

МИНИСТЕРСТВО НАРОДНОГО ОБРАЗОВАНИЯ УзССР
ТАШКЕНТСКИЙ ОРДЕНА ДРУЖБЫ НАРОДОВ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. БЕРУНИ

На правах рукописи

АБДУРАХМАНОВ Ахмеджан Ганиевич

УДК 621.314.263

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ АНАЛИЗА
ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ В ФЕРРОРЕЗО-
НАНСНЫХ ЦЕПЯХ АВТОПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ
ПРИРОДЫ

Специальность 05.09.05 — Теоретические основы
электротехники

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ташкент — 1989

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Современный этап развития энергетики и электрификации характеризуется высокими темпами роста потребления электрической энергии, большой концентрацией и централизацией ее распределения, интенсивным увеличением единичной мощности энергооборудования, широким использованием новых устройств преобразовательной техники и электротехнологических процессов.

При этом заметное место в теоретической и прикладной электротехнике, положенной в основу современной электротехнологии и электроавтоматики, занимают так называемые, нелинейные электрические цепи и происходящие в них явления. Так например, автоколебательные процессы происходящие в однофазных и многофазных электроферромагнитных цепях /ЭФМЦ/ обладают исключительным многообразием и специфической сложностью их исследования.

В последнее время заметно возрос интерес к энергетическому методу анализа нелинейных электрических цепей / с нелинейными: активными, индуктивными и емкостными элементами/, сущность которого заключается в определении осуществимости режима - условия равенства активных и реактивных мощностей источника и потребителя в цепях преобразования электрической энергии. Анализ автоколебательных процессов в однофазных и трехфазных системах энергетическим методом способствует созданию новых схемных решений, всевозможных устройств преобразования энергии /например, делителей частоты/ с точки зрения энергетической эффективности. Метод позволяет выявить зависимости удельной преобразуемой мощности от способа управления характеристиками ферромагнитного элемента /ФЭ/, влияния намагничивания, кратности преобразования частоты, марки используемых материалов и т.п.

Диссертационная работа выполнена в соответствии с планом НИР по теме № 53/3 кафедры " Теоретическая и общая электротехника " ТашПИ, утвержденной ГННТ СССР и связанной с проблемой № 001.11 " Разработка, исследование и внедрение устройств систем управления, вычислительной, преобразовательной и информационно-измерительной техники на базе ферромагнитных и полупроводниковых элементов ".

Целью работы является теоретическое и экспериментальное исследование основных закономерностей возбуждения и поддержания субгармонических колебаний /СГК/ второго и третьего порядков в однофазных, двухфазных и трехфазных ЭФМЦ, а также создание ферромагнитных частотопреобразующих устройств:

- обоснование энергетического метода, определяющего обмен энергией в режиме возбуждения колебаний на различных частотах для анализа электромагнитных процессов в ЭФМЦ с частотопреобразующими свойствами;

- выявление основных закономерностей возбуждения автопараметрических колебаний /АПК/ на частоте субгармоники, а также их фазовых соотношений;

- анализ установившихся режимов СГК второго и третьего порядков и критических значений параметров однофазно-трехфазных ЭФМЦ, а также установление влияния начальных условий на возбуждение СГК численным методом решения уравнений цепи на ЭВМ.

Методика исследования базируется на энергетическом подходе, основанном на балансе активных и реактивных мощностей источника и потребителя в частотопреобразующих ЭФМЦ, т.е. на законе сохранения энергии.

Она обеспечивает практическую реализацию этого баланса в анализе СГК в однофазных, двухфазных и трехфазных ЭФМЦ.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработан алгоритм составления алгебраических уравнений, описывающих установившийся режим СГК в однофазных, двухфазных и трехфазных ЭФМЦ с подмагничиванием и без него, основанный на энергетическом подходе без решения нелинейных дифференциальных уравнений.

2. Определены области существования СГК в зависимости от приложенного воздействия и параметров цепи, а также их критические значения.

3. На основе анализа в однофазных и трехфазных цепях разработан двухфазный ферромагнитный делитель частоты в два раза.

4. Определены параметры элементов ЭФМЦ на частоте СГК из энергетических характеристик - активных и реактивных составляющих полной мощности.

Практическая ценность диссертации состоит:

- в разработке инженерной методики расчета субгармонических режимов однофазных, двухфазных и трехфазных ЭФМЦ на энергетическом подходе, позволяющей выполнить электрический и конструктивный расчеты ферромагнитных делителей частоты с улучшенными энергетическими показателями;
- в разработке новых технических решений, позволяющих улучшить энергетические характеристики ферромагнитных делителей частоты и расширить их функциональные возможности.

Апробация. Материалы работы докладывались и обсуждались на:

- VI Всесоюзной конференции по теории и методам расчета нелинейных цепей и систем / Ташкент, 1982 /;
- I Всесоюзной конференции по теоретической электротехнике / Ташкент, 1987 /;
- научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава ТашПИ / 1984-1989 / .

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 8 работ. Имеется одно А.с. на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, изложенных на 102 страницах машинописного текста, содержит 32 рисунка, 4 таблиц, 5 приложений. Список использованной литературы содержит 121 наименование.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и основные задачи исследования, дана общая характеристика работы и кратко изложено содержание работы.

В первой главе рассматриваются основные особенности и условия возбуждения автопараметрических колебаний, в частности, СГК в однофазных и многофазных системах.

В цепях с нелинейными резисторами, индуктивностью и емкостью ЛПК на той или иной частоте возбуждаются за счет свойств энергоемких элементов цепей накапливать определенное количество энергии. Последнее в каждом конкретном случае определяется внутренними параметрами цепи и амплитудо-вынуждающей силы.

Наибольший интерес с практической точки зрения представляет АП-цепи с нелинейной индуктивностью, способные развивать достаточно большие мощности при преобразовании энергии.

