1 \Phi_1(t) + f_1(t) \quad (2)$$

$$f_1(t) = d d_2 \operatorname{ch} \beta \Phi_n(t) \cdot \operatorname{sh} \beta \Phi_{10}(t) \quad (3)$$

$$f(t) = i_n(t) W_n - d d_2 \operatorname{ch} \beta \Phi_n(t) \cdot \operatorname{ch} \beta \Phi_{10}(t) \quad (4)$$

$$\Phi_{10}(t) = \Phi_1(t) + \Phi_2(t) = \Phi_1(t) - \frac{X_{sc}}{\omega W_n^2} f_1(t) \quad (5)$$

$$\Phi_n(t) = \Phi_3(t) - \Phi_2(t) \quad , \quad \Phi_{n0}(t) = \Phi_n(t) + \Phi_{n0}(t) \quad (6)$$

$$\Phi_{n0}(t) = \frac{X_{sn}}{\omega W_n} i_n(t) \quad (6)$$

$$\frac{W_n d \Phi_{n0}(t)}{dt} = \frac{d \Phi_n(t)}{dt} + \frac{X_{sn}}{\omega W_n} \frac{di_n(t)}{dt} = 0 \quad (7)$$

Здесь $\beta = \alpha \beta / 2k_c S_1$, $\beta_1 = \beta' / k_c S_1$, $\alpha = S_1 / S_2$.

d_1, β_1 – коэффициенты аппроксимации начального участка кривой намагничивания;

d, β – то же для насыщенного участка кривой $H = f(B)$;

k_c – коэффициент, учитывающий заполнение сечения стержня сталью.

Для получения её решения прежде всего проведено качественное исследование характера изменения во времени токов в обмотках компенсации и управления и установлено, что

$$\frac{di_n(t)}{dt} = 0 \quad \text{при} \quad \begin{cases} \text{I} - \frac{d\Phi_{10}(t)}{dt} = 0, \quad \frac{di_k(t)}{dt} = 0, \quad u_k(t) = 0; \\ \text{II} - \Phi_{10}(t) = 0, \quad i_k(t) = 0, \quad \int_0^t u_k(t) dt = 0. \end{cases}$$

Откуда следует, что период изменения $i_n(t)$ вдвое меньше периода промышленной частоты, при этом в момент времени, когда $i_k = \pm I_{k\max}$ (условие I), имеет место максимум тока $i_n(t)$ и минимум потока $\Phi_n(t)$, а при $i_k = 0$ (условие II) - минимум тока $i_n(t)$ и максимум потока $\Phi_n(t)$.

Представляет интерес условие I, соответствующее моменту времени, когда токи $|i_k(t)|$ и $i_n(t)$ одновременно достигают максимума, а поток $\Phi_n(t)$ - минимума. В этот момент времени удовлетворяется дифференциальное уравнение (7) общей системы и для определения зависимости $I_{k\max} = f(I_{n\max})$ используется простая система алгебраических уравнений (I-5), переписанная для $\omega t_0 = \pi/2$.

Генная её, находится

$$f_{1\max} = I_{n\max} W_n = \alpha l_2 \operatorname{ch} 6\Phi_{10\max} \sqrt{\left(\frac{f_{1\max}}{\alpha l_2 \operatorname{sh} 6\Phi_{10\max}}\right)^2 - 1} = f(I_{k\max})$$

при условии, что $f_{1\max} \geq \alpha l_2 \operatorname{sh} 6\Phi_{10\max}$, и минимальный поток $\Phi_{n\min}$ из выражения:

$$\operatorname{sh} 6\Phi_{n\min} = \frac{I_{n\max} W_n}{\alpha l_2 \operatorname{ch} 6\Phi_{10\max}}.$$

Зная $I_{k\max}$ и $\Phi_{n\min}$, можно решить и полную систему исходных уравнений.

Действительно, согласно (7), суммарный магнитный поток, сцепленный с обмоткой управления, не меняется во времени

$$\Phi_n(t) + \frac{\chi_{sn}}{\omega W_n} i_n(t) = \Phi_{nz} = \text{const}, \quad (8)$$

а величина его определится по условию I ($\omega t = \pi/2$)

$$\Phi_{nz} = \Phi_{n\min} + \frac{\chi_{sn}}{\omega W_n} I_{n\max}. \quad (9)$$

Подставляя (9) в (8) и обозначая

$$\Delta i_n(t) = I_{n\max} - i_n(t), \quad \Delta \Phi_n(t) = \Phi_n(t) - \Phi_{n\min}, \quad (10)$$

можем вместо (7) записать следующее алгебраическое соотношение

$$\Delta \Phi_n(t) = \frac{\chi_{sn}}{\omega W_n} \Delta i_n(t). \quad (11)$$

В результате задача сводится к решению системы алгебраических уравнений.

