

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАБИЛИЗАЦИИ ТОКА
НА БАЗЕ МАГНИТНОГО УСИЛИТЕЛЯ

Р. Ч. Каримов

*ТГТУ, заведующий кафедрой «Электротехнике»,
кандидат технических наук, доцент*

Ш. И. Холмурзаева

*Ташкентский государственный технический
университет, ассистент кафедры «Электротехника»*

Х. К. Абдуллаев

*Директор по маркетингу
ООО «ABREST Energy Engineering»*

Аннотация: В данной статье излагаются основы теории и расчёта электроферромагнитных цепей, обладающих устойчивым широким падающим участком на амплитудной характеристике, а также рассматриваются возможности их применения для стабилизации тока для управления состоянием триодных тиристоров в цепях переменного тока, где необходима синхронизация сигнала управления с частотой сети. Излагаются методы расчёта для различных режимов работы стабилизаторов тока. С целью улучшения технико-экономических показателей предложены схемы стабилизирующих устройств на базе магнитных усилителей с электроферромагнитной цепью управления.

Ключевые слова: стабилизатор напряжения, система управления, бесконтактное реле, тиристор, конденсатор, транзистор, симистор, микроконтроллер, автотрансформатор.

Annotation: This article outlines the fundamentals of the theory and calculation of electroferromagnetic circuits that have a stable wide falling section in the amplitude characteristic, and also discusses the possibilities of their use for current stabilization to control the state of triode thyristors in alternating current circuits, where synchronization of the control signal with the mains frequency is necessary. Calculation methods for various operating modes of current stabilizers are outlined. In order to improve the technical and economic indicators, schemes of stabilizing devices based on magnetic amplifiers with an electroferromagnetic control circuit have been proposed.

Keywords: power quality indicators, voltage stabilizer, control system, non-contact relay, thyristor, capacitor, transistor, triac, microcontroller, autotransformer.

Введение

В настоящей статье рассматриваются вопросы применения электроферромагнитных контуров в цепях управления магнитных усилителей. В данном случае феррорезонансные цепи используются в качестве генераторов сигналов управления, необходимых для создания режима стабилизации основной рабочей цепи. Феррорезонансный контур служит составной частью схемы, выполняя функцию чувствительного органа стабилизирующего устройства. Это приводит к существенному увеличению выходной мощности без

значительного увеличения массогабаритных показателей стабилизатора. Из предыдущих глав известно, что сумма установленных мощностей реактивных элементов ферромагнитного стабилизатора тока превышает мощность нагрузки более чем в 4 раза, что ограничивает их применение на большие мощности. Предлагается применение таких цепей в схемах управления магнитных усилителей, где требуются незначительные мощности. Известно, что коэффициент усиления по мощности для 100 Ваттного управляемого дросселя при применении холоднокатаной стали и $f=50$ Гц составляет 50-200. С повышением мощности магнитного усилителя коэффициент его усиления растёт.

Таким образом, исследуемое электроферромагнитное стабилизирующее устройство, совмещает в себе преимущества феррорезонансной цепи и магнитного усилителя. Такое устройство представляет собой, связанные между собой две нелинейные цепи, одна из которых выполняет функцию исполнительного элемента, другая является чувствительным органом.

Основные задачи исследования по данной главе:

- исследование обобщенной характеристики управляемого ферромагнитного элемента;
- создание и исследование основных характеристик стабилизатора тока на базе магнитного усилителя с применением в его цепи управления ферромагнитного стабилизатора тока;
- разработка и исследование однофазного стабилизатора напряжения на базе магнитного усилителя и феррорезонансной цепи.

Обобщенная характеристика управляемого ферромагнитного элемента.

Простейший управляемый ферромагнитный элемент состоит из рабочей и подмагничивающей обмоток, намотанных на замкнутый ферромагнитный сердечник. Подмагничивающая обмотка служит для управления режимом рабочей обмотки и питается от источника постоянного тока. Теория и методы анализа различных управляемых ферромагнитных устройств достаточно полно освещены в отечественной и зарубежной литературе.

Примем, что кривая намагничивания ферромагнитного элемента аппроксимируется степенной функцией, тогда:

$$i_p w_p + i_y w_y = k\phi^n \quad (1)$$

Введем безразмерные величины и примем $W_p=W_y$. Тогда

$$z + z_0 = x^n \quad (2)$$

где

$$z = \frac{i}{i_\delta}; \quad z_0 = \frac{i_y}{i_\delta}; \quad i_\delta = \frac{k\phi_\delta^n}{w}; \quad x = \frac{\phi}{\phi_\delta}.$$

Пусть

$$x = x_0 + X_m \sin \tau$$

Тогда в соответствии с (2):

$$z + z_0 = (x_0 + X_m \sin \tau)^n$$

Здесь

$$(x_0 + X_m \sin \tau)^n = C_0 x_0^n + C_n^1 x_0^{n-1} X_m \sin \tau + C_n^2 x_0^{n-2} X_m^2 \sin^2 \tau + \dots + C_n^n x_0 X_m^n \sin^n \tau$$

Значения биномиальных коэффициентов могут быть определены из треугольника Паскаля.