Ферромагнитные элементы / ФЭ / в сочетании с линейными емкостями могут образовать цепи / рис. I. /, в которых запасаются значительные количества энергии, которые при возбуждении в них АПК могут быть эффективно использованы для создания приборов и устройств преобразовательной техники, обладающими также и фазо-дискретными признаками.

Особенно ярко эти качества проявляются при использовании трехфазных цепей в режиме возбуждения СГК /рис. I. /. При этом фазовое взаимодействие частот основной и низших гармоник играет особую роль. Для установления закономерностей фазовых сдвигов частот основной и низших гармоник в многофазных системах, рассмотрены фазовые соотношения СГК и в частности, показана, что сдвиги фаз СГК для трехфазных систем могут быть: $\psi = \left(\frac{1-\lambda}{m\pi} \right) 2\pi$ где: m - число фаз, λ - порядок субгармоники и λ - порядок фазы.

В этой же главе рассматривается обоснование применения частотно-энергетических соотношений для анализа АПК на частоте субгармоники. В общем случае для частотопреобразующих цепей / при соотношении частот $n\omega$ и ω , $n\omega_0 + \omega_0$ / на базе ЭФМЦ согласно теореме Телледжена уравнение энергетического состояния в комплексной форме описывается в виде

$$\sum_p \dot{U}_p^* \dot{I}_p^k = \sum_\alpha \dot{U}_\alpha^k \dot{I}_\alpha^k \quad / 1 /$$

где: p - номер источника, α - номер элемента потребителя, k - номер гармоники.

Сумма левой части уравнения определяется количеством входов p , и каждый ее член является комплексной мощностью, отбираемой от источника.

АП-цепи в режиме преобразования частоты становятся "обогреленной", потребляющей от источника только определенной мощности на частоте источника. Исходя из физической сущности преобразования частоты, уравнение баланса мощностей на частоте субгармоники принимает вид:

$$\dot{S}_{ист}^k = \dot{S}_\alpha^k + \dot{S}_{\alpha n}^k \quad / 2 /$$

где: \dot{S}_α^k - полная мощность, которая должна поступать в преобразующий элемент для обеспечения заданного режима преобразования частоты, $\dot{S}_{\alpha k}^k$ - полная мощность на преобразованной частоте выделяемая в нагрузку.

В режиме деления частоты в АП-цепях необходимо соблюдаться условие

$$\dot{S}_{\text{вст}}^k = 0$$

/ 3 /

При этом необходимая мощность в нагрузке выделяется за счет преобразования частоты, т.е.

$$\dot{S}_{\alpha k}^k = -\dot{S}_\alpha^k$$

/ 4 /

Такой режим будет возможным, если полная проводимость нагрузки выбрана из условия

$$Y_\alpha^k = -\frac{\dot{S}_{\alpha k}^k}{(U_\alpha^k)^2}$$

/ 5 /

Подобно этому можно определить полное сопротивление

$$Z_\alpha^k = -\frac{\dot{S}_{\alpha k}^k}{(I_\alpha^k)^2}$$

/ 6 /

Из / 4 / имеем

$$P^k + jQ = 0$$

/ 7 /

Для того, чтобы получить энергию тока на частоте " k " необходимо выполнение следующего условия

$$P^k = \sum_{i=1}^{n+k} P_p^i$$

/ 8 /

Это означает преобразование активной мощности, поступающей в цепь от источников всех частот, кроме частоты " k ".

Если зададимся характеристикой намагничивания Φ для однофазной цепи / рис. 1. / в виде

$$i = f(\Psi)$$

/ 9 /

и потокосцеплением в Φ

$$\Psi = \Psi_0 + \sum_{k=1}^n \Psi_{km} \sin(k\omega t + \psi_k)$$

/ 10 /

то согласно / 9 / закон изменения тока имеет вид

$$i = \sum_{k=0}^n A_{km} \sin(k\omega t + \psi_{k\omega})$$

Здесь $A_{км}$ - амплитуда, зависящая от вида аппроксимации характеристики $\Phi\partial$.

Представив гармонические составы переменных i и $u_k = \frac{d\Psi}{dt}$ в комплексной ф-ре, имеем

$$\dot{I} = \sum_{k=0}^n I_{км} e^{j\varphi_{k\omega}}$$

$$\dot{U}_k = \sum_{k=0}^n U_{км} e^{j\varphi_{k\omega}}$$

/ II /

С учетом характера переменных i и u_k , комплексная мощность цепи

$$\dot{S}_k = \frac{1}{2} \dot{U}_k \dot{I}_k^*$$

/ I2 /

Из / I2 / получим основные энергетические соотношения, вытекающие из закона сохранения энергии.

Во второй главе выполнены анализы установившегося режимов СК второго и трет его порядков в однофазных цепях, а также частотопреобразующих свойств $\Phi\partial$ с применением энергетических соотношений. Нелинейная характеристика $\Phi\partial$ аппроксимируется кубическим полиномом

$$i = \alpha \psi + \beta \psi^3$$

/ I3 /

Зададимся потокоцеплением в $\Phi\partial$ в виде

$$\psi = \Psi_{1m} \cos(\omega t + \varphi_1) + \Psi_{3m} \cos(3\omega t + \varphi_3)$$

