

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ БССР

Белорусский ордена Трудового Красного Знамени
политехнический институт

В. Н. Горбарук

АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ФЕРРОРЕЗОНАНСНЫХ ЦЕПЕЙ
НА ЗАДАННЫЙ ЗАКОН ИЗМЕНЕНИЯ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

(05. 276 - теоретические основы электротехники)

Диссертация на русском языке.

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Минск 1972

Работа выполнена на кафедре теоретической и общей электротехники Белорусского ордена Трудового Красного Знамени политехнического института.

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент В.М.БЛАДЫКО.

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, профессор В.В.ЯСИНСКИЙ
Кандидат технических наук, доцент В.М.ИЛЬИН

Ведущее предприятие – научно-исследовательский институт Автоматики и электромеханики при Томском орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени политехническом институте.

Автореферат разослан _____ 1972 г.

Защита состоится 3 ноября 1972 г.
на заседании Совета по присуждению ученых степеней по энергетическим специальностям при Белорусском ордена Трудового Красного Знамени политехническом институте.

Отзыв (в 2-х экземплярах) просим направлять по адресу: 220027. Минск, Ленинский проспект 65, БПИ, ученому секретарю Совета по энергетическим специальностям.

Дата защиты будет объявлена в газете "Вечерний Минск".

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СОВЕТА

К.Т.Н.

Л.Л.ЧЕРВИНСКИЙ

Одной из первоочередных задач текущего пятилетия является повышение эффективности общественного производства на базе широкой механизации, замены тяжелого ручного труда машинным, завершения комплексной механизации важнейших производственных процессов в промышленности, строительстве, сельском хозяйстве и на транспорте.

Технический прогресс, повышение производительности труда невозможны без создания новых приборов, аппаратов, электротехнических устройств, систем автоматики и управления, в которых широко используются нелинейные свойства ферромагнитных материалов. Очень часто в этих устройствах нелинейные индуктивности применяются в сочетании с линейными емкостями.

Чтобы наиболее полно использовать свойства нелинейных элементов, получить лучшие характеристики различных электротехнических устройств, создаваемых на базе таких элементов, производить более качественное их проектирование, необходимо иметь простые и достаточно точные инженерные методы расчета электрических цепей, содержащих нелинейные элементы.

Усилиями целого ряда ученых были созданы разнообразные методы расчета нелинейных цепей. В первую очередь следует упомянуть о выдающихся заслугах таких советских ученых, как Андронов А.А., Бессонов Л.А., Боголюбов В.Е., Боголюбов Н.Н., Витт А.А., Крылов Н.Н., Ляпунов А.М., Малкин А.В., Папалекси Н.Д., Поливанов К.М., Фельдбаум А.А., а также других советских и зарубежных ученых.

В данной работе, в отличие от применяемых на практике методов расчета, предложен простой способ определения параметров феррорезонансных цепей, обеспечивающих заданный закон изменения магнитной индукции, которая определяет, как известно, выходные параметры ряда электротехнических устройств (феррорезонансные стабилизаторы, умножители и делители частоты, демагнетизаторы, использование пониженной частоты для неразрушающих методов контроля и др.). Задача расчета сводится непосредственно к определению параметров феррорезонансной цепи по заранее заданному гармоническому составу магнитной индукции. Таким образом решаемая задача близка к задаче синтеза нелинейных электрических

цепей. С целью проверки расчетных режимов на устойчивость были составлены уравнения в вариациях, которые затем сводились к известному уравнению Хилла.

Работа состоит из введения, четырех глав и двух приложений. Все результаты и положения, полученные аналитическим расчетом, сопоставляются с экспериментальными данными. Ряд вопросов решается при помощи аналоговых и цифровых вычислительных машин, а также разработанной на кафедре ТОЭ БПИ установки для анализа гармоник напряжения (АГН).

В первой главе приведен краткий обзор работ, посвященных расчету электрических цепей, содержащих нелинейные элементы, и приводится классификация существующих методов расчета.