Для любого мгновенного значения тока в обмотке управления $i_n(t)$ определяется приращение $\Delta i_n(t) = I_{n\max} - i_n(t)$.

По (II) находится $\Delta \Phi_n(t)$, а затем значение потока $\Phi_n(t) = \Phi_{n\text{min}} + \Delta \Phi_n(t)$. По уравнению (4) определяется поток $\Phi_{\mu}(t)$, а из (3) — $f_i(t)$. Затем в результате совместного решения уравнений (2 и 5) находятся мгновенные значения намагничивающего тока $i_k(t)$ и потока $\Phi_i(t)$, а из (I) — время t .

Значения $I_{n\text{min}}$ и $\Phi_{n\text{max}}$ определяются из условия II (при $t = 0, \Phi_i = 0$).

$$\Delta \Phi_{n\text{max}} = \Phi_{n\text{max}} - \Phi_{n\text{min}} = \frac{\chi_{\text{сн}}}{\omega W_n} (I_{n\text{max}} - I_{n\text{min}}),$$

$$I_{n\text{min}} W_n = d l_2 \text{sh} b \left\{ \Phi_{n\text{min}} + \frac{\chi_{\text{сн}}}{\omega W_n} (I_{n\text{max}} - I_{n\text{min}}) \right\}.$$

На основе рассмотренного способа расчета в диссертации составлена методика определения мгновенных и действующих значений токов компенсации и подмагничивания, их гармонического состава, мгновенных и действующих значений магнитных потоков и индукций во всех элементах конструкции ДК и т.д. с использованием ЦВМ.

Предложенным методом были рассчитаны кривые изменения во времени токов компенсации и подмагничивания, а также характеристики для различных ДК (рис. 2).

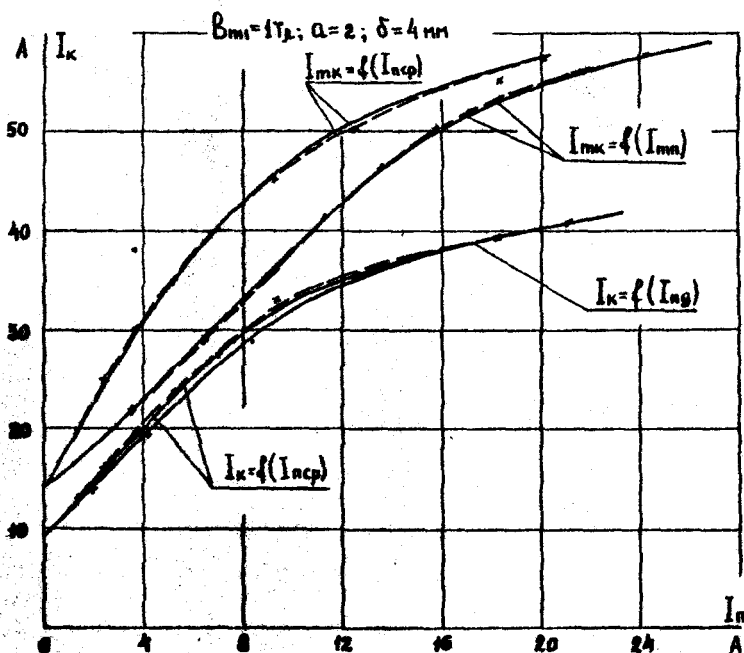


Рис.2

На рис.2 представлены зависимости максимального $I_{км}$ и действующего I_k значения намагничивающего тока ДК от максимального $I_{лм}$, действующего $I_{лг}$ и среднего $I_{лср}$ значения тока подмагничивания (---- расчетные кривые; — экспериментальные кривые).

Погрешность расчета незначительна и определяется, в основном, точностью аппроксимации кривой намагничивания и правильным выбором параметров схемы замещения: $X_{лп}, X_{лс}, R_{лб}$. В диссертации предлагаются методы их определения с использованием экспериментальных данных.