/ I4 /

Из / I3 / с учетом / I4 / имеем (без учета высших гармоник):

$$i = A_1 \cos(\omega t + \varphi_1) + A_2 \sin(\omega t + \varphi_1) +$$

$$+ B_1 \cos(3\omega t + \varphi_3) + B_2 \sin(3\omega t + \varphi_3)$$

/ I5 /

И тогда согласно / II / и / I2 / имеем

$$P_1 = -\frac{3}{8} \beta \omega \Psi_1^2 \Psi_3 \sin(3\varphi_1 - \varphi_3)$$

$$Q_1 = \frac{1}{2} \omega \Psi_1^2 \left[\alpha \Psi_{1m} + \frac{3}{4} \beta \Psi_{1m}^2 + \frac{3}{2} \beta \Psi_{3m}^2 + \frac{3}{4} \beta \Psi_{1m} \Psi_{3m} \cos(3\varphi_1 - \varphi_3) \right]$$

$$P_3 = \frac{3}{8} \beta \omega \Psi_1^2 \Psi_3 \sin(3\varphi_1 - \varphi_3)$$

$$Q_3 = \frac{3}{2} \omega \Psi_{3m} \left[\alpha \Psi_{3m} + \frac{3}{4} \beta \Psi_{3m}^2 + \frac{3}{2} \beta \Psi_{1m}^2 \Psi_{3m} + \frac{1}{4} \beta \Psi_{1m}^3 \cos(3\varphi_1 - \varphi_3) \right]$$

При условии $P_3 > 0$ и $P_1 < 0$, предполагается что $\Phi\partial$ преобразует энергию тока с частотой 3ω в энергию тока частоты ω .

Введем обозначения:

$$\alpha = \frac{3}{4} \beta \Psi_{1m} \Psi_{3m} \quad / 16 /$$

$$\beta = \left[\alpha + \frac{3}{4} \beta \Psi_{1m}^2 + \frac{3}{2} \beta \Psi_{3m}^2 \right] \quad / 17 /$$

$$\gamma = 3\Psi_1 - \Psi_3 \quad / 18 /$$

$$K_p = \frac{2R}{\omega \Psi_{1m}^2} = -\alpha \sin \chi \quad / 19 /$$

$$K_q = \frac{2Q}{\omega \Psi_{1m}^2} = \beta + \alpha \sin \chi \quad / 20 /$$

Для определения стационарного режима СГК третьего порядка, возведем в квадрат / 19 / и / 20 / и, сложив их получим выражение определяющее связь между амплитудой основной и субгармонической составляющих потокосцеплений.

$$36\Psi_{3m}^4 + 27\Psi_{3m}^2\Psi_{1m}^2 + 9\Psi_{1m}^4 - 48\left(\frac{K_q - Q}{\beta}\right)\Psi_{3m}^2 - 24\left(\frac{K_q - Q}{\beta}\right)\Psi_{1m}^2 + 46\left(\frac{K_q - Q}{\beta}\right)^2 \left[\left(\frac{K_p}{K_q - Q}\right)^2 + 1 \right] = 0 \quad / 21 /$$

Уравнение / 21 / представляет собой уравнение связи потоков Φ_3 и является уравнением кривой второго порядка относительно квадрата потоков Ψ_{3m}^2 и Ψ_{1m}^2 . Инварианты уравнения / 21 / есть:

$$S = \frac{56}{4}; \quad S = 45; \quad \Delta = 324[-8 + 7(K^2)]$$

$$K = \frac{K_p}{K_q - Q}; \quad K_p = \frac{\omega R}{Z_1^2}; \quad K_q = \frac{1}{CZ_1^2} \quad / 22 /$$

где: R - активное сопротивление контура,

C - емкость контура,

Z_1 - полное сопротивление контура на частоте субгармоники относительно зажимов Φ_3 и при замкнутом источнике.

При выполнении условия $\Delta \cdot S \leq 0$ уравнение / 21 / описывает действительные эллипсы / рис. 2./, соответствующие установившемуся режиму возбуждения СГК. Положим, точке Ψ_{3m}^2 соответствует СГК с амплитудой β_1 . При увеличении входного воздействия амплитуда СГК постепенно уменьшается и при некотором его значении β_1 срывается. Уменьшение входного воздействия от исходного значения Ψ_{3m}^2 приводит к медленному увеличению амплитуды СГК и при дальнейшем уменьшении его в точке β_1'' происходит срыв.

Как видно из этого рисунка, СГК в рассматриваемой системе возбуждаются жестко.

Причем, располагая зависимостью $\Psi_{\text{ин}}^a = f(\Psi_2^a)$, можно, перейти к искомой основной зависимости $\Psi_1 = f(\Psi_2)$, а через нее можно получить зависимость напряжения на выходе U_1 от напряжения источника питания U_2 .

Прямая AC разделяет режим устойчивых субгармонических колебаний (сплошная линия, рис. 2), а нижняя часть (пунктирная линия, рис. 2) - неустойчивый режим. Касательные параллельные прямой AB (точки C_0, C_1, C_2, C_3) определяют режимы оптимального преобразования энергии.

Проверку возможности, что схема сможет обеспечить нужные условия для сохранения режима деления частоты можно проводить из зависимости

$$K_a = f(K_p)$$

приведенной на рис. 3.

Это достигается рассмотрением режимов холостого хода и короткого замыкания схемы на частоте субгармоники, т.е. в этих режимах должно быть выполнено условие $\beta=0$ или $K_p=0$, из которого определяются значения фазового угла магнитных потоков $\chi=0$ или 180° , причем $\chi=0$ соответствует режиму короткого замыкания (точка A_1 рис. 3), а с другой $\chi=180^\circ$ - режиму холостого хода (точка A_2 , рис. 3). Из этой же зависимости можно определить величину наибольшей преобразуемой активной мощности ферромагнитным элементом (точка A_3 , рис. 3).