Дается краткое описание следующих трех групп методов исследования и расчета нелинейных цепей:

- 1) Графические методы
- 2) Аналитические методы
- 3) Графо-аналитические методы

Графические методы расчета обладают простотой и наглядностью, дают возможность сравнительно легко учитывать гистерезис, позволяют исследовать явления преобразования переменного тока в постоянный и наоборот, эффект усиления мощности и т.д. Однако им свойственны существенные недостатки. Точность расчета зависит от навыков и опыта исследователя. Эти методы не позволяют исследовать резонансные явления на высших, низших и дробных гармониках. Ограниченное применение они находят и при расчете сложных электрических цепей.

Основным преимуществом аналитических методов по сравнению с графическими является то, что они дают возможность анализировать задачу в общем виде, а не при определенных значениях параметров.

Общим недостатком этих методов является необходимость аппроксимации кривой намагничивания, что всегда связано с погрешностями. Кроме того, решение полученной системы нелинейных дифференциальных уравнений представляет большие трудности.

При проектировании электротехнических устройств с заданными

режимами работы возникает потребность определения границ возникновения и существования колебаний, а так же установления связи параметров этих колебаний с характеристиками рассматриваемых цепей. Наиболее полно удовлетворить требованиям, которые ставятся при расчете конкретного электротехнического устройства, можно только с помощью синтеза этих устройств. И хотя в настоящее время синтезу уделяется большое внимание и имеется ряд работ, посвященных этому вопросу, желаемых результатов еще не достигнуто и главным образом из-за больших трудностей, обусловленных нелинейностью таких цепей.

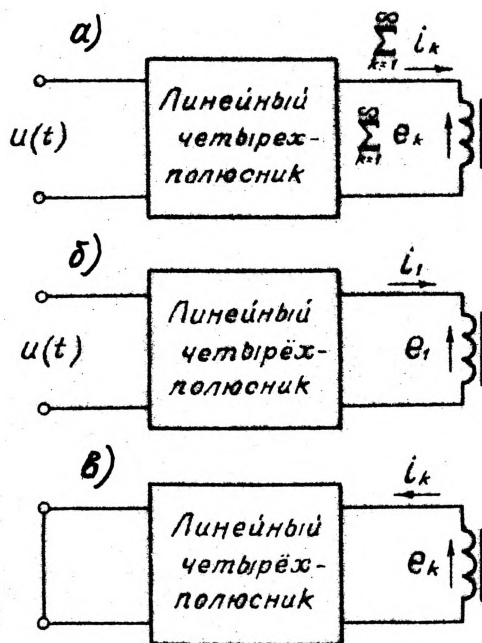


Рис. I.

- а) Схема электрической цепи с одной нелинейной индуктивностью
- б) Схема замещения цепи для первых гармоник
- в) Схема замещения цепи для высших и низших гармоник.

Расчет многих электротехнических устройств может быть сведен в общем случае к расчету электрической цепи, содержащей одну нелинейную индуктивность. Согласно же принципу компенсации, нелинейная индуктивность может быть заменена суммой генераторов э.д.с. гармоник разных частот и для каждой гармоники э.д.с. может быть составлена эквивалентная схема расчета (Рис. Iб, Iв)

Полное сопротивление линейной части схемы замещения и магнитная проницаемость для k -тых гармоник, выраженные в относительных единицах, связаны соотношением

$$Z_k = \frac{E_k}{I_k} = -j k \frac{B_{km}}{H_{km}} = -j k \mu_k. \quad (I)$$

Уравнение (I) позволяет установить связь между параметрами линейной части цепи и величиной гармоник индукции и напряженности и, таким образом, определить параметры схемы, обеспечивающие заданный закон изменения магнитной индукции.

Взаимосвязь амплитуд и фаз гармоник и субгармоник магнитной индукции и напряженности магнитного поля при расчете устанавливается с помощью гармонического анализа и метода гармонического баланса, а оценка устойчивости расчетных режимов и гармонический анализ кривых выходных величин с помощью разложения решения в ряд Тейлора по малому параметру. Этим вопросам посвящены последующие главы диссертации.

Вторая глава начинается с выбора основных базисных величин B_s, H_s , зависящих от коэффициентов аппроксимации кривой намагничивания, в качестве которой принято выражение гиперболического синуса.

$$H_s = \alpha \operatorname{sh} \beta B_s, \quad (2)$$

где α и β — коэффициенты, определяемые по кривой намагничивания сердечника.

