

Б 72

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ УССР

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
им. М. В. ЛОМОНОСОВА

С. А. БОБРИКОВ

**Разработка и исследование устройств
для автоматической компенсации
емкостных токов однофазного
замыкания на землю
в компенсированных высоковольтных
сетях**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель—кандидат технических наук,
доцент В. А. СОМОВ

ОДЕССА
1966

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ УССР

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
им. М. В. ЛОМОНОСОВА

С. А. БОБРИКОВ

Разработка и исследование устройств
для автоматической компенсации
емкостных токов однофазного
замыкания на землю
в компенсированных высоковольтных
сетях

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пергудет 19 87 г.

Научный руководитель — кандидат технических наук,
доцент В. А. СОМОВ



~~С.В. 965~~
V000965

ОДЕССА
1966

ОНАХТ 20.06.11
Разработка и исследо



Одесский технологический институт им. М. В. Ломоносова направляет Вам для ознакомления автореферат диссертационной работы аспиранта Бобрикова С. А. на тему «Разработка и исследование устройств для автоматической компенсации емкостных токов однофазного замыкания на землю в компенсированных высоковольтных сетях», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Защита состоится „_____“ _____ 196 г.

Ваши отзывы и замечания в 2-х экземплярах просим направлять по адресу: г. Одесса, ул. Свердлова, № 112, Одесский технологический институт.

Работа выполнена в Одесском политехническом институте.

Ученый секретарь Совета

(Запорожец Л. А.)

В сетях с изолированной нейтралью при замыкании одной из фаз на землю через место замыкания протекают токи, обусловленные емкостями между фазами сети и землей.

Для компенсации емкостных токов однофазного замыкания на землю применяются дугогасящие катушки, включаемые между нулевой точкой одного из трансформаторов и землей. При настройке дугогасящей катушки в резонанс с емкостью сети ток однофазного замыкания на землю имеет минимальное значение. При этом предотвращается разрушение токоведущих частей и изоляции в месте замыкания на землю, уменьшается опасность перехода однофазного замыкания в многофазное короткое замыкание и т. д.

Повышение надежности работы компенсированных сетей может быть достигнуто при автоматизации процесса настройки дугогасящей катушки в резонанс с емкостью сети.

Вопрос автоматического регулирования настройки катушки может быть решен лишь при совместном изучении всех элементов, составляющих систему автоматики, включая регулятор, регулирующий орган, исполнительное устройство и т. д.

Одним из наиболее важных элементов в системе автоматической компенсации емкостных токов однофазного замыкания на землю является исполнительное устройство—дугогасящая катушка. Применяемые в настоящее время дугогасящие катушки по способу регулирования индуктивности можно разделить на несколько типов.

1. Катушки, регулируемые переключением отпаек. Эти катушки наиболее широко применяются. Они имеют встроенный переключатель, с помощью которого производится настройка катушки.

Катушка обладает следующими недостатками: ступенчатое регулирование, наличие переключателя, снижающего надежность катушки, невозможность вести настройку при включенной катушке. Все это затрудняет использование таких катушек в системе автоматического регулирования.

2. Катушки с плавным регулированием индуктивности путем изменения зазора в магнитопроводе (катушки плунжерного типа). В такой катушке часть магнитопровода при настройке перемещается. При протекании тока в рабочих обмот-

ках в магнитопроводе создаются большие динамические усилия, что увеличивает требования к механической прочности и делает конструкцию громоздкой. Время регулирования таких катушек сравнительно велико.

3. Катушки, регулируемые подмагничиванием постоянным током.

Основным недостатком применяемых дугогасящих катушек, регулируемых подмагничиванием постоянным током, является то, что они искажают форму кривой тока. Высшие гармоники, генерируемые катушкой, не участвуют в компенсации емкостных токов и лишь увеличивают остаточный некомпенсированный ток на землю.

Таким образом, применяемые в настоящее время дугогасящие катушки мало соответствуют требованиям автоматического регулирования, которые можно свести к следующему: настройка должна быть плавной, дистанционной, без отключения катушки от сети. Катушка должна быть надежной и не должна искажать форму кривой тока.

В связи с этим, представляется целесообразным разработать катушку, отвечающую перечисленным выше требованиям, а также автоматический регулятор к такой катушке.

Использование вольтодобавочного трансформатора и дросселя насыщения для регулирования индуктивности дугогасящей катушки

В связи с тем, что в эксплуатации еще находится большое число дугогасящих катушек с регулированием индуктивности путем переключения ответвлений, наряду с разработкой новых типов дугогасящих катушек целесообразно разрабатывать специальные устройства — приставки к существующим катушкам, которые позволили бы плавно регулировать индуктивность катушки в пределах одной или нескольких секций.

Исследованы схемы плавного регулирования индуктивности дугогасящей катушки с помощью вольтодобавочного трансформатора с подмагничиванием и с помощью дросселя насыщения, включаемых последовательно с дугогасящей катушкой [1].

Испытания проводились на макетах дугогасящей катушки с отпайками мощностью 1—3 *квар*, вольтодобавочного трансформатора с подмагничиванием мощностью 400 *ва* и дросселя насыщения мощностью 500 *ва*. Исследовались глубина регулирования и коэффициент нелинейных искажений регулируемого тока при различных значениях индукции B_m , создаваемой обмотками переменного тока в сердечниках вольтодобавочного трансформатора и дросселя насыщения.

Испытания показали, что:

1. Регулирование индуктивности дугогасящей катушки с помощью вольтодобавочного трансформатора, включенного последовательно с катушкой, с малыми искажениями регулируемого тока возможно лишь при малых значениях индукции B_m в сердечнике трансформатора (до 4000 гс) и при малой глубине регулирования $\left(\frac{I_{\sim \max}}{I_{\sim \min}} = 1,4 - 1,5\right)$.

2. Регулирование индуктивности по схеме дроссель насыщения—дугогасящая катушка также возможно либо при малых значениях индукции B_m в дросселе, либо с малой глубиной регулирования.

Так как конструктивно дроссель насыщения значительно проще вольтодобавочного трансформатора с подмагничиванием, ему следует отдать предпочтение.

3. Рассмотрена также возможность работы одного дросселя насыщения с параллельным соединением рабочих обмоток в качестве дугогасящей катушки. При индукции $B_m = 4500$ гс глубина регулирования составила 1:2 (при коэффициенте нелинейных искажений $K_n < 5\%$).

4. Регулирование индуктивности дугогасящей катушки любым из рассмотренных методов сопряжено с большими затратами активных материалов (обмоточной меди и трансформаторной стали).