В работе из анализа уравнения / 21 / определены критические значения параметров цепи, а также области существования СГК третьего порядка. В частности, область существования СГК по входному воздействию определяется как

$$\Delta \Psi_{\text{см}}^2 = \Psi_{\text{смmax}}^2 - \Psi_{\text{смmin}}^2 = \frac{16}{21} \sqrt{1 - \gamma \left(\frac{K_p}{K_a - C_1} \right)}$$

/ 23 /

или с учетом параметров цепи примет вид

$$\Delta \Psi_{\text{см}}^2 = \frac{16}{21} \sqrt{1 - \gamma \left(\frac{\omega r}{\frac{1}{C} - QZ^2} \right)}$$

/ 24 /

а критические значения активного сопротивления определяется как

$$(r_{кp})_{\text{кр}} = -\frac{\sqrt{\gamma}}{2} \frac{\omega}{Q} \pm \sqrt{\frac{\gamma \omega^2}{4Q^2} + \frac{1}{\omega C} \left(\frac{\omega}{Q} - \frac{1}{\omega C} \right)}$$

/ 25 /

При заданных значениях активного сопротивления, из / 25 / также можно определить критическое значение емкости.

С целью определения области существования СГК в зависимости от параметров цепи и входного воздействия уравнения / 21 / также анализировано с помощью ЭВМ. Получены семейства кривых, характеризующие связи

$$\Psi_{im}^2 = f(\Psi_{0m}^2)$$

, при различных значениях параметров K_p и K_q / рис. 2. /

В этой же главе рассматриваются свойства возбуждения СГК второго порядка в ЭЭМД с подмагничиванием.

Сохранив ранее принятую аппроксимацию, зададимся законом изменения потокосцепления $\Phi\Delta$ в виде:

$$\Psi = \Psi_0 + \Psi_{im} \cos(\omega t + \varphi_1) + \Psi_{2m} \cos(2\omega t + \varphi_2) \quad / 26 /$$

Выразив i и u в комплексной форме, получим составляющие полной мощности:

$$P_1 = -3\beta\omega\Psi_0\Psi_1^2\Psi_2 \sin(2\varphi_1 - \varphi_2) \quad / 27 /$$

$$Q_1 = \frac{1}{2} \omega \Psi_1^2 \left[\alpha + \frac{3\beta}{4} \Psi_1^2 + 3\beta\Psi_0^2 + \frac{3\beta}{2} \Psi_2^2 + 6\beta\Psi_0\Psi_2 \cos(2\varphi_1 - \varphi_2) \right] \quad / 28 /$$

$$P_2 = 3\beta\omega\Psi_0\Psi_1^2\Psi_2 \sin(2\varphi_1 - \varphi_2) \quad / 29 /$$

$$Q_2 = \omega\Psi_2 \left[\alpha\Psi_2 + \frac{3\beta}{4} \Psi_2^3 + 3\beta\Psi_0\Psi_2 + \frac{3\beta}{2} \Psi_1^2\Psi_2 + \frac{3\beta}{2} \Psi_0\Psi_1^2 \cos(2\varphi_1 - \varphi_2) \right] \quad / 30 /$$

Исходя из уравнения баланса активной мощности, при

$$P_2 > 0 \text{ и } P_1 < 0 \quad \text{или} \quad 0 < (2\varphi_1 - \varphi_2) < 180^\circ \quad / 31 /$$

имеем, что ЭЭМД обеспечивает режим деления частоты в два раза.

Для определения области существования СГК второго порядка, критических значений параметров цепи, при которых происходит оптимальное преобразование энергии, совместно решим /28/ и /29/ с учетом обозначений принятых в /18/ - /20/.

После некоторых преобразований /27/ и /28/ получим выражение, определяющее связь между квадратами потоков $\Psi_{im}^2, \Psi_{0m}^2, \Psi_0^2$

$$4\Psi_{2m}^4 + \Psi_{im}^4 + 16\Psi_0^2 + 4\Psi_{2m}^2\Psi_{im}^2 + 8\Psi_{im}^2\Psi_0^2 - \frac{16}{3\beta}(K_q - \alpha)\Psi_{2m}^2 - \frac{6}{3\beta}(K_q - \alpha)\Psi_{im}^2 + \frac{3\beta}{3\beta}(K_q - \alpha)\Psi_0^2 + \frac{16}{9\beta^2}(K_q - \alpha)^2 \left[\left(\frac{K_r}{K_q - \alpha} \right)^2 + 1 \right] = 0 \quad / 32 /$$

Большой дискриминант (32) равен:

$$\Delta' = 16(4m - n^2)$$

Здесь: $n = \frac{8}{3\beta} (K_q - \alpha)$

$$m = \frac{16}{9} \left(\frac{K_q - \alpha}{\beta} \right)^2 \left[\left(\frac{K_p}{K_q - \alpha} \right)^2 + 1 \right] \quad / 33 /$$

При $\Delta' \leq 0$ уравнение /32/ описывает либо поверхность конуса в случае $K_p = 0$ или поверхность двухполостного гиперboloида при $K_p \neq 0$.

Для определения количественных соотношений СГК в уравнении /32/ считаем заданным квадрат потока подмагничивающего воздействия являющегося управляющим параметром режима деления частоты.

При этом уравнение примет вид и будет также представлять кривую второго порядка

$$4\Psi_{2m}^4 + \Psi_{1m}^4 + 4\Psi_{2m}^2\Psi_{1m}^2 - \frac{16}{3\beta}(K_q - \alpha)\Psi_{2m}^2 - \frac{8}{3\beta}(K_q - \alpha - 3\beta\Psi_0^2)\Psi_{1m}^2 + \frac{16}{9\beta^2}(K_q - \alpha)^2 \left[\left(\frac{K_p}{K_q - \alpha} \right)^2 + 1 + 6\beta\Psi_0^2 \right] = 0 \quad / 34 /$$

инварианты которого равны:

$$S = 5; \quad \delta = 0; \quad \Delta = \frac{16}{9} \left(\frac{K_q - \alpha}{\beta} \right)^2 \left[\left(\frac{K_p}{K_q - \alpha} \right)^2 + 1 + 9\beta\Psi_0^2 \right]$$

При $\Psi_0^2 > 0$ и $\Delta < 0$, что соответствует сечению поверхности описывающую уравнением /32/ плоскостями Ψ_0^2 , уравнение / 34 / описывает семейство парабол, приведенные на рис. 6.