Дальнейший анализ ведем, принимая $n=7$.

Тогда:

$$z + z_0 = x_0^7 + 7x_0^6 X_m \sin \tau + 21x_0^5 X_m^2 \sin^2 \tau + 35x_0^4 X_m^3 \sin^3 \tau + 35x_0^3 X_m^4 \sin^4 \tau + 21x_0^2 X_m^5 \sin^5 \tau + 7x_0 X_m^6 \sin^6 \tau + X_m^7 \sin^7 \tau \quad (3)$$

Учитывая, что:

$$\sin^2 \tau = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos 2\tau;$$

$$\sin^3 \tau = \frac{3}{4} \sin \tau - \frac{1}{4} \sin 3\tau;$$

$$\sin^4 \tau = \frac{1}{8} (\cos 4\tau + 4 \cos 2\tau - 3);$$

$$\sin^5 \tau = \frac{1}{16} (\sin 5\tau + 5 \sin 3\tau + 10 \sin \tau);$$

$$\sin^6 \tau = \frac{1}{32} (10 - \cos 6\tau + 6 \cos 4\tau - 15 \cos 2\tau);$$

$$\sin^7 \tau = \frac{1}{64} (-\sin 7\tau + 7 \sin 5\tau - 21 \sin 3\tau + 35 \sin \tau).$$

Из (3), пренебрегая высшими гармониками, на основе метода гармонического баланса, получим:

$$z_0 = 7x_0^6 X_{1m} + \frac{21}{2} x_0^5 X_{1m}^3 + \frac{3 \cdot 35}{8} x_0^3 X_{1m}^4 + \frac{10 \cdot 7}{32} x_0 X_{1m}^7 \quad (4)$$

$$Z_{1m} = 7x_0^6 X_{1m} + \frac{3 \cdot 35}{4} x_0^4 X_{1m}^3 + \frac{21 \cdot 10}{16} x_0^2 X_{1m}^5 + \frac{35}{64} X_{1m}^7 \quad (5)$$

Полученные выражения являются базовыми уравнениями для построения обобщенных характеристик управляемого ферромагнитного элемента. На основе (5) построены характеристики, представляющие связь между амплитудами X_{1m} и Z_{1m} для различных значений x_0 (рис.1). Этими кривыми пользуются, когда известна постоянная составляющая магнитного потока. Часто бывает, что известно не x_0 , а z_0 . Тогда, используя кривые рис.1, можем построить зависимости $X_{1m}=f(Z_0)$ для определенных величин Z_{1m} . При этом необходимо задаваться амплитудой Z_{1m} и определять соответствующие значения X_{1m} , когда $x_0=0; 0,3; 0,5; 0,7; 0,85; 1,15$. На основе (4) определяются соответствующие значения Z_0 и строятся кривые (рис.2) $X_{1m}=f(Z_0)$. Теперь, принимая $Z_0=const$, легко построить (рис.3) обобщенную характеристику.

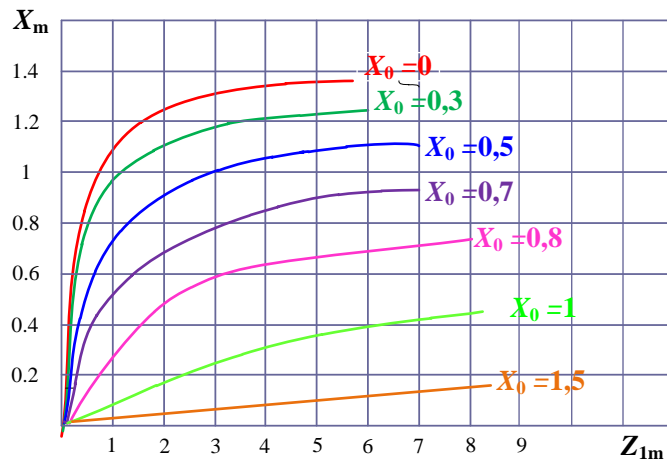


Рис.1. Зависимости $X_{1m}=f(Z_{1m})$ для различных X_0

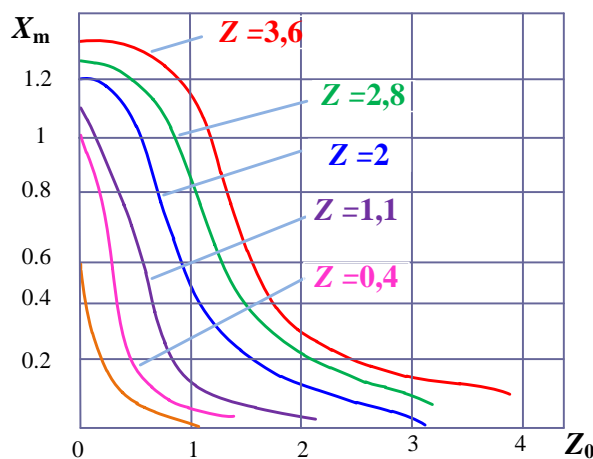


Рис.2. Зависимости $X_{1m}=f(Z_0)$

Если учитывать, что:

$$X_{1m} = \frac{\phi_{1m}}{\phi_{\delta}} = \frac{U_{1m}}{\omega W \phi_{\delta}} = \frac{U_{1m}}{U_{\delta}},$$

то X_{1m} - представляет собой нормированную амплитуду переменного напряжения и кривые $X_{1m}=f(Z_{1m})$ определяют зависимости нормированную амплитуду напряжения от нормированной амплитуды тока для различных значений постоянного подмагничивания.

Из обобщенной характеристики следует, что, изменяя величину постоянного тока обмотки управления, можно регулировать режим рабочей цепи в широком диапазоне.

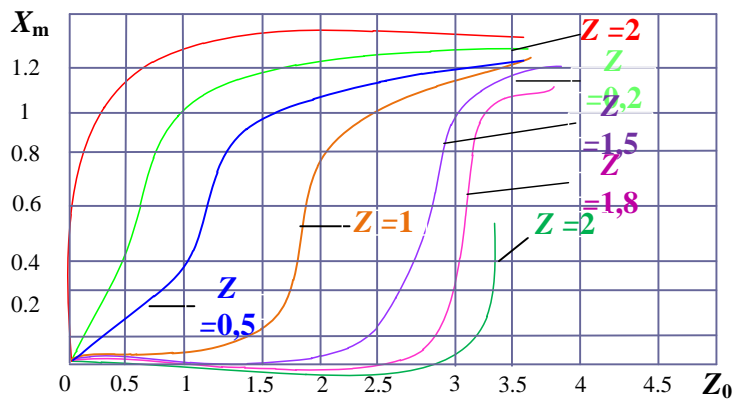


Рис.3. Кривые одновременного намагничивания

Анализ установившегося режима ферромагнитного стабилизатора тока методом повторной аппроксимации. Самым простым ферромагнитным стабилизатором тока является дроссель насыщения, подмагничиваемый постоянным током. Подробные исследования таких стабилизаторов показали, что их целесообразно применять для маломощных установок. Для улучшения энергетических показателей стабилизаторов тока на базе ферромагнитных элементов здесь предлагается вместо постоянного магнита использовать обмотку постоянного тока, питаемую от ранее рассмотренного феррорезонансного стабилизатора тока через выпрямитель. Варианты выполнения схем такого стабилизатора представлены на рис.4, где конденсатор C_K берётся из соображения компенсации отклонения рабочего тока магнитного усилителя при изменении напряжения сети и сопротивления нагрузки.