Дроссель насыщения, не искажающий форму кривой регулируемого тока

Показано, что дроссель насыщения с параллельным соединением рабочих обмоток не искажает форму кривой регулируемого тока при следующих условиях:

1. Зависимость между потоком и намагничивающими ампервитками должна иметь форму квадратичной параболы $I\dot{W} = K\Phi^2$.

2. Напряжение, приложенное к обмоткам переменного тока, должно быть синусоидальным $U_{\sim} = U_m \sin \omega t$.

3. Амплитуда переменного потока должна быть не более, чем абсолютная величина потока управления $|\Phi_{\sim}| \geq \Phi_m$.

Если соблюдаются указанные условия, то ток дросселя равен

$$i = 4K\Phi_0\Phi_m \sin \omega t,$$

где K —коэффициент параболы;
 Φ_0 —поток управления;
 Φ_m —амплитуда переменного потока.

Зависимость между намагничивающим током и потоком в виде квадратичной параболы $IW = K\Phi^2$ может быть получена, если выполнить магнитопровод в виде отдельных стальных пакетов, имеющих различные сечения и поперечные воздушные зазоры различной длины. Примерная конструкция такого магнитопровода

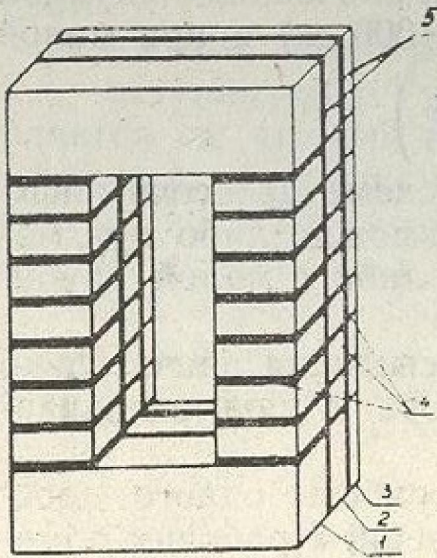


Рис. 1. Конструкция магнитопровода с параболической характеристикой $IW = K\Phi^2$. 1, 2, 3—стальные пакеты; 4—поперечные зазоры; 5—немагнитные прокладки, разделяющие пакеты.

показана на рис. 1. Для уменьшения рассеяния магнитного потока все зазоры располагаются внутри катушек. Между пакетами устанавливаются немагнитные прокладки, что уменьшает влияние пакета на пакет. Экспериментальным путем установлено, что при толщине прокладок, равной $2-2,5 \delta_i$ (δ_i — толщина одного поперечного зазора) влияние пакета на пакет практически не сказывается.

Разработан метод расчета магнитопровода на заданную зависимость между потоком и намагничивающей силой, основанный на аппроксимации кривой намагничивания стали и заданной кривой прямыми отрезками [4].

Расчет магнитопровода с заданной формой кривой $\Phi = f(IW)$ сводится к следующему.

По заданным величинам $l_{ст}$, W строится характеристика $\Phi = f(IW)$ (кривая 5, рис. 2), соответствующая магнитопро-

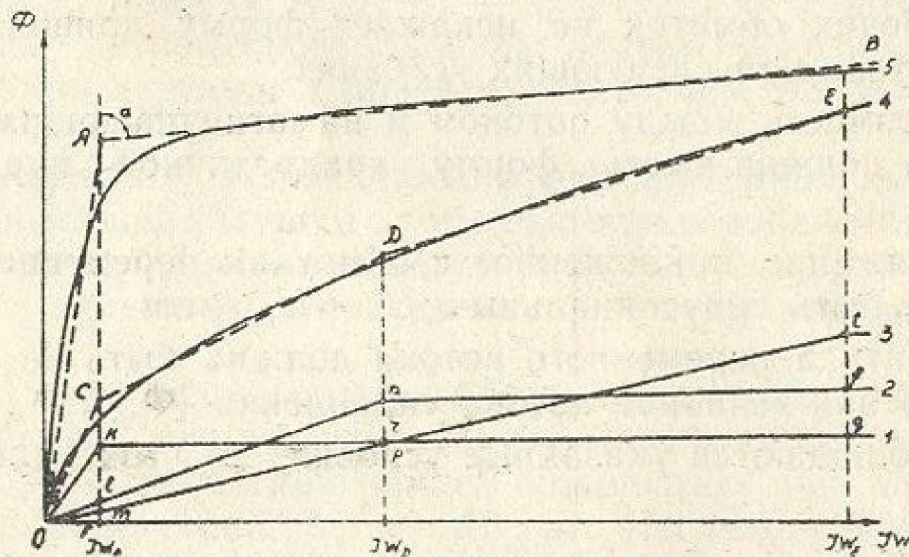


Рис. 2. Расчет магнитопровода с заданной зависимостью $IW = K\Phi^2$.

воду без зазоров (для выбранного сорта стали); здесь

- $l_{ст}$ — длина средней силовой линии в стальном магнитопроводе;
 W — число витков обмотки переменного тока;
 $(S_0$ — сечение магнитопровода предварительно можно принять любое).

Кривая 5 аппроксимируется двумя прямолинейными отрезками OA и AB .

Определяются следующие величины: $\operatorname{tg} \alpha \frac{mIW}{m\Phi}$; координаты точек A и A_1 (A_1 — точка перегиба кривой, определяется ориентировочно), $\Phi_A, IW_A, \Phi_{A_1}, IW_{A_1}$; длина отрезка a в масштабе оси IW — $a \cdot m/W$, здесь m/W и $m\Phi$ — масштабы по осям IW и Φ .

Затем, в тех же осях IW, Φ строим желаемую характеристику $IW = K\Phi^2$ (кривая 4, рис. 2), которую аппроксимируем тремя прямыми линиями OC, CD и DE , как показано на рис. 2 абсцисса точки C должна быть не меньше абсциссы точки A .

Величины воздушных зазоров в пакетах рассчитываются по следующим формулам:

$$\begin{aligned} \delta_{1p} &= \mu_0 \frac{IW_C - IW_{A_1}}{B_{A_1}}; \\ \delta_{2p} &= \mu_0 \frac{IW_D - IW_{A_1}}{B_{A_1}}; \\ \delta_{3p} &= \mu_0 \frac{IW_E - IW_{A_1}}{B_{A_1}}; \end{aligned} \quad (1)$$

здесь $B_{A_1} = \frac{\Phi_{A_1}}{S_0}$; $\delta_{1p}, \delta_{2p}, \delta_{3p}$ — расчетные величины воздушных зазоров в I, II и III пакетах.