Условие $\Psi_0^2 > 0$ в уравнении / 3' / позволяет определить область существования СГК по входному воздействию, в частности

$$\Delta\Psi_{2m}^2 = \Psi_{2m\max}^2 - \Psi_{2m\min}^2 = \sqrt{\frac{n^2 - 4m}{\beta}} \quad / 36 /$$

При учете обозначений /22/, из /36/ можно определить область существования по входному воздействию. Исследуя условие $\Psi_0^2 = 0$, из /34/ определены критические параметры при которых существуют СГК второго порядка.

При этом выявлено, что

$$\frac{d(\Psi_{2m}^2)}{d(\Psi_{1m}^2)} \Big|_{\Psi_{1m}^2 = 0} \geq 0$$

определяет условие мягкого возбуждения СГК (Ψ_{03}^2 и Ψ_{04}^2), в противном случае (Ψ_{01}^2 и Ψ_{02}^2) СГК возбуждаются жестко.

В третьей главе анализируются процессы возбуждения и поддержания СГК третьего порядка в симметричных трехфазных ЭФМЦ с применением энергетических соотношений. Показано, то что СГК в трехфазных системах обладают исключительным многообразием, и потому их исследования сложны и имеют свои особенности. Теоретическое и экспериментальное исследование основных закономерностей СГК в многофазных системах нацелено на разработку инженерных методов расчета, что важно при проектировании различных частотопреобразующих устройств. С другой стороны, изучение основных свойств СГК в многофазных системах позволяет выявить некоторые закономерности перенапряжений возникающих в ДЭП с емкостной компенсацией и принять меры для их предотвращения.

Возбуждение СГК третьего порядка в трехфазных системах зависит от амплитуды приложенного напряжения начальных условий и параметров цепи. Они могут поддерживаться длительное время при различных амплитудно-фазовых соотношениях и чередованиях фаз нарушением симметрии системы.

Показано, что в общем случае сдвиги фаз возбуждившихся СГК третьего порядка могут быть в трех вариантах, при сохранении симметрии по основной гармонике:

$$\begin{aligned} \text{вариант I, } \varphi_\lambda &= \frac{2\pi}{9} & \text{или } 0^\circ, 40^\circ, 80^\circ \\ \text{вариант II, } \varphi_\lambda &= \frac{4\pi}{9} & \text{или } 0^\circ, 80^\circ, 160^\circ \\ \text{вариант III, } \varphi_\lambda &= \frac{8\pi}{9} & \text{или } 0^\circ, 160^\circ, 320^\circ \end{aligned}$$

Для анализа СГК третьего порядка, с учетом их фазовых соотношений, задаемся законом изменения потокоцепления, созданный током ЭФ каждой фазы трехфазной системы в виде:

$$\Psi_\lambda = \Psi_{1\lambda} \cos(\omega t + \varphi_{1\lambda}) + \Psi_{3\lambda} \cos(3\omega t + \varphi_{3\lambda}) \quad / 37/$$

Сохранив прежнюю аппроксимацию нелинейной характеристики ЭФ: с учетом /11/ и /12/ получим выражение для комплекса полной мощности для трехфазной системы

$$\dot{S}_{1\lambda} = P_{1\lambda} + jQ_{1\lambda} \quad \dot{S}_{3\lambda} = P_{3\lambda} + jQ_{3\lambda} \quad /38/$$

где

$$P_{1\lambda} = -\frac{1}{2} \omega \Psi_{1\lambda}^2 \left[\left(1 + \frac{3}{4} \Psi_{1\lambda}^2 + \frac{3}{2} \Psi_{3\lambda}^2 \right) \sin\left(\frac{1-1.2\pi}{9}\right) + \frac{3}{4} \Psi_{1\lambda} \Psi_{3\lambda} \sin(5\varphi_1 - \varphi_3) \right] \quad /39/$$

$$Q_{1a} = \frac{1}{2} \omega \Psi_{1a}^2 \left[(\alpha + \frac{3B}{4} \Psi_{1a}^2 + \frac{3B}{2} \Psi_{3a}^2) \cos(\frac{1-\lambda}{9} 2\pi) + \frac{3B}{4} \Psi_{1a}^2 \cos(3\psi_1 - \psi_3) \right] / 40 /$$

$$P_{3a} = \frac{3}{2} \omega \Psi_{3a} \left[(\alpha \Psi_{3a} + \frac{3B}{4} \Psi_{3a}^2 + \frac{3B}{2} \Psi_{1a}^2 \Psi_{3a}) \sin(\frac{1-\lambda}{3} 2\pi) + \frac{1}{4} B \Psi_{1a}^3 \sin(3\psi_1 - \psi_3) \right] / 41 /$$

$$Q_{3a} = \frac{3}{2} \omega \Psi_{3a} \left[(\alpha \Psi_{3a} + \frac{3B}{4} \Psi_{3a}^2 + \frac{3B}{2} \Psi_{1a}^2 \Psi_{3a}) \cos(\frac{1-\lambda}{3} 2\pi) + \frac{1}{4} B \Psi_{1a}^3 \cos(3\psi_1 - \psi_3) \right] / 42 /$$

Аналогично условиям преобразования энергии в однофазной цепи, для каждой трехфазной системы потребуем $P_{1a} < 0$ и $P_{3a} > 0$. Полученные алгебраические уравнения при совместном решении выражений /39/ и /40/, характеризуют стационарный режим СГК в трехфазной цепи.

$$36\Psi_{3a\lambda}^4 + 27\Psi_{3a\lambda}^2 \Psi_{1a\lambda}^2 + 9\Psi_{1a\lambda}^4 - 48N_{\lambda} \Psi_{3a\lambda}^2 - 24N_{\lambda} \Psi_{1a\lambda}^2 + 16N_{\lambda} [K_{\lambda}^2 + 1] = 0 /43/$$

Из анализа /43/ следует, что для существования СГК третьего порядка в трехфазной цепи необходимо чтобы выполнялось условие

$$\Delta_{\lambda} < 0 /44/$$

где Δ_{λ} - большой дискриминант.