В работе получены формулы для частных случаев расчета характеристик ДК при различных реактансах рассеяния и установлены области их применимости. Рассмотрена математическая модель ДК с равномерно распределенным по длине потоком рассеяния, разработана для неё методика расчета характеристик $I_{км} - f(I_{лм})$ с использованием ЦВМ. Последняя требует большого количества сложных и громоздких математических вычислений, однако погрешность расчета по сравнению с ранее принятой схемой замещения уменьшается, примерно, на 1,5-2%, следовательно, учет потока рассеяния сосредоточенно вполне оправдан.

Теоретические и экспериментальные исследования дугогасящих катушек с подмагничиванием

Аналитический расчет дугогасящих катушек с подмагничиванием показал, что объем стали магнитопровода определяется их мощностью, причем линейные размеры должны обеспечить окно, достаточное для размещения обмоток. Величина и форма намагничивающего тока зависят от соотношения a сечений стержней магнитопровода, воздушного зазора δ и характеристик электромагнитного поля - индукции $B_{ст}$ в среднем стержне и ампервитков подмагничивания $I_{квк}$.

Увеличение указанных параметров приводит к росту индуктивного тока ДК.

1. Регулировочные характеристики (рис.3), т.е. зависимости $I_{квк} - f(I_{лвк})$ на начальном участке прямолинейны, в дальнейшем линейный характер изменения намагничивающего тока при увеличении ампервитков подмагничивания нарушается, что объясняется, в основном, интенсивным вытеснением магнитного потока по внешней цепи магнитопровода. В целях обеспечения экономически эффективного регулирования значение $I_{лвк}$ следует ограничить до $n_3 - 1/3$.

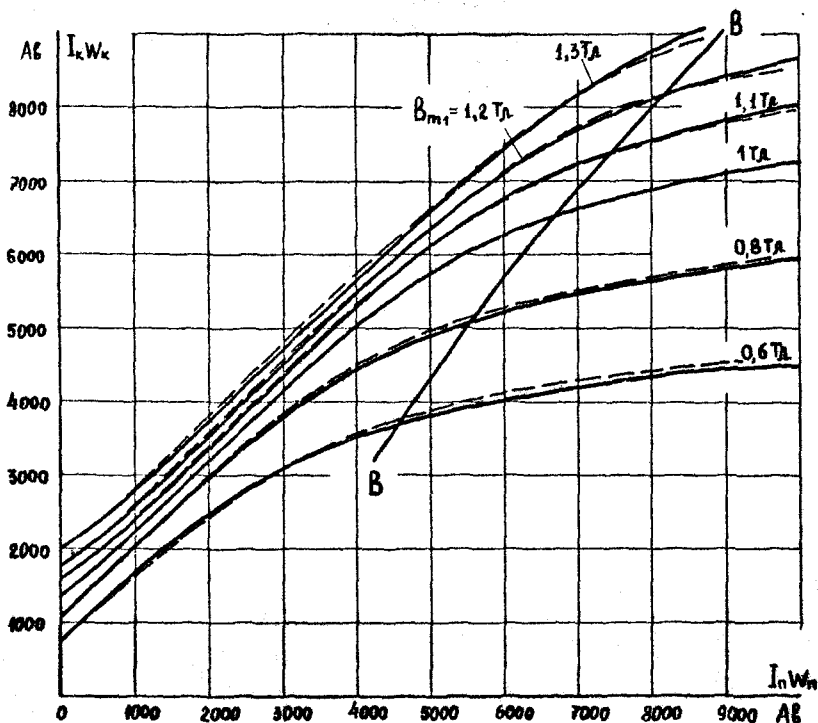


Рис. 3

2. Характер изменения индуктивного тока в зависимости от индукции переменной составляющей потока B_m , полностью определяется кривой намагничивания стали магнитопровода. Предельное значение B_m ограничивается по тепловому режиму катушки.

3. Увеличение воздушного зазора в среднем стержне приводит к росту намагничивающего тока, в основном, за счет увеличения начального тока при отсутствии подмагничивания. Величина δ ограничивается коэффициентом регулирования тока катушки.

4. С увеличением сечения среднего стержня по сравнению с сечением крайних возрастает и ток катушки, причём, ампервитки его при максимальном подмагничивании нарастают интенсивнее, чем начальные.