Далее составляется следующая система уравнений:

$$\begin{aligned} \Phi_q + \Phi_f + \Phi_r &= \Phi_E, \\ \Phi_r + \Phi_p + \Phi_u &= \Phi_D, \\ \Phi_m + \Phi_l + \Phi_k &= \Phi_C, \end{aligned} \quad (2)$$

где Φ_C, Φ_D, Φ_E — ординаты точек параболы C, D, E, F ; $\Phi_q, \Phi_f, \Phi_r, \Phi_p, \Phi_u, \Phi_m, \Phi_l$ и Φ_k рассчитываются по следующим формулам

$$\Phi_q = \frac{IW_E - IW_A + \Phi_A \operatorname{tg} \alpha \frac{mIW}{m\Phi}}{S_0 \operatorname{tg} \alpha \frac{mIW}{m\Phi} + \frac{\delta_{1p}}{\mu_0}} S_1,$$

$$\Phi_f = \frac{IW_E - IW_A + \Phi_A \operatorname{tg} \alpha \frac{mIW}{m\Phi}}{S_0 \operatorname{tg} \alpha \frac{mIW}{m\Phi} + \frac{\delta_{2p}}{\mu_0}} S_2,$$

$$\Phi_t = B_{A1} \cdot S_3,$$

$$\Phi_r = \frac{IW_D - IW_A + \Phi_A \operatorname{tg} \alpha \frac{mIW}{m\Phi}}{S_0 \operatorname{tg} \alpha \frac{mIW}{m\Phi} + \frac{\delta_{1p}}{\mu_0}} S_3,$$

$$\Phi_p = B_{A1} \frac{IW_D}{IW_E - a \cdot mIW} S_3,$$

$$\Phi_n = B_{A1} \cdot S_2,$$

$$\Phi_m = B_{A1} \frac{IW_C}{IW_E - a \cdot mIW} S_3,$$

$$\Phi_l = B_{A1} \frac{IW_C}{IW_D - a \cdot mIW} S_2,$$

$$\Phi_k = B_{A1} \cdot S_1.$$

Решение системы уравнений (2) дает величины сечений пакетов S_1 , S_2 и S_3 , обеспечивающих заданную характеристику $IW = K\Phi^2$.

Методы расчета тока и коэффициента нелинейных искажений по кривой намагничивания для дросселя с параллельным соединением рабочих обмоток при синусоидальном напряжении

Рассмотрен ряд методов анализа рабочего тока дросселя по кривой $\Phi = f(IW)$.

1. Графический метод. Метод основан на графическом построении формы кривой тока и определении по ней гармонических составляющих методом приближенного гармонического анализа.

2. Метод анализа, основанный на аппроксимации кривой намагничивания гиперболическим синусом.

Пусть кривая намагничивания аппроксимирована функцией

$$IW = \alpha \operatorname{sh} \beta \Phi,$$

тогда при наличии в потоке синусоидальной и постоянной составляющих

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t \pm \Phi_0.$$

(знак «+» соответствует левой части дросселя, а «—» — правой) суммарный ток дросселя выразится формулой

$$i = \frac{4}{W} \alpha \operatorname{ch}(\beta \Phi_0) \{ [-jI_1(j\beta \Phi_m)] \sin \omega t - jI_3(j\beta \Phi_m) \times \\ \times \sin 3\omega t - jI_5(j\beta \Phi_m) \sin 5\omega t - \dots \},$$

где $j = \sqrt{-1}$; $I_1(j\beta \Phi_m)$, $I_3(j\beta \Phi_m)$, $I_5(j\beta \Phi_m)$... — функции Бесселя соответствующих порядков от мнимого аргумента, равного $j\beta \Phi_m$.

Соответственно коэффициенты гармоник равны

$$K_{н3} = \frac{I_{m3}}{I_{m1}} = \frac{jI_3(j\beta \Phi_m)}{jI_1(j\beta \Phi_m)},$$

$$K_{н5} = \frac{I_{m5}}{I_{m1}} = \frac{jI_5(j\beta \Phi_m)}{jI_1(j\beta \Phi_m)}$$

и т. д.

Из приведенных формул видно, что коэффициенты гармоник, определяемые по функциям Бесселя, не зависят от Φ_0 . Вместе с тем графический метод расчета и экспериментальные исследования говорят о том, что коэффициенты гармоник зависят от Φ_0 . Это указывает на непригодность метода анализа формы кривой тока дросселя по кривой намагничивания, аппроксимированной гиперболическим синусом. В проделанных расчетах максимальная погрешность при определении коэффициента $K_{н3}$ составляет 50%, а для $K_{н5}$ — 400%.

3. Аппроксимация кривой намагничивания степенным рядом. Так как характеристика $IW = f(\Phi)$ является симметричной, то степенной ряд, которым она аппроксимируется, не должен содержать четные степени

$$IW = a_1 \Phi + a_3 \Phi^3 + a_5 \Phi^5 + a_7 \Phi^7 + \dots$$

где a_1 , a_3 , a_5 , a_7 ... — постоянные коэффициенты.

Амплитуда первой гармоники суммарного тока дросселя равна

$$I_{m1} = \frac{2}{W} [\Phi_m (a_1 + 3a_3 \Phi_0^2 + 5a_5 \Phi_0^4 + 7a_7 \Phi_0^6 + \dots) + \\ + \Phi_m^3 (0,75a_3 + 7,5a_5 \Phi_0^2 + 26,2a_7 \Phi_0^4 + \dots) + \\ + \Phi_m^5 (0,625a_5 + 13,1a_7 \Phi_0^2 + \dots) + \Phi_m^7 0,547a_7 + \dots]$$

Амплитуда третьей гармоники равна

$$I_{m3} = \frac{2}{W_{\sim}} [\Phi_m^3 (0,25a_3 + 2,5a_5 \Phi_0^2 + 8,75a_7 \Phi_0^4 + \dots) + \Phi_m^5 (0,312a_5 + 6,56a_7 \Phi_0^2 + \dots) + \Phi_m^7 0,327a_7 + \dots]$$

Амплитуда пятой гармоники равна

$$I_{m5} = \frac{2}{W_{\sim}} [\Phi_m^5 (0,0625a_5 + 1,31a_7 \Phi_0^2 + \dots) + \Phi_m^7 0,109a_7 + \dots]$$

Точность рассматриваемого метода зависит от числа членов ряда, которым аппроксимируется кривая намагничивания. Приемлемая точность (погрешность в пределах 10%) получается лишь при числе членов ряда не менее 4. Однако при этом практическое пользование методом затруднено ввиду чрезвычайной громоздкости формул и вычислений. Если же число членов ряда равно 3, то вычисления намного облегчаются, но резко возрастает погрешность.

4. Метод «пяти ординат». Основой данного метода явился метод, применяемый для анализа формы кривой анодного тока электронных ламп.