Уравнения кривых II-порядка /43/ описывают действительные эллипсы, находящиеся в первом квадранте системы координат Ψ_{3a}^2 и Ψ_{1a}^2 . Определены координаты центров, длины полуосей эллипсов, а также область существования СГК по входному воздействию

$$\Delta \Psi_{3a\lambda}^2 = \Psi_{3a\lambda\max}^2 - \Psi_{3a\lambda\min}^2 = \frac{16}{21} N_{\lambda} \sqrt{1 - 7K_{\lambda}^2} /45/$$

На рис. 4 построены эллипсы, соответствующие варианту сдвига фаз 0° , 40° , 80° . В работе приведены таблицы значений коэффициентов N_{λ} и K_{λ} , уравнения, определяющие область существования СГК в трехфазной цепи в зависимости от параметров цепи и по входному воздействию для различных вариантов сдвигов фаз. В работе также изучено влияние начальных условий на характер возбуждения СГК в трехфазных системах с помощью ЭВМ. В этой же главе анализируется возбуждение СГК второго порядка в двухфазном ЭФМЦ. Электрическая схема представляет собой два идентичных феррорезонансных контура, состоящих из встречно-соединенных нелинейных индуктивностей и последовательно соединенных конденсаторов. Вторичные обмотки нелинейных индуктивностей соединены согласно - последовательно и подключаются к источнику постоянного тока.

На базе такой схемы создан двухфазный делитель частоты на два рис.5. Получены уравнения, характеризующие установившийся режим СГК второго порядка в цепи относительно квадратов магнит-

15 -

-ных потоков основной $\Psi_{ам}^2$, субгармонической $\Psi_{им}^2$ и постоянных Ψ_0^2 составляющих.

Четвертая глава диссертационной работы посвящена экспериментальным исследованиям возбуждения СГК второго и третьего порядков в однофазных, двухфазных и трехфазных ЭФМЦ с подмагничиванием и без него, состоящих из последовательно соединенных нелинейных индуктивностей и конденсаторов. Экспериментальные исследования показывают, что СГК третьего порядка возбуждаются "жестко" после коммутационных процессов, а СГК второго порядка возбуждаются "мягко" в основном за счет подмагничивания.

Возбуждение СГК в таких цепях в основном зависит от начальных условий, параметров цепи и входного воздействия. В частности, возбуждение СГК третьего порядка в трехфазных системах влечет за собой скачкообразное изменение токов и напряжений фазных, линейных и нейтральных проводах с нарушением симметрии.

В симметричных трехфазных системах СГК третьего порядка могут возникнуть в трех вариантах сдвигов фаз и образуют 9 сочетаний несимметричных векторов, отличающихся фазовыми сдвигами и порядком следования фаз.

В работе приводятся экспериментальные данные, характеризующие область существования СГК второго и третьего порядков в однофазной ЭФМЦ в зависимости от параметров цепи, входного напряжения и тока подмагничивания, а также осциллограммы кривых токов и напряжений для исследованных схем.

Полученные результаты экспериментальных исследований сравниваются с расчетными данными теоретического анализа. В этой главе также приведены экспериментальные данные и инженерная методика расчета двухфазного делителя частоты в два раза с самоподмагничиванием.

Двухфазный делитель частоты на два с самоподмагничиванием обеспечивает двухфазный симметричный выход пониженной частоты рис. 7, который широко используется в качестве источника нестандартной частоты в системах автоматики, телекоммуникации, релейной защиты и т.д.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

I. Теоретически и экспериментально исследованы основные закономерности возбуждения и поддержания СГК второго и третьего порядков в однофазных, двухфазных и трехфазных ЭФМЦ, характери-

-зующие преобразующие свойства и энергетические показатели этих цепей.

2. Предложен и обоснован энергетический метод, определяющий обмен энергией в режиме возбуждения колебаний на спектре частот. Он позволяет установить качественную картину электромагнитных процессов в ЭФМЦ с частотообразующими свойствами.

3. Основные законы поведения АП - цепей при возбуждении колебаний на частоте субгармонике изучены с позиции фазовых состояний. В частности, показано, что СГК третьего порядка в трехфазной системе могут возникать в трех вариантах сдвига фаз отличающихся на $2\pi/9$, $4\pi/9$, $8\pi/9$.

4. Выполнен анализ установившихся режимов СГК второго и третьего порядка с учетом энергетических соотношений, определяющих условия возбуждения и существования АПК на этих частотах в зависимости от параметров цепей и приложенного воздействия.

5. На основе теоретических расчетов предложен инженерный вариант расчета конкретных частотообразующих устройств и приборов. Практическая проверка модели показала хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных.

6. Новизна и перспективность теоретических положений, разработанных в диссертации, подтверждено новым техническим решением ферромагнитного делителя частоты с улучшенными энергетическими характеристиками и функциональными возможностями.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Элементы синтеза нелинейных четырехполюсников с частотообразующими свойствами. " Электромагнитные и полупроводниковые устройства автоматики " Сб. науч. трудов ТашПИ, Ташкент, 1984 (в соавторстве с КАРИМОВЫМ А.С.).
2. Частотно-энергетический подход к анализу ферромагнитных делителей частоты. Сб. научн. трудов ТашПИ, Ташкент, 1986 (с. - 127-131) (в соавторстве с ИБАДУЛЛАЕВЫМ М.).
3. Частотно-энергетический принцип в применении к анализу установившегося процесса в ферромагнитном делителе частоты. Изв. ВУЗов СССР, "Энергетика", 1987, № 5, с 45-48 (в соавторстве с Каримовым А.С. и Ибадуллаевым М.).