Кроме того на величины B_m , δ , а соответствующие ограничения накладываются по условию обеспечения синусоидальной формы тока компенсации.

Содержание высших гармоник в намагничивающем токе обусловлено нелинейностью кривой намагничивания стали магнитопровода и, как показали проведенные в диссертации исследования, зависит от параметров катушки.

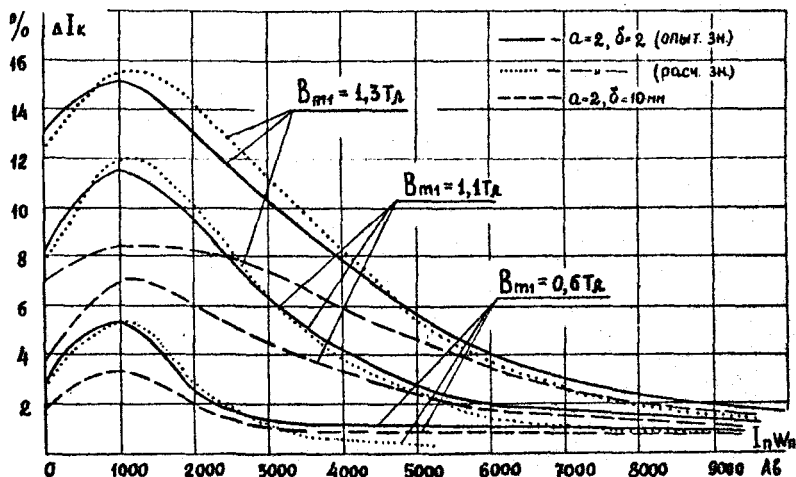


Рис. 4

I. Зависимость процентного содержания высших гармоник в намагничивающем токе от ампервитков управления $\Delta I_k \% = f(I_{пWн})$ имеет экстремальный характер (рис. 4). Наибольшее искажение его соответствует работе ДК на колене кривой намагничивания. При этом имеет место как наиболее высокий уровень нечетных гармоник в токе компенсации, так и четных гармоник в цепи управления. Последние усиливают искажение индуктивного тока. При отсутствии подмагничивания, а также при больших токах управления форма намагничивающего тока улучшается. В первом случае это связано с работой ДК на начальном, практически, линейном участке кривой намагничивания, во втором - с работой ДК в области насыщения. Более того уменьшение содержания гармоник в намагничивающем токе при больших ампервитках подмагничивания обусловлено существенным уменьшением переменной составляющей потока во внешнем контуре магнитопровода вследствие вытеснения её на пути рассеяния и, следовательно, сужением рабочей зоны. Это делает магнитную цепь по переменному потоку более линейной.

2. При увеличении индукции форма тока компенсации ухудшается, т.к. все гармоники с ростом B_m изменяются по законам параболы, причем, третья гармоника растет быстрее, чем первая, а пятая - быстрее, чем третья и т.д. Для любой конструкции катушки можно всегда указать такое предельное значение B_m , при котором максимальное процентное содержание высших гармоник в намагничивающем токе не превысит допустимой величины.

3. Увеличение зазора приводит к росту первой гармоники намагничивающего тока, что улучшает его форму.

4. Увеличение сечения крайних стержней при $B_m = const$ уменьшает переменную составляющую индукции во внешней магнитной цепи, что способствует линейризации её относительно переменного потока, т.е. улучшению формы индуктивного тока.

В работе проведен также анализ влияния реактансов рассеяния обмоток компенсации и подмагничивания на намагничивающий ток i_k и ток управления i_n и установлено, что увеличение X_{sk} всегда улучшает форму индуктивного тока, но уменьшает его величину. При увеличении же X_{sn} величина тока i_k , практически, не меняется, тогда как форма изменяется существенно. При $X_{sn} = 0$ ток компенсации имеет наиболее искаженную заостренную форму и наибольший уровень четных гармоник в токе подмагничивания. С увеличением X_{sn} содержание четных гармоник в цепи управления уменьшается и форма тока компенсации улучшается. Однако при $X_{sn} \rightarrow \infty$, когда ток подмагничивания становится постоянным, ток компенсации снова искажается, но имеет уже уплощенную форму.

Таким образом, обеспечение заданного намагничивающего тока достигается соответствующим выбором параметров дугогасящих аппаратов.