Амплитуды гармоник суммарного рабочего тока подсчитываются по следующим формулам

$$I_{m3} = \frac{A - E + B - D}{1,5 W_{\sim}},$$

$$I_{m5} = \frac{A - E - 2(B - D)}{3 W_{\sim}}.$$

Ток управления равен

$$I_0 = \frac{A + E + 2(B + D)}{6 W_0}.$$

Амплитуда второй гармоники рабочего тока одной половины дросселя равна

$$I'_{m2} = \frac{0,5(A + E) - C}{2 W_0}.$$

Величины A , B , C , D , E , равные длинам соответствующих отрезков в масштабе оси IW (см. рис. 3), определяются графически.

Недостатком метода «пяти ординат» является то, что он позволяет определить гармонические составляющие не выше четвертого порядка. Если форма кривой намагничивания приближается к квадратичной параболе, то высшие гармониче-

ские, начиная с пятого порядка, составляют ничтожно малый процент и ими можно пренебречь.

Из рассмотренных методов анализа формы кривой тока дросселя наиболее удобным для практического применения является метод «пяти ординат», который дает тем большую

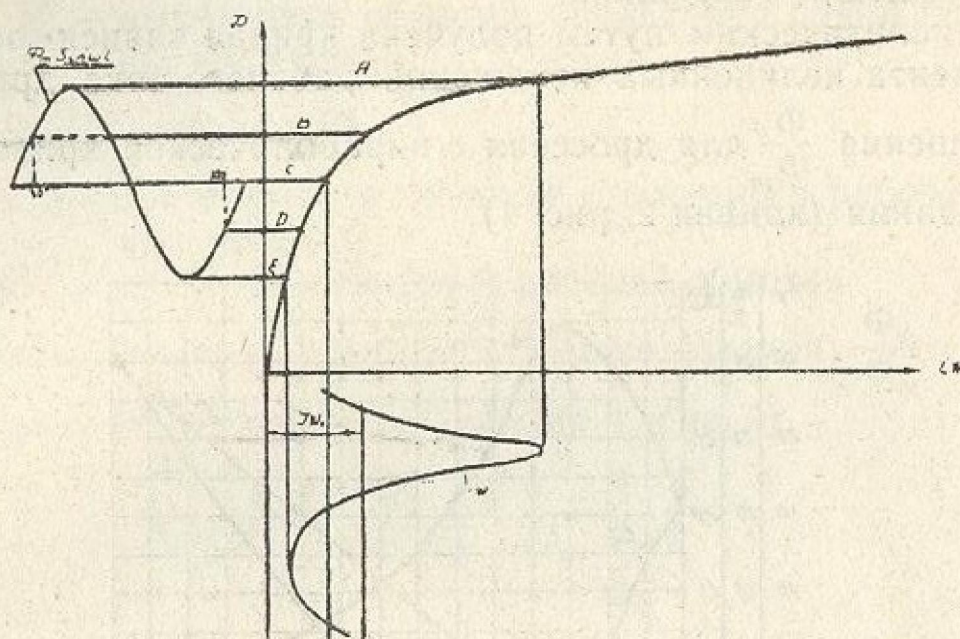


Рис. 3. Определение гармонического состава тока дросселя методом „пяти ординат“.

точность, чем более пологой является кривая намагничивания. При анализе тока дросселя с кривой намагничивания, приближающейся к прямоугольной форме, следует пользоваться графическим методом с применением приближенного гармонического анализа.

Некоторые свойства дросселя насыщения с параболической зависимостью между потоком и намагничивающим током

Показано аналитически и экспериментально, что если кривая намагничивания дросселя имеет вид $I\mathcal{W} = K\Phi^2$, то при отсутствии подмагничивания постоянным током, кривая зависимости между действующими значениями напряжения и тока (вольт-амперная характеристика) также имеет вид квадратичной параболы

$$I = K_1 U^2.$$

Благодаря указанному свойству подобный дроссель может найти применение в некоторых функциональных преобразователях, вычислительных устройствах и т. д.

Если ток подмагничивания не равен нулю, то вольт-амперные характеристики дросселя отличаются по форме от параболы. С изменением тока подмагничивания меняется форма вольт-амперных характеристик.

Как указывалось, дроссель с параболической характеристикой не искажает форму кривой регулируемого тока в том случае, если поток управления по абсолютной величине не меньше амплитуды переменного потока $|\Phi_0| \geq \Phi_m$. При потоке управления $|\Phi_0| < \Phi_m$ в рабочем токе дросселя появляются высшие гармоники.

Аналитическим путем получена кривая зависимости коэффициента нелинейных искажений рабочего тока дросселя от отношения $\frac{\Phi_0}{\Phi_m}$ для дросселя с параболической кривой намагничивания (кривая 2, рис. 4).

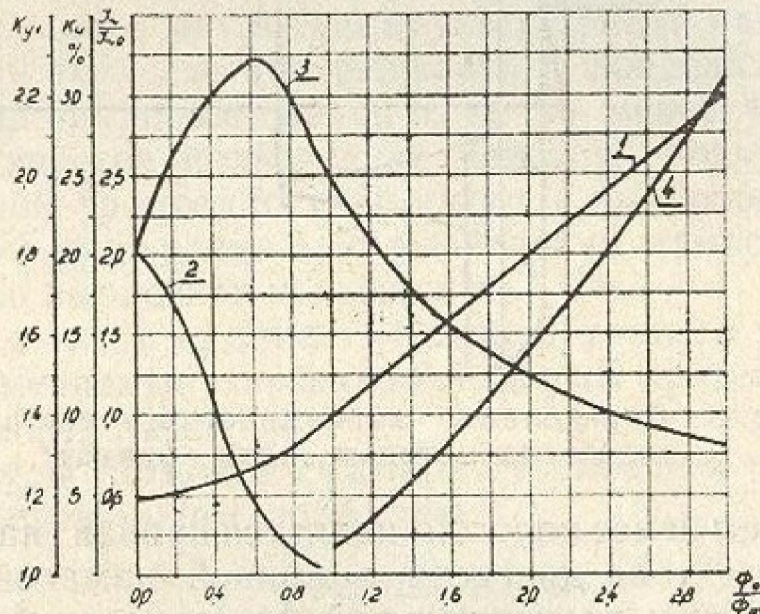


Рис. 4. Характеристики дросселя с параболической кривой намагничивания

$$1 - \frac{I_{\sim}}{I_{\sim 0}} = f\left(\frac{\Phi_0}{\Phi_m}\right); \quad 2 - K_{н1} = f\left(\frac{\Phi_0}{\Phi_m}\right); \quad 3 - K_{н1} = f\left(\frac{\Phi_0}{\Phi_m}\right);$$

$$4 - K_{y1} = f\left(\frac{\Phi_0}{\Phi_m}\right).$$

В кривой тока одной половины дросселя при $\frac{\Phi_0}{\Phi_m} \geq 1$ имеется первая и вторая гармоники. Коэффициент нелинейных искажений для тока одной половины дросселя при $\frac{\Phi_0}{\Phi_m} \geq 1$ выражается формулой

$$K_{н1} = \frac{1}{4 \frac{\Phi_0}{\Phi_m}}.$$

При $\Phi_0 = 0$ в токе одной половины дросселя имеются только нечетные гармоники. При $0 < |\Phi_0| < \Phi_m$ ток содержит как четные, так и нечетные гармоники. Зависимость $K_{н1}$ от $\frac{\Phi_0}{\Phi_m}$ приведена на рис. 4 (кривая 3).