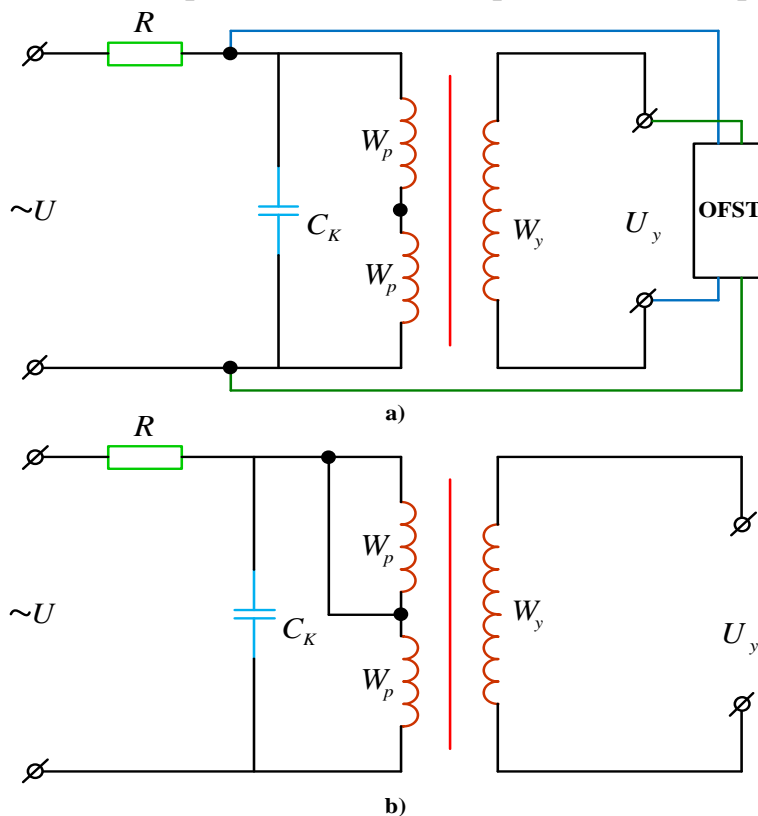


Рис.4. Варианты схем ферромагнитного стабилизатора тока

По цепи управления магнитного усилителя протекает выпрямленный ток однофазного феррорезонансного стабилизатора. В первой схеме (а) при синусоидальном токе из-за нелинейности кривой намагничивания в потоках сердечников появляются чётные гармоники, которые индуктируют в обмотке управления тока ЭДС удвоенной частоты. Это вызывает появление в цепи управления тока с частотой $2f$. Во втором варианте схемы стабилизатора тока, при синусоидальном входном напряжении, чётные гармоники появляются в токе рабочих обмоток и циркулируют лишь внутри контура, образованного параллельно включёнными обмотками W_p . Ток нагрузки имеет симметричную форму и на управляемой обмотке не индуктируется ЭДС чётных гармоник. Однако короткозамкнутый контур, состоящий из обмоток W_p , увеличивает постоянную времени усилителя. Но это не существенно для режима работы рассматриваемого стабилизатора тока, так как устройство работает при постоянном значении тока подмагничивания.

Для анализа установившегося режима ферромагнитного стабилизатора тока используем метод повторной аппроксимации, позволяющий относительно просто получить необходимые характеристики устройства. Сущность метода заключается в следующем: аналитически описывая кривую намагничивания ферромагнитного элемента степенной функцией, учитывая основные гармоники магнитного потока и тока, на основе метода гармонического баланса получим базовые уравнения для обобщенных характеристик управляемого ферромагнитного элемента.

Построим зависимости: $X_{1m}=f(Z_{1m})$ для различных x_0 .

В дальнейшем нас интересует вторая характеристика, которая не имеет явного аналитического выражения. С целью получения более удобной математической зависимости для $X_{1m}=f(Z_{1m})$ (рис.3) предлагается использовать следующую аппроксимирующую функцию:

$$z_{1m} = K_0 + K_1 X_{1m} + K_2 X_{1m}^n \tag{6}$$

здесь K_0, K_1, K_2 - коэффициенты аппроксимации; n -можно принять равным 3, 5, 7, 9, 11,

Обозначив через ε_1 отклонение значения Z_{im} от значения, получаемого по (6), запишем следующие зависимости:

$$\varepsilon_1 = K_0 + K_1 X_{1m} + K_2 X_{1m}^n - Z_{1m};$$

$$\varepsilon_2 = K_0 + K_1 X_{2m} + K_2 X_{2m}^n - Z_{2m};$$

.....

$$\varepsilon_n = K_0 + K_1 X_{nm} + K_2 X_{nm}^n - Z_{nm}.$$

Наилучшие значения коэффициентов K_0, K_1, K_2 наблюдаются, когда сумма квадратов отклонений будет наименьшей:

$$\sum_i^n \varepsilon_i^2 = \varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \dots + \varepsilon_n^2 = f(K_0, K_1, K_2);$$

$$\sum_i^n (K_0 + K_1 X_{im} + K_2 X_{im}^n - Z_{im})^2 = (K_0 + K_1 X_{1m} + K_2 X_{1m}^n - Z_{1m})^2 + \tag{7}$$

$$+ (K_0 + K_1 X_{2m} + K_2 X_{2m}^n - Z_{2m})^2 + \dots + (K_0 + K_1 X_{nm} + K_2 X_{nm}^n - Z_{nm})^2$$

Для того чтобы найти наименьшее значения функции $f(K_0, K_1, K_2)$, берем

частные производные по K_0, K_1, K_2 и приравняем к нулю, то есть:

$$\frac{\partial f}{\partial K_0} = 0, \quad \frac{\partial f}{\partial K_1} = 0, \quad \frac{\partial f}{\partial K_2} = 0.$$

Для случая, когда степень аппроксимирующей функции равна 7, имеем:

$$\left. \begin{aligned} nK_0 + K_1(X_{1m} + X_{2m} + \dots + X_{nm}) + K_2(X_{1m}^7 + X_{2m}^7 + \dots + X_{nm}^7) &= Z_{1m} + Z_{2m} + \dots + Z_{nm}; \\ K_0(X_{1m} + X_{2m} + \dots + X_{nm}) + K_1(X_{1m}^2 + X_{2m}^2 + \dots + X_{nm}^2) + K_2(X_{1m}^8 + X_{2m}^8 + \dots + X_{nm}^8) &= \\ = Z_{1m}X_{1m} + Z_{2m}X_{2m} + \dots + Z_{nm}X_{nm}; \\ K_0(X_{1m} + X_{2m} + \dots + X_{nm}) + K_1(X_{1m}^8 + X_{2m}^8 + \dots + X_{nm}^8) + K_2(X_{1m}^{14} + X_{2m}^{14} + \dots + X_{nm}^{14}) &= \\ = Z_{1m}X_{1m}^7 + Z_{2m}X_{2m}^7 + \dots + Z_{nm}X_{nm}^7. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Система уравнений (8) является системой алгебраических уравнений. Число уравнений равно числу неизвестных и число пар заданных значений X_{1m} и Z_{1m} должно быть больше, чем число неизвестных коэффициентов. Как видно, из анализа системы уравнений приходится выполнять большое количество вычислений и поэтому в расчёте необходимо использовать компьютерную технологию.

Таким образом, после аппроксимации кривой $X_{1m}=f(Z_{1m})$, получим явное аналитическое выражение кривых одновременного намагничивания ферромагнитного материала постоянным и переменным полями. На рис.5 представлены полученные по (5) характеристики $X_{1m}=f(Z_{1m})$ для различных Z_0 . Значения коэффициентов K_0, K_1 и K_2 зависят от величины Z_0 (рис.6). Это позволяет легко представить аналитическое выражение функции $X_{1m}=f(Z_{1m})$ для фиксированного значения тока подмагничивания. Сравнение характеристик, представленных на рис.3 и 5, показывает, что аналитическое описание характеристик одновременного намагничивания с помощью (6) даёт качественно правильные результаты, когда $Z_0 < 1,5$. Анализ установившегося режима схемы ферромагнитного стабилизатора тока произведем на основе метода учёта основной гармоники индукции.

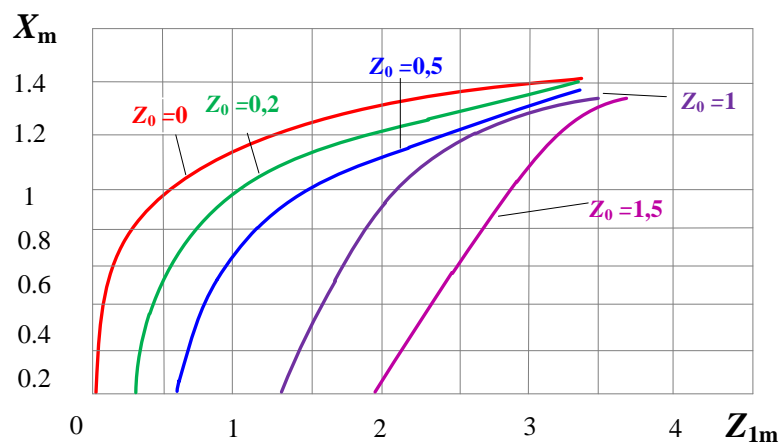


Рис.5. Зависимости $X_{1m}=f(Z_{1m})$ для различных Z_0

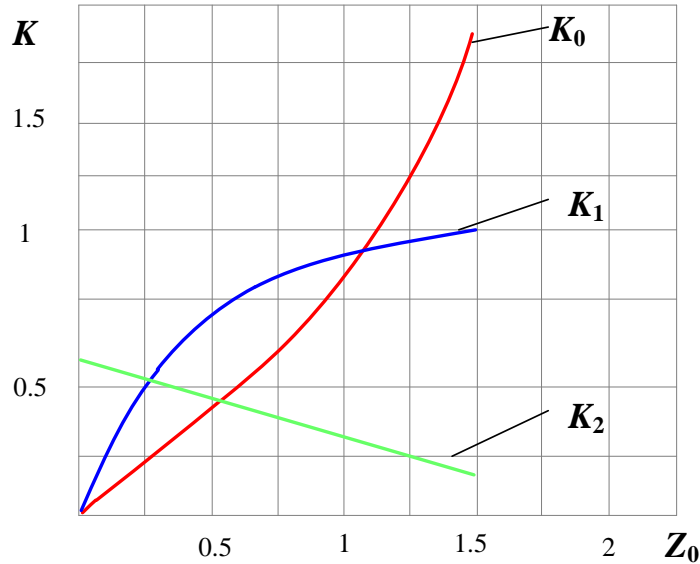


Рис.6. Зависимости $K_0, K_1, K_2=f(z_0)$

Для случая, когда $n=7$:

$$Z_{1m} = K_0 + K_1 X_{1m} + K_2 X_{1m}^7 \quad (9)$$

Ток, потребляемый из сети

$$Z_m = Z_{1m} - Z_{cm}$$

$$Z_{cm} = \frac{\omega C U_m}{i_\delta} \quad (10)$$

Для схемы ферромагнитного стабилизатора тока:

$$\omega \frac{d\phi_a}{dt} + \omega \frac{d\phi_b}{dt} = \frac{1}{C} i_c dt \quad (11)$$