Экспериментальные и теоретические исследования, проведенные на модели, создали реальную основу научного подхода к решению задачи определения оптимальных конструктивных параметров ДК и расчета их регулировочных характеристик.

Инженерный метод расчета дугогасящих катушек с продольным подмагничиванием

Предлагаемый метод основан на физическом подобии реальной конструкции и модели, которое имеет место при равенстве магнит-

ных индукций и напряженностей во всех элементах магнитопровода и пропорциональном соотношении линейных размеров модели и реально-го устройства, выполненных из одного и того же материала.

Аналитически величина коэффициента подобия, как доказано в диссертации, определяется только мощностью модели и катушки в лю-бом режиме работы

$$K_{\text{пог}}^2 = \theta_k / \Omega_n .$$

Соблюдая условия подобия, можно рассчитывать характеристики и параметры дугогасящих устройств простым пересчетом уже исследо-ванного, подобного им аппарата, каковым в данном случае является модель ДК:

$$E_i = K_{\text{пог}} E_{iM} , \quad S_i = K_{\text{пог}}^2 S_{iM} ,$$

$$I_k W_k = K_{\text{пог}} (I_k W_k)_M , \quad I_k W_k = K_{\text{пог}} I_k W_k , \quad \frac{U_k}{W_k} = \frac{K_{\text{пог}}^2 U_M}{W_M} .$$

При расчете ДК её конструкция и параметры обмоток должны обеспечить в заданных пределах изменения тока экономичное регули-рование, практически синусоидальную форму тока и допустимый теп-ловой режим аппарата. Эти условия выполняются, если при проекти-ровании ДК использовать универсальные расчетные кривые $\Omega_{\text{нп}} = \mathcal{F}_1(\delta_*)$, $V_{\text{тн}} = \mathcal{F}_2(\delta_*)$, $K_p = \mathcal{F}_3(\delta_*)$. Зависимость $V_{\text{тн}} = \mathcal{F}_2(\delta_*)$ определяет значение магнитной индукции и воздушного зазора $\delta_* = \frac{\delta}{\ell_1 + \ell_2}$, ко-торые обеспечивают допустимое содержание высших гармоник в намаг-ничивающем токе катушки и заданный тепловой режим, зависимость $K_p = \mathcal{F}_3(\delta_*)$ при выбранных $V_{\text{тн}}$ и δ_* ограничивает область экономиче-ски эффективного регулирования, и наконец, $\Omega_{\text{нп}} = \mathcal{F}_1(\delta_*)$ определяет коэффициент подобия, т.е. конструкцию ДК.

В диссертации предложены методы графического и аналитическо-го построения универсальных расчетных кривых для различных моде-лей катушек. Анализ их показал, что для всех рассмотренных конст-рукций при заданном коэффициенте регулирования начальная мощность модели, определяющая расход активных материалов в магнитопроводе катушки, остается практически постоянной, следовательно, в ка-честве оптимального варианта следует принять тот, для которого наименьшее значение имеет величина максимальной магнитной индук-ции в среднем стержне магнитопровода, т.е. $\Omega = 2$. Последнее, очевидно, облегчит тепловой режим катушки.

Предлагается следующая методика расчета дугогасящих аппара-

тов на любые параметры с использованием коэффициента регулирования:

1. Заданный коэффициент регулирования сохраняет свое значение и для модели - K_p .

2. По универсальным кривым и K_p находятся $Q_{нн}$, $B_{нн}$, δ_n .

3. По начальной мощности модели и катушки определяется коэффициент подобия, а по нему конструктивные размеры магнитопровода катушки.

4. Сохраняя одинаковыми значения напряженностей и магнитных индукций во всех элементах магнитопровода реального устройства и модели, проводится расчет обмоток компенсации и подмагничивания.

5. По регулировочным характеристикам модели строятся регулировочные характеристики реальной катушки.

При проектировании сухих ДК с $K_p \leq 2$ можно уменьшить расход активных материалов, если за исходную величину принять $B_{нн}$, а заданный коэффициент регулирования получить за счет увеличения воздушного зазора в среднем стержне.

Предложенная методика была использована при проектировании ДК с подмагничиванием для систем Ленэнерго, Челябинэнерго, Сыктывкарэнерго.