При расчете дугогасящей катушки—дресселя удобно пользоваться коэффициентом

$$K_{y1} = \frac{IW_0}{0,5IW_{\sim}}$$

здесь IW_0 — ампервитки обмотки управления одной половины дресселя;

$$0,5IW_{\sim} = 0,5I_{\sim} \cdot W_{\sim};$$

I_{\sim} — действующее значение суммарного рабочего тока дресселя;

W_{\sim} — число витков одной рабочей обмотки.

Зависимость коэффициента K_{y1} от отношения $\frac{\Phi_0}{\Phi_m}$ выражается следующей формулой (кривая 4, рис. 4)

$$K_{y1} = \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{\Phi_0}{\Phi_m} + \frac{\sqrt{2}}{4} \frac{1}{\frac{\Phi_0}{\Phi_m}} \quad (3)$$

Коэффициент K_{y1} позволяет по заданной величине IW_{\sim} , соответствующей концу диапазона регулирования, определить ампервитки обмотки управления, если известна величина $\frac{\Phi_0}{\Phi_m}$, соответствующая концу диапазона регулирования.

Конструкция дугогасящей катушки—дресселя с параболической характеристикой

Конструктивно дугогасящая катушка — дрессель может быть выполнена в виде двух отдельных магнитопроводов с обмотками. Магнитопроводы должны иметь параболическую зависимость между потоком и намагничивающими ампервитками. Наличие двух одинаковых элементов, достаточно сложных по конструкции, усложняет технологию изготовления такой катушки.

Показано, что катушка может быть выполнена с применением одного шихтованного магнитопровода [6]. Основной магнитопровод такой катушки двухстержневой (рис. 5). Он выполняется с зазорами таким образом, что каждый стержень в отдельности имеет параболическую зависимость между потоком и намагничивающим током. На каждом стержне расположены две обмотки: рабочая и обмотка управления. Переменный поток, создаваемый рабочими обмотками, замыкается по основному магнитопроводу. Для замыкания постоянного потока управления служат специальные участки магнито-

провода, выполняемые из сравнительно дешевого ферромагнитного материала (литая сталь, чугун).

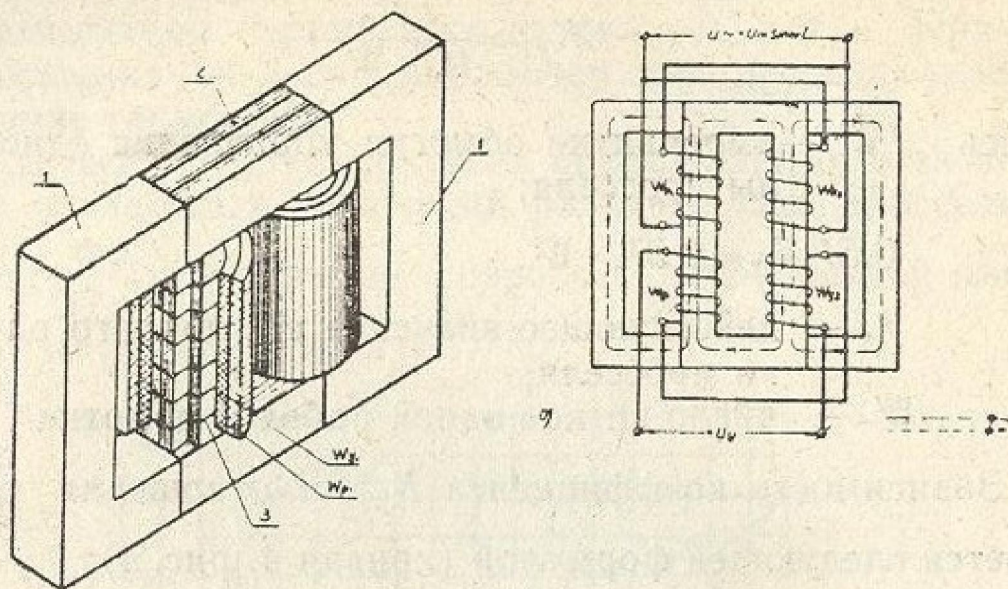


Рис. 5.

а) общий вид неискажающей дугогасящей катушки с плавным регулированием подмагничиванием;
 б) схема включения обмоток; 1—участки магнитопровода, выполняемые из дешевого ферромагнитного материала (литая сталь, чугун); 2—шихтованный магнитопровод, состоящий из параллельных пакетов, имеющих поперечные зазоры; 3—зазор; W_{p1} , W_{p2} —рабочие обмотки; W_{y1} , W_{y2} —обмотки управления.

Подобная конструкция является более экономичной с точки зрения расхода активных материалов. Расход активных материалов в первом случае (дроссель на двух отдельных магнитопроводах) примерно в 1,15—1,18 раза больше, чем во втором.

Для мощных дросселей насыщения (дугогасящих катушек) с масляным охлаждением, которые имеют бак и систему радиаторов, возможно в качестве дополнительных участков магнитопровода, необходимых для проведения постоянного магнитного потока, использовать бак и систему радиаторов. При этом отпадает необходимость в выполнении специальных магнитопроводов 1 (рис. 5), снижается вес выемной части и общий вес катушки.

Дугогасящая катушка подобной конструкции с использованием бака в качестве дополнительного магнитопровода мощностью 500 квар разработана и спроектирована для работы в сети 6 кв Одессаэнерго. Стенки бака катушки имеют ребристую форму, что обеспечивает нужную поверхность охлаждения. Толщина стенок (5 мм) обеспечивает необходимое сечение, требуемое для прохождения постоянного потока.

Характеристики катушки, полученные расчетным путем, приведены на рис. 6. Мощность цепи управления (при макси-

мальном рабочем токе) составляет 5,5 квт. Общий вес меди—400 кг. Общий вес трансформаторной стали—1070 кг.