Если учитывать равенство потоков в сердечниках А и В, то примем:

$$X = \frac{\phi}{\phi_\delta}; \quad Z_c = \frac{i_c}{i_\delta}. \quad (12)$$

Получим

$$\frac{d^2 x}{d\tau^2} = \frac{i_\delta Z_c}{2\omega^2 W C \phi_\delta}.$$

Обозначая

$$m = \frac{i_\delta}{2\omega^2 W C \phi_\delta}. \quad (13)$$

Имеем

$$Z_c = \frac{1}{m} \frac{d^2 x}{d\tau^2}. \quad (14)$$

Учитывая последнюю зависимость из (10), напомним:

$$Z_m = K_0 + K_1 X_{1m} + K_2 X_{1m}^7 - \frac{X_{1m}}{m}.$$

Построим характеристику $X_{1m}=f(Z_m)$ для различных значений m (рис.7).
 Когда $K_0=1,4; K_1=1; K_2=0,2$.

$$Z_m = 1,4 + \left(1 - \frac{1}{m}\right) X_{1m} + 0,2 X_{1m}^7 \quad (15)$$

Из анализа полученных характеристик видно, что эффект стабилизации более чётко выражается, когда $m=0.95$. Таким образом, подбирая нужную величину ёмкости C , можем создать стабилизатор тока, используя в цепи управления магнитного усилителя ферромагнитного стабилизатора тока. При правильном подборе величины C , ВАХ конденсатора будет почти параллельна линейной части характеристики ферромагнитного элемента.

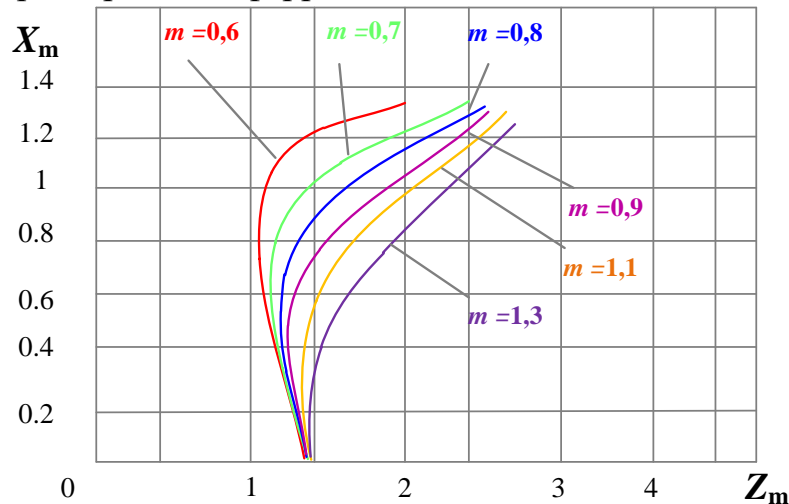


Рис.7. Зависимости $X_{1m}=f(Z_{1m})$ для различных m

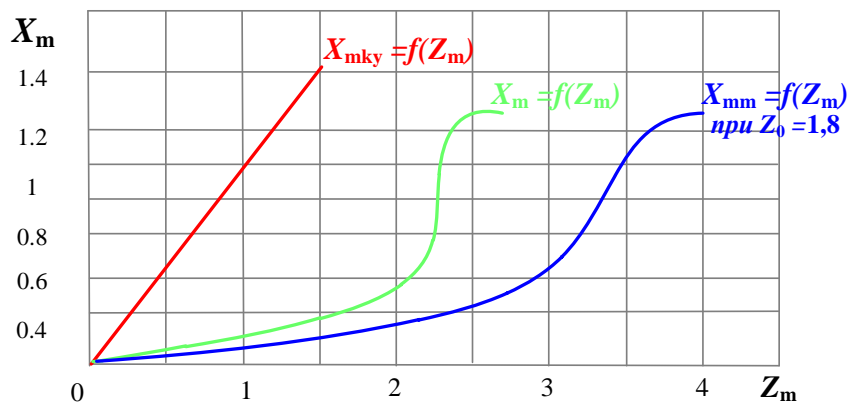


Рис.8. Характеристики $X_m=f(Z_m)$

Из (13) следует, что:

$$C = \frac{i_\delta}{2\omega^2 W \phi_\delta}$$

На рис.8 показаны характеристики элементов ферромагнитного стабилизатора тока и результирующая зависимость $X_m=f(Z_{1m})$, полученная графическим путем.

ВАХ ферромагнитного стабилизатора тока представляет собой зависимость действующего значения первой гармоники переменного напряжения на зажимах устройства от действующего значения первой гармоники тока, представляющего алгебраическую сумму токов рабочих обмоток и конденсатора. Для построения этой характеристики воспользуемся результатами, полученными в предыдущем

параграфе. Будем считать известными кривые намагничивания ферромагнитных материалов, так как в настоящее время эти характеристики достаточно изучены исследователями и имеются обширные материалы по теоретическим основам электромагнитных процессов в ферромагнитных средах.