Оценка погрешности инженерного метода расчета производилась по экспериментальным данным, полученным для дугогасящих катушек ДК-175кВА, 3,64 кВ и ДК-1000 кВА, 21,2 кВ, установленных в системе Ленэнерго. При конструировании указанных аппаратов их параметры рассчитывались по универсальным расчетным кривым, построенным для ДК-350 кВА, 3,64 кВ, которая в данном случае рассматривалась в качестве модели. Погрешность расчета определяется, в основном, точностью воспроизведения условий подобия. Приведенные зависимости $I_{квк} = f(I_{нн})$ (рис.5) для ДК - 175 кВА, 3,64 кВ практически сливаются с характеристиками ДК - 350 кВА, 3,64 кВ, а небольшое отличие, имеющее место для ДК - 1000 кВА, 21,2 кВ, объясняется неточностью в подобии электромагнитных полей рассеяния (разный класс изоляции).

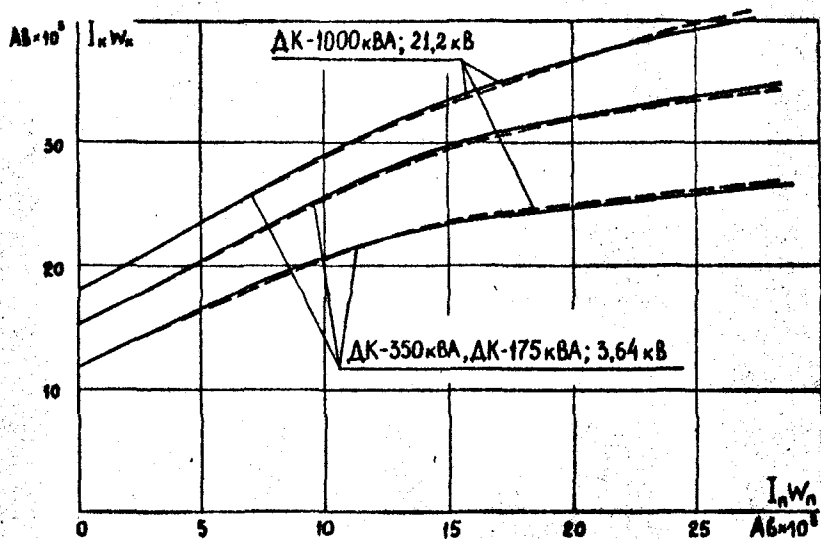


Рис. 5

Потери мощности в дугогасящих катушках с подмагничиванием

Величина их определяется потерями в обмотках, в стали магнитопровода, в стенках бака и в конструктивных элементах. Наибольшую трудность представляет расчет потерь в массивных элементах конструкции и в магнитопроводе, поскольку они зависят от распределения электромагнитного поля, меняющегося с изменением тока в цепи управления.

В работе экспериментально составлена картина распределения электромагнитного поля по магнитопроводу катушки, в пространстве между обмотками и магнитопроводом, а также между обмотками и баком в различных режимах работы, что позволило выявить участки наибольшего нагрева и оценить потери мощности в элементах конструкции ДК.

1. Потери активной мощности в магнитопроводе катушки определяются как величиной магнитной индукции переменного тока, так и

напряженностью постоянного поля. На основе детального экспериментального их анализа установлено, что увеличение напряженности поля подмагничивания при постоянном переменном магнитном потоке приводит к нарастанию активных потерь в стали до некоторой постоянной величины, в дальнейшем они практически не меняются или снижаются. С ростом магнитной индукции потери мощности увеличиваются сравнительно медленно при малых индукциях и быстро в рабочем диапазоне $B_{m1} = 0,8 - 1,2 \text{ Тл}$. Так как зависимости $\Delta P_{ст} = f(B_{m1})$ представляют собой показательные функции, то предлагается следующая методика определения потерь активной мощности в магнитопроводе ДК:

$$\Delta P_{ст} = \Delta P_{ст.ср} \cdot G_{ст} ,$$

где $\Delta P_{ст.ср}$ - удельные потери находятся по эмпирической формуле:

$$\Delta P_{ст.ср} = (n + m N_n) B_{m1}^{\frac{N_n}{k + \sqrt{N_n}}} ;$$

$G_{ст}$ - вес магнитопровода катушки.

Коэффициенты n, m, k, ξ определяются на основе экспериментального материала и зависят от соотношения сечений стержней магнитопровода a . В диссертации получены расчетные формулы для нахождения потерь мощности в моделях ДК с различными a , определены потери в стали, при этом погрешность расчета не превышает $\pm 5\%$ для $N_n > 2 \cdot 10^3 \text{ А/м}$.