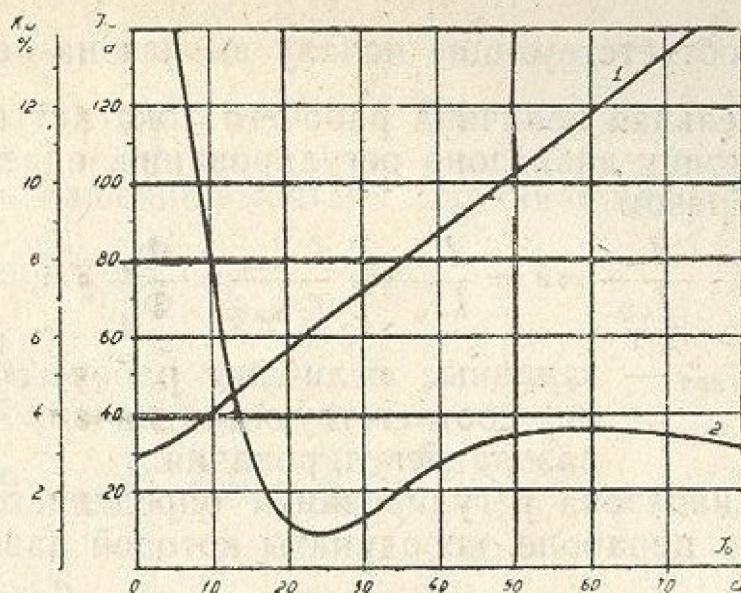


Рис. 6. Характеристики дугогасящей катушки 500 квар с плавным регулированием подмагничиванием
 $1 - I_{\sim} = f(I_0)$; $2 - K_{н} = f(I_0)$

В настоящее время катушка находится в стадии изготовления в трансформаторных мастерских Одессаэнерго.

Методика расчета неискажающей дугогасящей катушки с плавным регулированием индуктивности подмагничиванием

За основу расчета приняты следующие условия:

1. Остаточный ток при однофазном замыкании на землю не должен превышать некоторой заданной максимально допустимой величины.

2. Стоимость выемной части катушки должна быть минимальной.

Остаточный ток на землю при резонансной настройке катушки определяется активными потерями в контуре нулевой последовательности сети, а также высшими гармониками, вносимыми катушкой и сетью. Задаваясь определенной величиной остаточного тока на землю, можно определить допустимую величину коэффициента нелинейных искажений для катушки. В начале диапазона регулирования, когда ток катушки сравнительно мал, можно допустить больший процент искажений, чем в конце диапазона, когда ток велик. Допуская некоторую величину коэффициента искажений, можно расширить диапазон регулирования, либо при заданном диапазоне снизить вес активных материалов.

Кривые 1 и 2 на рис. 4 позволяют по заданной величине коэффициента нелинейных искажений в начале диапазона ре-

гулирования определить относительные величины $\frac{I_{\sim}}{I_{\sim 0}}$ нач и $\frac{\Phi_0}{\Phi_m}$ нач, соответствующие началу диапазона регулирования.

Относительная величина рабочего тока катушки, соответствующая концу диапазона регулирования, определяется следующим образом

$$\frac{I_{\sim}}{I_{\sim 0}}_{\text{кон}} = \frac{I_{\sim}}{I_{\sim 0}}_{\text{нач}} \frac{I_{\sim \text{кон}}}{I_{\sim \text{нач}}} = \frac{\Phi_0}{\Phi_m}_{\text{кон}},$$

где $I_{\sim \text{кон}}$, $I_{\sim \text{нач}}$ — заданные величины рабочего тока катушки, соответствующие началу и концу диапазона регулирования.

Конец диапазона регулирования определяется точкой E_0 , лежащей на параболе, координаты которой равны

$$\Phi_{E_0} = \Phi_{0 \text{ кон}} + \Phi_m,$$

$$IW_{E_0} = K\Phi_{E_0}^2.$$

Если в конце диапазона регулирования допускается некоторая величина коэффициента нелинейных искажений, то для уменьшения расхода активных материалов за конец диапазона регулирования следует принять точку E (см. рис. 2), ордината которой меньше ординаты точки E_0 на величину $\Delta\Phi$. Величина $\Delta\Phi$ зависит от допускаемой величины $K_{\text{н}}$ в конце диапазона регулирования, а также от отношения $\frac{\Phi_m}{\Phi_{E_0}}$

и может быть определена по приведенным в работе графикам.

Коэффициент параболы $IW = K\Phi^2$, которая обеспечивает заданный диапазон регулирования дросселя, определяется формулой

$$K = 0,354 I_{\sim \text{кон}} \frac{W_{\sim}}{\Phi_{0 \text{ кон}} \Phi_m}, \quad (4)$$

где

$$\Phi_m = \frac{U_{\sim}}{4,44 f W_{\sim}} \text{ вб.}$$

Число витков рабочей обмотки W_{\sim} определяется при расчете катушки на минимум стоимости выемной части.

Стоимость выемной части подсчитывается по формуле

$$C_{\text{в.ч}} = C_{\text{ст.у}} \left\{ \frac{A_1}{\alpha} \left[\sqrt{\frac{A_4 \alpha}{\beta} (\beta + 1)} + 1,8 \frac{A_3}{\sqrt{\alpha}} \right] + \right. \\ \left. + A_2 \alpha \left(\frac{A_3}{\sqrt{\alpha}} + 0,5 \sqrt{\frac{A_4 \alpha}{\beta}} \right) \right\}, \quad (5)$$

где $C_{ст.у}$ — удельная стоимость изготовления и материалов магнитопровода;

$$\alpha = \frac{W_{\sim}}{U_{\sim}};$$

$\beta = \frac{h}{b}$ — отношение высоты к ширине окна магнитопровода;

$$A_1 = \frac{35,1}{fB_m};$$

$$A_2 = 0,279\gamma(1 + K_{н1} + K_{у1} \cdot K_{охв}) \frac{S_{\sim}}{\Delta};$$

$$A_3 = \frac{53,6}{\sqrt{fB_m K_c}};$$

$$A_4 = \frac{10S_{\sim}(1 + K_{н1} + K_{у1} \cdot K_{охв})}{K_{зм}\Delta};$$

$\gamma = \frac{C_{м.у}}{C_{ст.у}}$, $C_{м.у}$ — удельная стоимость изготовления и материалов обмоток;

$K_{охв} = 1,20 - 1,25$; $S_{\sim} = U_{\sim} \cdot I_{\sim \text{ном}} \cdot 10^{-3}$ квар — мощность катушки;

Δ — плотность тока в обмотках;

$K_{зм}$ — коэффициент заполнения медью обмоток окна магнитопровода.