Связь между магнитной индукцией B и напряжённостью поля H аппроксимируем степенной функцией порядка n . При известных параметрах нелинейной индуктивности можем перейти к характеристикам $I_w=f(\Phi)$, учитывая, что:

$$H_m \cdot l = I_m \cdot W; \quad \Phi_m = B_m \cdot S.$$

где H_m - амплитуда первой гармоники напряженности магнитного поля; l - длина средней магнитной линии; I_m - амплитуда первой гармоники переменного тока; S - поперечное сечение сердечника.

В дальнейшем, вводя безразмерные параметры, переходим к обобщенным характеристикам ферромагнитного элемента и строим зависимость $X_{1m}=f(Z_m)$ для стабилизатора тока. При этом учитываем значение m , которое выбирается из условий стабилизации и зависит от величины ёмкости C . Переход к действующим значениям осуществляется с учётом:

$$u = 2W \frac{d\phi}{dt} = U_m \cos \omega t.$$

Тогда

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

Здесь

$$\Phi_m = \frac{\sqrt{2}U}{4\pi a W}.$$

Таким образом, для перехода от кривой $X_{1m}=f(Z_{1m})$ к $U=f(I)$ необходимо изменить масштаб оси ординат в $\frac{4\pi W f \Phi_m}{\sqrt{2}}$ раза, а масштаб оси абсцисс в $\frac{i_\delta}{\sqrt{2}}$ раза.

Заключение

На основе анализа принципов стабилизации тока и изучения основных технико-экономических показателей существующих устройств выявлена экономичность ферромагнитных стабилизаторов тока, построенных на предложенном принципе стабилизации – суммировании токов двух ветвей. При этом в качестве одной ветви принята электроферромагнитная цепь, обладающая широким падающим участком на вольт-амперной характеристике, а компенсацию отрицательного участка «S» - образной вольт-амперной характеристики возможно осуществить различными схемными методами, развитие которых позволило предложить следующие схемы ферромагнитных стабилизаторов тока: базовая однофазная, мостовая, дифференциальная, двухфазно-однофазная, трехфазно-однофазная, трехфазная с нулевым проводом и трехфазная без нулевого провода.

Анализ основных характеристик предложенных схем стабилизаторов тока показал:

- стабилизация тока наблюдается как при отклонениях напряжения сети, так и при изменениях величин нагрузки. Режимы короткого замыкания и холостого хода не являются аварийными;

- с увеличением сопротивления нагрузки диапазон стабилизации не изменяется, но эффект стабилизации начинается при более высоких пороговых значениях напряжения;

- допустимая ГОСТом несимметрия питающей сети не влияет на режим стабилизации, кроме этого, трехфазная схема ферромагнитных стабилизаторов тока служит симметрирующим устройством.

Предложен стабилизатор тока на базе магнитного усилителя, с использованием в цепи управления схемы феррорезонансного стабилизатора тока, что позволило уменьшить более чем в два раза установленные мощности элементов устройства.

Литература

1. Усманов Э.Г., Абдураимов Э.Х., Каримов Р.Ч. Оптоэлектронное бесконтактное реле напряжения // Агентство по интеллектуальной собственности РесУз. Патент на изобретение № IAP 05122. 29.10.2015.

2. Абдураимов Э.Х., Халманов Д.Х. Силовые бесконтактные коммутирующие устройства Международная конференция «INNOVATION–2017» Сборник научных статей. Ташкент, 2017, -С.219-220.

3. Абдураимов Э.Х., Халманов Д.Х. Энергосберегающие бесконтактные коммутирующие устройства. Международная конференция «Проблемы повышения эффективности использования электрической энергии в отраслях агропромышленного комплекса» ТИИИиМСХ г. Ташкент 28 ноябрь 2018 г. С-134-138.

4. Каримов И.Ч., Каримов Р.Ч. Электр таъминоти тизимларида контактсиз ускуналарнинг ишлатилиши // «Техника юлдузлари» журналы (ISSN: 1682-7686). Тошкент, 2017. - №4. – Б.53-56.

5. Бобожанов М.Қ., Расулов А.Н., Каримов Р.Ч., Саттаров Х.А. Электр таъминоти тизимида контактсиз кучланиш стабилизаторларини тадқиқ қилиш // «Муҳаммад ал-Хоразмий авлодлари» журналы (ISSN: 2181-9211). Тошкент, 2018. - №3(5). – Б.106-109.