При отсутствии подмагничивания потери мощности находятся с помощью методов, рекомендуемых для расчета активных потерь в стали трансформаторов.

Предложенная методика анализа экспериментального материала может быть использована для получения расчетных формул по определению потерь в магнитопроводах реальных дугогасящих устройств.

П. Потери в баке катушки создаются полями рассеяния и следует ожидать, что наибольшее влияние на них окажут боковые стенки, дно и крышка бака, поскольку торцевые стенки частично шунтируются стальными крайними стержнями.

Проведенные исследования показали, что оптимальными, с точки зрения снижения потерь, являются следующие размеры стальных баков: при симметричном расположении катушки расстояние магнитопровода от дна и крышки должно составлять не менее 0,5 его высоты, от боковых стенок - 0,5 и от торцевых - 0,2.

Для аналитического расчета потерь активной мощности в баках ДК может быть использована следующая методика:

1. По конструкции ДК и току обмотки компенсации определяется поле в воздухе для катушки без бака. Оно зависит от ампервитков в цепи управления.

Осевая составляющая электромагнитного поля, определенная на уровне середины высоты обмотки в предположении, что обмотка заменена тонкой пластинкой, равна

$$H_z^{(0)} = \frac{(I_k W_k) k_v}{\sqrt{2} \cdot 2a} \cdot \frac{2}{\pi} a z \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{\rho \delta},$$

где a — половина высоты обмотки компенсации;

$\rho \delta$ — расстояние от обмотки до стенки бака;

k_v — коэффициент вытеснения, величина его определяется по эмпирической формуле

$$k_v = A \left(1 - e^{-\frac{H_n}{k_v m}} \right),$$

полученной в результате анализа картины распределения электромагнитного поля по магнитопроводу катушки.

2. По электромагнитному полю в воздухе и коэффициенту прохождения γ находится касательная составляющая напряженности магнитного поля на внутренней поверхности бака

$$H_t^{(1)} = \gamma H_t^{(0)}.$$

3. С её учетом по активному поверхностному сопротивлению материала бака находятся удельные поверхностные потери

$$\Delta r_{\text{бтmax}} = R H_t^{(1)2} \quad \text{и} \quad .$$

общие

$$\Delta P \delta = \Delta r_{\text{бтmax}} \cdot S_{\text{эф}}.$$

где $S_{\text{эф}}$ — эффективная поверхность бака определяется на основании экспериментальных исследований поля по поверхности бака.

Его эффективная высота составляет $\approx 0,6$ от полной высоты, а эффективный периметр (0,4 — 0,55) от полного (меньшее значение относится к прямоугольному баку, большее к круглому).

Расчет потерь в баках реальных дуготсасящих аппаратов по изложенной методике дает ориентировочно погрешность $+ 15\%$ одностороннего знака, следовательно, она может быть снижена, если анализ картины поля провести более точно: учесть влияние магнитопровода и конструктивных деталей.

По результатам проведенных исследований были спроектированы стальные баки с оптимальными размерами для дугогасящих аппаратов, установленных в системах Ленэнерго, Челябэнерго и т.д., и проведены тепловые испытания. В соответствии с картиной распределения электромагнитного поля на участках наибольшего нагрева устанавливались температурные датчики. Нагрев магнитопровода и обмоток через 2 часа после подключения к работающей катушке максимального переменного напряжения достиг допустимых предельных температур при значительно большем, чем в трансформаторах, объеме охлаждающего масла. Поэтому в диссертации рассмотрены мероприятия по снижению потерь мощности с целью улучшения экономических показателей ДК.

Наиболее эффективным средством является установка в стальных баках магнитных экранов из листов электротехнической стали. В работе экспериментально определены их оптимальные размеры и предложен аналитический метод расчета их толщины.

Для уменьшения расхода трансформаторного масла рекомендуется дугогасящие аппараты на напряжение 6 - 10 кВ выполнять с воздушным охлаждением, а на 35 кВ использовать баки из бипластмассы с навесными металлическими радиаторами.

З а к л ю ч е н и е

1. Значительное повышение надежности работы электрических сетей 6-35 кВ достигается при автоматизации процесса настройки ДК в резонанс с емкостью сети. Наиболее перспективными аппаратами для систем автоматической компенсации емкостных токов являются дугогасящие катушки с продольным подмагничиванием.