Выражение (5), представляющее функцию двух переменных α и β , нужно исследовать на минимум. Для этого, задаваясь рядом значений α , определяем β по формуле

$$\beta = 1 + \frac{A_2}{2A_1} \alpha^2, \quad (6)$$

и подставив эти значения α и β в (5), подсчитываем $C_{в.ч}$. Проведав эту операцию для ряда значений α строим график $C_{в.ч} = f(\alpha)$, по которому определяем $\alpha_{\text{мин}}$, соответствующее минимуму стоимости. Подставив $\alpha_{\text{мин}}$ в (6), определим $\beta_{\text{мин}}$. По $\alpha_{\text{мин}}$ и $\beta_{\text{мин}}$ определяются предварительно основные геометрические размеры катушки и числа витков обмоток:

а) диаметр, описанный вокруг стержня,

$$d = \frac{A_3}{\sqrt{\alpha}};$$

~~с.в. 965~~

V000965

б) ширина окна

$$b = \sqrt{\frac{A_4 \alpha}{\beta}};$$

в) высота окна

$$h = \beta b;$$

г) число витков рабочей обмотки на одном стержне и сечение провода

$$W_{\sim} = \alpha U_{\sim}, \quad S_{M_{\sim}} = \frac{I_{\sim \text{кон}}}{2\Delta} (K_{\text{н1}} + 1) 10^{-2} \text{ см}^2;$$

д) число витков обмотки управления на одном стержне и сечение провода

$$W_0 = \frac{I_{\sim \text{кон}} W_{\sim} K_{y1} K_{\text{охв}}}{2I_0}, \quad S_{M_0} = \frac{I_0}{\Delta} 10^{-2} \text{ см}^2,$$

здесь I_0 — максимальное значение тока управления.

Длина средней силовой магнитной линии в магнитопроводе на один стержень определяется по формуле

$$l_{\text{ст}} \approx h + b + \frac{\pi(d - 2a_{01})}{2} \text{ см.}$$

Затем магнитопровод рассчитывается на заданную параболу (определяются сечения пакетов S_1, S_2, S_3 и величины воздушных зазоров δ_{1p}, δ_{2p} и δ_{3p} . После определения сечений пакетов уточняется величина d .

В работе приведены примеры расчетов, сделанных по предлагаемой методике. Рассчитаны макет дросселя насыщения с параболической характеристикой мощностью 2200 ва и дугогасящая катушка мощность 360 ква.

При расчете катушки были приняты следующие исходные данные:

1. Напряжение сети, для которой предназначена катушка — 6,3 кв.
2. Пределы токов компенсации — 50 — 100 а.
3. Максимально допустимая величина остаточного тока однофазного замыкания на землю — 5 а.

В результате расчета получились следующие величины. Рабочий ток катушки изменяется в пределах — 44 — 100 а. Коэффициент нелинейных искажений в начале диапазона регулирования равен 7%, в конце диапазона регулирования — 1,8%. Вес меди 303 кг, вес стали — 735 кг. Мощность управления при максимальном рабочем токе составляет 1,4% от мощности катушки. Активные потери в цепи переменного тока составляют 0,61% от мощности катушки.

Экспериментальные исследования дросселя насыщения с параболической характеристикой

Экспериментальные исследования проводились на макетах мощностью 2200 *ва* и 200 *ва* и на дугогасящей катушке мощностью 360 *квар*. Определялись следующие характеристики:

1. Основная кривая намагничивания магнитопровода методом флюксметра.

2. Зависимости рабочего тока и коэффициента нелинейных искажений рабочего тока от тока управления при различных значениях напряжения U .

3. Вольт-амперные характеристики рабочей цепи при различных токах управления.

Коэффициент нелинейных искажений измерялся с помощью измерителя нелинейных искажений.

Результаты экспериментов подтвердили правильность выводов о возможности работы дросселя насыщения с малыми искажениями формы кривой регулируемого тока, а также достаточно высокую точность предлагаемых методов расчета дросселя по заданным условиям.

Исследование системы автоматического регулирования настройки дугогасящей катушки в резонанс с емкостью сети

Для автоматической настройки дугогасящей катушки — неискажающего дросселя в резонанс с емкостью сети применен регулятор, разработанный к.т.н. А. П. Труханом (Институт Электродинамики АН УССР).

Проведено исследование замкнутой системы автоматического регулирования приближенным методом, предложенным д.т.н. И. И. Кринецким.

Система регулирования степени настройки дугогасящей катушки может быть описана следующими уравнениями

$$T_1 T_2 \frac{d^3 U_{\text{ВХ}}}{dt^3} + (T_1 + T_2) \frac{d^2 U_{\text{ВХ}}}{dt^2} + \frac{dU_{\text{ВХ}}}{dt} = K U_{\text{ВЫХ}}, \quad (7)$$

$$U_{\text{ВЫХ}} = \left. \begin{array}{l} 0 \text{ при } -m\eta < U_{\text{ВХ}} < \eta \\ U_1 \text{ " } U_{\text{ВХ}} > \eta \\ -U_1 \text{ " } U_{\text{ВХ}} < -m\eta \end{array} \right\} \text{ при } \frac{dU_{\text{ВХ}}}{dt} > 0, \quad (8)$$

$$\left. \begin{array}{l} 0 \text{ " } -\eta < U_{\text{ВХ}} < m\eta \\ U_1 \text{ " } U_{\text{ВХ}} > m\eta \\ -U_1 \text{ " } U_{\text{ВХ}} < -\eta \end{array} \right\} \text{ при } \frac{dU_{\text{ВХ}}}{dt} < 0.$$

(7) —уравнение линейной части структурной схемы;

(8) —уравнение релейного усилителя с зоной нечувствительности второго рода и петель возврата с коэффициентом m .

Величина зоны нечувствительности регулятора η выбрана из условия максимальной допустимой величины степени расстройки катушки в статическом режиме $v=0,01$. При этом $\eta=0,02$.

Построена кривая переходного процесса в системе при параметрах, которые соответствуют реальным величинам в установленной на подстанции № 1 Одессаэнерго системе автоматической настройки катушки—неискажающего дросселя насыщения мощностью 360 квар.

Кривая переходного процесса, представляющая собой быстро затухающие колебания, подтверждает правильность выбранных параметров настройки регулятора.

Для работы регулятора создается искусственное смещение нейтрали путем подключения к одной из фаз сети дополнительной емкости. Напряжение смещения нейтрали U_0 в процессе настройки катушки изменяется в широких пределах, приобретая максимальное значение при резонансе.

Регулятор работает устойчиво, если U_0 находится в пределах $0,01 U_{\phi} \leq U_0 \leq 0,1 U_{\phi}$. Чтобы избежать отклонений U_0 сверх указанных пределов, применен двухпозиционный способ регулирования U_0 , заключающийся в том, что один конденсатор C_1 постоянно включен между фазой и землей, а второй конденсатор C_2 включается параллельно первому, когда U_0 становится меньше некоторой величины $U_{0 \text{ мин}}$, и отключается при $U_0 \geq U_{0 \text{ макс}}$.