6. Абдураимов Э.Х., Халманов Д.Х., Хамидова Н.Э. Высокоэффективные и надёжные бесконтактные коммутирующие устройства. Материалы республиканской научно-технической конф. «Интеграция науки, образования и производства важнейший фактор в реализации инвестиционных проектов» Фил. Рос.Гос Университета Н и Г им. Губкина. Ташкент -2019, С.247-249.

7. Каримов Р.Ч., Рўзиназаров М.Р., Паноев А.Т. Электр таъминоти тизимида сифимли филтрли тўғрилагични таҳлил қилиш // «Фан ва технологиялар тараққиёти» илмий-техникавий журналы. Бухоро, 2017. - №1. – Б.22-27.

8. Каримов Р.Ч., Рафиқова Г.Р. Сифимли тўплагичлар энергиясини зарядловчи қурилмаларнинг параметрлари ва иш режимларини танлаш // «Фан ва технологиялар тараққиёти» илмий-техникавий журналы. Бухоро, 2016. - №1. – Б.9-19.

9. Суллийев А.Х., Каримов Р.Ч. Электр таъминоти тизимида опотиристорли контактсиз кучланиш релесини ишлатиш // «ТошТЙМИ ахбороти» журнали (ISSN: 2091-5365). Тошкент, 2018. - №4. – Б.149-154.

10. Бобожанов М.Қ., Каримов Р.Ч. Электр таъминоти тизимида оптоэлектронли резистив занжирларни тадқиқ қилиш // «ТошДТУ хабарлари» журнали (ISSN: 1684-789X). Тошкент, 2017. - №4(101). – Б.53-57.

11. Расулов А.Н., Каримов Р.Ч., Абдураимов Э.Х., Рўзиназаров М.Р. Электр таъминоти тизимида транзисторли резистив занжирларни ишлатиш // «ТошДТУ хабарлари» журнали (ISSN: 1684-789X). Тошкент, 2015. - №3(92). – Б.108-113.

12. Усманов Э.Г., Абдураимов Э.Х., Каримов Р.Ч. Использование бесконтактных реле для улучшения качества электроэнергии // Журнал «Вестник ТашГТУ» (ISSN: 1684-789X). Ташкент, 2013. - №3-4. – С.48-51.

13. Усманов Э.Г., Абдураимов Э.Х., Каримов Р.Ч., Авлакулов Х.П. Ночизикли электр занжирида динамик жараёнларнинг таҳлили // «ТошДТУ хабарлари» журнали (ISSN: 1684-789X). Тошкент, 2010. - №1-2. – Б.72-75.

14. Усманов Э.Г., Абдураимов Э.Х., Каримов Р.Ч. Нелинейная динамическая цепь с тиристором // Журнал «Проблемы информатики и энергетики». Ташкент, 2006. - № 2-3. – С.37-41.

15. Кадыров Т.М., Каримов Р.Ч. Электр таъминоти тизимларида контактсиз реле ва ростловчи ускуналар // «Техника юлдузлари» журнали (ISSN: 1682-7686). Тошкент, 2006. - № 1. –Б.39-41.

16. Абдураимов Э.Х., Расулов А.Н., Каримов Р.Ч., Рўзиназаров М.Р. Электр таъминоти тизимида куч тиристорларини бошқаришида оптоэлектронли резистив занжирларни ишлатиш // «ТошДТУ хабарлари» журнали (ISSN: 1684-789X). Тошкент, 2015. - №2(90). – Б.103-108.

17. Bobojanov M.K., Usmanov E.G., Abduraimov E.H., Karimov R.Ch. Resistive time delay switches // Scientific journal «European Science Review» (ISSN: 2310-5577). Vienna (Austria), 2018, January–February. №1-2. – PP.210-212.

18. Karimov R.Ch., Rasulov A.N., Meliqo'ziyev M.V., Almardonov O., Rafiqov M.Z. Analysis on diode electrical circuits // International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology. India. Issue 3, March 2019, - №6, – P.8294-8298.

19. Rasulov A.N., Karimov R.Ch. The Contactless Relay of Tension in System of Power Supply // Scientific journal «Eastern European» (ISSN: 2199-7977). Dusseldorf (Germany), Ausgabe. 2015. - №4. – PP.174-178.

20. Rasulov A.N., Karimov R.Ch. The Contactless Thyristor Device for Inclusion and Shutdown of Condenser Installations in System of Power Supply // Scientific journal «Eastern European» (ISSN: 2199-7977). Dusseldorf (Germany), Ausgabe. 2015. - №4. – PP.179-183.

21. Каримов Р.Ч., Каримов И.Ч. Электр таъминоти тизимларида контактсиз ускуналарнинг ишлатилиши // ТошДТУ “Фан ва техника тараққиётида интеллектуал ёшларнинг ўрни” мавзусида ўтказиладиган Республика илмий-техник анжумани, Тошкент. 2017 йил 17-20 апрель, – Б.272-274.