2. На основе исследования физических процессов, происходящих в ДК с подмагничиванием и определяемых нелинейностью кривой намагничивания стали магнитопровода и рассеянием магнитного потока в обмотках и по внешнему контуру магнитной цепи, составлена математическая модель, которая описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений и заданными граничными условиями. При этом аналитически и экспериментально оценено влияние параметров модели на характеристики ДК, что позволило несколько упростить расчетные уравнения, не ухудшая качественных и количественных результатов.

3. Разработана методика аналитического расчета характеристик ДК с использованием ЦВМ, которая позволяет находить:

мгновенное и действующее значение намагничивающего тока и тока подмагничивания; состав нечетных гармоник в индуктивном токе и четных в цепи управления; мгновенные значения потоков и индукций электромагнитного поля во всех элементах конструкции и т.д. Погрешность определяется, в основном, точностью аппроксимации кривой намагничивания и выбором параметров схемы замещения ДК и не превышает $\pm 5\%$.

4. Технические показатели дугогасящих аппаратов с подмагничиванием определяются их конструкцией (сечениями стержней и воздушным зазором) и характеристиками электромагнитного поля. При этом для выбранной конструкции мощность ДК определяется объемом стали магнитопровода; кратность регулирования зависит, в основном, от ампервитков подмагничивания; содержание высших гармоник — от величины магнитной индукции переменного потока.

5. Предложен инженерный метод расчета конструктивных размеров и параметров обмоток ДК на любую мощность, который при соблюдении условий подобия дает приемлемую для практики точность.

6. Проведено исследование потерь активной мощности в элементах конструкции ДК, составлена картина распределения электромагнитного поля и в результате предложена эмпирическая формула для определения потерь в магнитопроводе и аналитическая методика расчета потерь в стальных баках.

7. Сформулированы требования, предъявляемые к ДК, как к исполнительным органам в системах автоматической компенсации емкостных токов, и на основе анализа свойств ДК с подмагничиванием установлено, что они полностью отвечают этим требованиям.

8. Разработанные дугогасящие катушки с продольным подмагничиванием успешно эксплуатируются в электрических сетях Ленэнерго и Челябинэнерго.

Результаты работы докладывались на республиканской научно-технической конференции по вопросам разработки, проектирования и эксплуатации устройств компенсации емкостных токов и сигнализации замыканий на землю в компенсированных электрических сетях (г.Изданов, 1970 г), на межобластной научно-практической конференции (г.Челябинск, 1972 г), а также на научно-технических конференциях ЧПИ им.Ленинского комсомола в 1968-1973 годах.

По материалам диссертации опубликованы следующие работы:

1. Влияние нелинейности дугогасящих катушек на настройку компенсации. "Электричество". 1966. № 6 (в соавторстве).

2. Графический метод построения регулировочных характеристик дросселей насыщения. - В сб.: "Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий". НТОЭП. Челябинск. 1969. (в соавторстве).

3. Влияние конструктивных размеров дугогасящей катушки на её регулировочную способность - В сб.: "Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий". НТОЭП. Челябинск. 1969 (в соавторстве).

4. Влияние размеров бака на активную составляющую тока дугогасящей катушки - В сб.: "Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий". Челябинск. Выпуск № 80. 1970 (в соавторстве).

5. Исследование электромагнитного поля дугогасящей катушки с подмагничиванием. - В сб.: "Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий". Выпуск № 80. Челябинск. 1970 (в соавторстве).

6. Инженерный метод расчета дугогасящих катушек с подмагничиванием постоянным током. - В сб.: "Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий". Выпуск № 95. Челябинск. 1971 (в соавторстве).

7. Влияние конструктивных параметров на характеристики дугогасящих катушек. - В сб.: "Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий". Выпуск № 110. Челябинск. 1972 (в соавторстве).

8. Метод расчета дугогасящих катушек с продольным подмагничиванием. - "Электричество". 1970. № 5 (в соавторстве).

9. Определение потерь активной мощности в баке дугогасящей катушки. - В сб.: "Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий". НТОЭП. Челябинск. 1972.

10. Метод расчета оптимальной конструкции дугогасящих катушек с продольным подмагничиванием. Тезисы докладов. Жданов. 1970 (в соавторстве).