4. Применение частотно-энергетических соотношений для анализа субгармонических колебаний в трехфазных электроферромагнитных цепях. Тезисы I-Всесоюзной конференции по теоретической электротехнике ч. II. - Ташкент, 1987, с. 73 (в соавторстве с Ибадуллаевым М.).

5. Энергетический подход анализа установившегося режима СГК второго порядка в электроферромагнитных цепях. Изв. ВУЗов СССР " Энергетика ", 1988, № 6, с. 38-40 (в соавторстве с Каримовым А.С. и Ибадуллаевым М.).

6. Анализ установившегося режима СГК третьего порядка в трехфазных ЭФМЦ. Устройства автоматики и преобразовательной техники. Сб. науч. трудов ТашПИ, Ташкент, 1988, с. 4-10.

7. Ферромагнитный делитель частоты на два. А.С. СССР № 1467703// Б.И., 1989, № II (в соавторстве с Каримовым А.С. Ибадуллаевым М. и Абдулгеевым Б.).

8. Анализ процесса деления частоты в ЭФМЦ с использованием энергетических соотношений. Тезисы докладов научно-теоретической и технической конференции профессоров, преподавателей и научных работников ТашПИ, посвященной 60-летию образования ТашПИ, ч. I, Ташкент, 1989, с. 106 (в соавторстве с Ибадуллаевым М.).

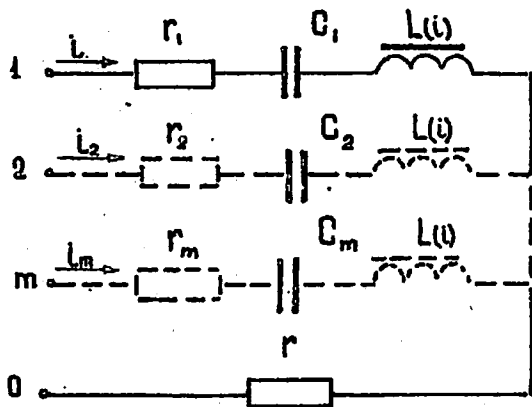


Рис. 1.

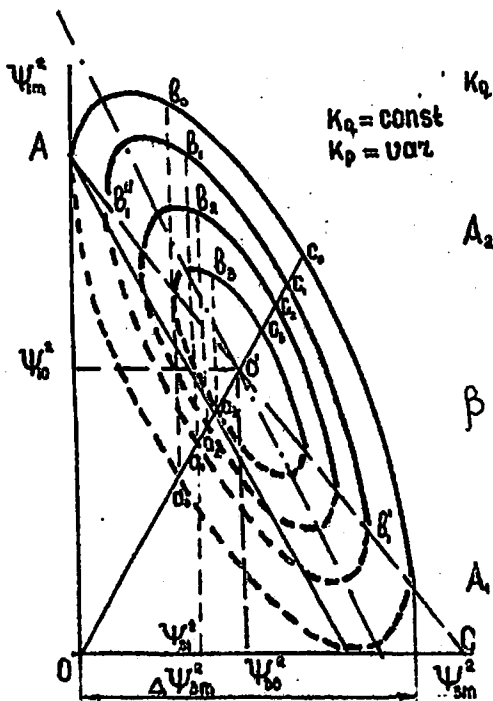


Рис. 2.

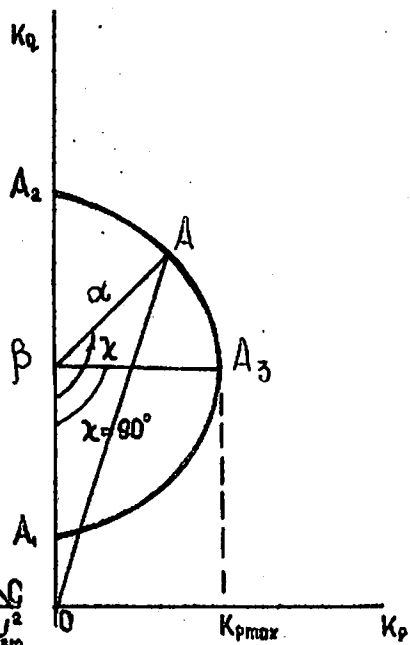


Рис. 3.