Величины C_1 и C_2 определяются по формулам

$$C_1 \leq \frac{C_{0 \text{ мин}}}{\frac{U_{\phi}}{U_{0 \text{ макс}}} d - 1},$$

$$C_1 + C_2 \geq \frac{C_{0 \text{ макс}}}{\frac{U_{\phi}}{U_{0 \text{ мин}}} \sqrt{v_m^2 + d^2} - 1}.$$

где $C_{0 \text{ мин}}$ и $C_{0 \text{ макс}}$ — минимальное и максимальное значения емкости сети;

$v_m = \frac{I_{c \text{ макс}} - I_{k \text{ мин}}}{I_{c \text{ макс}}}$ — степень расстройки катушки;

$I_{c \text{ макс}}$, $I_{c \text{ мин}}$ — максимальное и минимальное значения емкостного тока сети;

$I_{k \text{ мин}}$ — минимальный ток катушки.

При принятом двухпозиционном способе регулирования возможны автоколебания. Чтобы избежать автоколебаний, необходимо обеспечить следующее условие

$$\frac{U_{02}}{U_{01}} > \frac{(C_1 + C_2)(C_0 + C_1)}{C_1(C_0 + C_1 + C_2)} \approx \frac{C_1 + C_2}{C_1},$$

где U_{01} — величина напряжения смещения нейтрали, при котором включается конденсатор C_2 .

U_{02} — величина напряжения смещения нейтрали, при котором отключается конденсатор C_2 .

Для питания цепей управления дугогасящей катушки, регулируемой подмагничиванием, разработан выпрямитель, особенностью которого является то, что в нем в качестве вентиля применяются полупроводниковые управляемые диоды — тринисторы.

Выпрямитель питается от трехфазного трансформатора, в каждой фазе вторичных обмоток которого включены тринисторы.

Величина выпрямленного тока зависит от угла отсечки регулируемых диодов, которые управляются импульсами тока от импульсных трансформаторов. Импульсы токов, подающиеся к диодам, сдвинуты по фазе на 120° и могут сдвигаться во времени, изменяя тем самым угол отсечки тринисторов. Изменение фазы импульсов осуществляется с помощью дифференциального сельсина.

Основные выводы

1. Дугогасящая катушка с плавным регулированием индуктивности подмагничиванием, не искажающая существенно форму кривой тока, может быть выполнена в виде дросселя насыщения с параболической характеристикой $IW = K\Phi^2$. Рабочие обмотки должны быть включены параллельно.

2. Магнитопровод дугогасящей катушки для получения параболической характеристики должен быть выполнен в виде пакетов, имеющих различные поперечные сечения и различные поперечные зазоры, охватываемых общими обмотками.

3. Конструктивно катушка может быть выполнена двояко: а) в виде двух отдельных магнитопроводов с рабочими обмотками на каждом стержне и с обмотками управления, расположенными либо на каждом стержне, либо охватывающими по два стержня, переменные потоки в которых находятся в противсфазе; б) в виде одного двухстержневого магнитопровода из шихтованной трансформаторной стали и дополнительных охватывающих участков магнитопровода из литой стали, чугуна и пр., для проведения постоянного потока управления. В качестве дополнительных участков может быть использован бак.

4. Дугогасящая катушка, конструктивно выполненная в виде двухстержневого магнитопровода с использованием бака в качестве магнитопровода для постоянного потока, является наиболее экономичной с точки зрения расхода активных материалов и наиболее технологичной в изготовлении.

5. Глубина регулирования рабочего тока катушки зависит от максимальной индукции в стержнях, создаваемой обмотками переменного тока B_m . С увеличением B_m глубина регулирования при заданном коэффициенте нелинейных искажений снижается, либо при заданной глубине регулирования увеличивается коэффициент нелинейных искажений.

Расчетным и экспериментальным путем установлено, что для стали марки Э-41 глубина регулирования 1:2 при искажениях $K_n < 5\%$ получается при значении $B_m \approx 0,9—0,94$ тл.

6. Приведенные в данной работе методы расчета катушки позволяют произвести расчет по заданным параметрам: напряжение на рабочих обмотках, минимальное и максимальное значения рабочего тока, максимально допустимая величина остаточного тока замыкания на землю. Расчетные характеристики отличаются от заданных не более, чем на 10%.

7. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили возможность работы дросселя насыщения с малыми искажениями регулируемого тока, а также правильность предлагаемых методов расчета.

8. При использовании метода регулирования настройки катушки по углу сдвига фаз между опорным напряжением и напряжением на катушке, для того, чтобы избежать колебаний напряжения смещения нейтрали U_0 сверх установленных пределов, может быть применен двухпозиционный способ регулирования U_0 , заключающийся в том, что один конденсатор постоянно включен в одну из фаз сети, а второй конденсатор включается или отключается в зависимости от величины U_0 .

9. Эксплуатация дугогасящей катушки, выполненной в виде дросселя с параболической характеристикой, и системы автоматической настройки ее в резонанс с емкостью сети, осуществляемая на подстанции № 1 Одессаэнерго, показала, что система компенсации в целом обладает всеми необходимыми качествами для поддержания резонансной настройки и обладает высокой эксплуатационной надежностью.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Сомов В. А., Шуть В. В., Бобриков С. А. Регулирование индуктивности дугогасящей катушки трансформатором с подмагничиванием и дросселем насыщения. «Электрические станции», № 11, 1964.

2. Сомов В. А., Шуть В. В., Бобриков С. А. О возможности работы дросселя насыщения без искажения формы кривой регулируемого тока. «Электромеханика», № 8, 1962.

3. Сомов В. А., Шуть В. В., Бобриков С. А. Дугогасящая катушка с плавным регулированием. «Электричество», № 5, 1965.

4. Бобриков С. А., Сомов В. А. Метод изготовления магнитопровода катушки со стальным сердечком, имеющего заданную зависимость между намагничивающим током и потоком. «Электромеханика», № 12, 1963.

5. Сомов В. В., Шуть В. В., Похило Н. П., Бобриков С. А. Дугогасящая катушка с плавным регулированием индуктивности, авторское свидетельство № 144215, от 28.11.1961.

6. Сомов В. А., Шуть В. В., Бобриков С. А. Дугогасящая катушка, авторское свидетельство № 164355, от 19.6.1964

По материалам диссертации сделаны доклады

1. На Всесоюзной конференции по магнитным элементам в автоматике, г. Львов, октябрь 1962 г.

2. На конференции-курсах по регулированию напряжения в электрических сетях промышленных предприятий, г. Одесса, октябрь 1964 г.