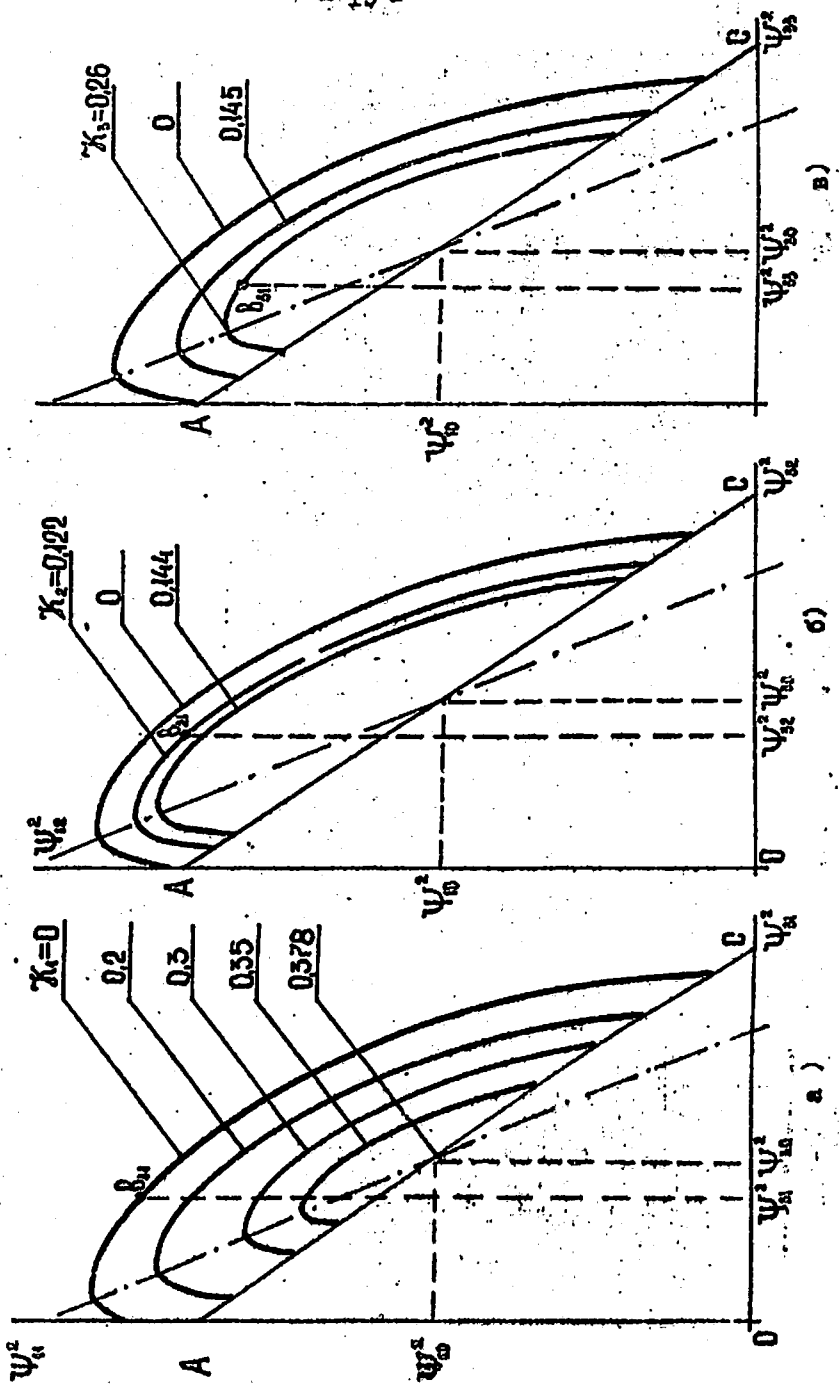


FIG. 4.

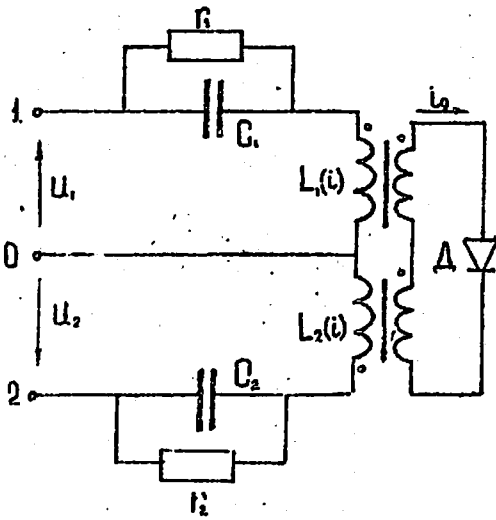


Рис. 5.

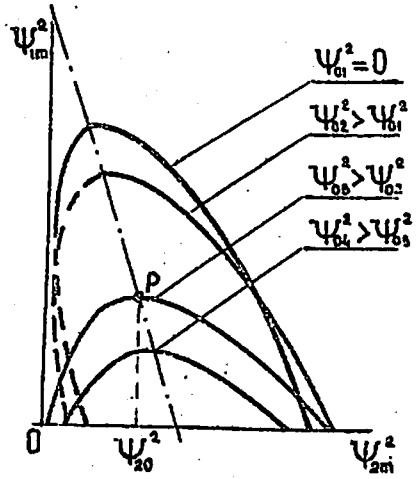


Рис. 6.

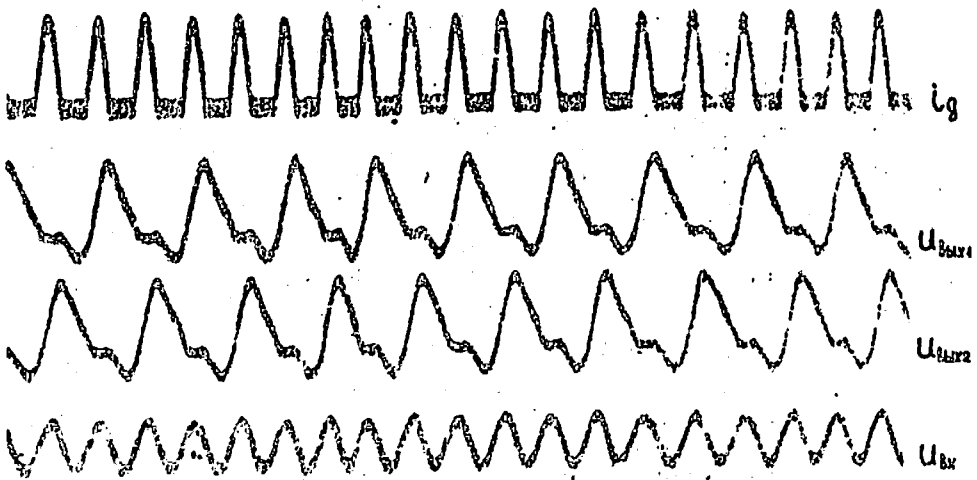


Рис. 7.