Данная функция достаточно точно отражает кривую намагничивания, пригодна для расчета цепей как постоянного, так и переменного тока. Кроме того, она приводит при расчете к табулированным гиперболическим функциям и функциям Бесселя от мнимого аргумента.

Основные базисные величины определяются коэффициентами аппроксимации.

$$B_0 = \frac{1}{\beta} (\text{ТЛ}); \quad H_0 = \alpha \text{ (а/м)}.$$

Выражение кривой намагничивания в относительных единицах записывается в виде:

$$H = sh B. \quad (3)$$

В качестве базисной частоты принимается наименьшая частота спектра гармоник

$$f_0 = f_{10}; \quad \omega_0 = \omega_{10}.$$

Остальные базисные величины получают из этих основных величин и выражаются следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} \text{магнитный поток} - \Phi_0 &= B_0 S; \\ \text{потокосцепление} - \Psi_0 &= B_0 S W; \\ \text{магнитная проницаемость} - \mu_0 &= \frac{B_0}{H_0}; \\ \text{напряжение} - U_0 &= \omega_0 \Psi_0; \\ \text{ток} - I_0 &= \frac{H_0 \ell}{W}; \\ \text{индуктивность} - L_0 &= \frac{W^2}{\ell} \mu_0; \\ \text{сопротивление} - X_0 &= \omega_0 L_0; \\ \text{емкость} - C_0 &= \frac{1}{\omega_0 X_0}. \end{aligned}$$

Соотношения между относительными величинами для K-той гармоники определяются следующими выражениями:

$$\begin{aligned} \dot{B}_{km} &= \dot{\Phi}_{km} = \dot{\Psi}_{km}; & \dot{E}_{km} &= -jk \dot{B}_{km}; \\ U_{km} &= jk \dot{B}_{km}; & I_{km} &= H_{km}; \\ f_k &= \omega_k = k; & X_{kL} &= k L_k; & X_{kC} &= \frac{1}{k C_k}. \end{aligned}$$

Использование системы относительных величин упрощает взаимосвязь между электрическими и магнитными характеристиками нелинейной индуктивности и позволяет исключить из уравнений величины, характеризующие геометрию стального сердечника, сорт стали, число витков обмоток и т.д.

Все расчеты в работе выполнены в относительных единицах с использованием аппроксимирующей функции гиперболического синуса.

Далее в этой главе произведен расчет последовательной феррорезонансной цепи без учета гистерезиса в режимах возбуждения

второй и третьей гармоник, а также третьей субгармоники и получены формулы, позволяющие определить параметры феррорезонансной цепи, обеспечивающие заданный спектр гармоник индукции.

С целью правильного выбора решения исходного уравнения для расчетной схемы было составлено дифференциальное уравнение

$$\frac{d^2\psi}{dt^2} + lR + \frac{1}{C} \int i dt + U_0 = u(t), \quad (4)$$

которое затем было подробно исследовано на аналоговой вычислительной машине. В результате исследований установлено, что в последовательной феррорезонансной цепи, кроме высших гармоник, возможно возбуждение субгармоник, в частности второй субгармоники. Установлено так же, что вторая гармоника и вторая субгармоника более легко возбуждаются в феррорезонансных цепях, содержащих катушки со стальными сердечниками, имеющие петлю гистерезиса близкую к прямоугольной.

Реализуемость расчетных режимов проверена во всех случаях расчетом на устойчивость. Для этой цели дифференциальное уравнение схемы в каждом из расчетных режимов сводилось к уравнению в вариациях

$$\frac{d^2\varepsilon}{dt^2} + k \frac{d\varepsilon}{dt} + F(t)\varepsilon = 0. \quad (5)$$

Это уравнение в свою очередь путем преобразований и разложения известной функции $F(t)$ в ряд Фурье, коэффициенты которого пропорциональны функциям Бесселя от мнимого аргумента, сводилось к уравнениям Хилла вида

$$\frac{d^2x}{dt^2} + (a_0 + 2 \sum_{n=1,3,5}^{\infty} a_n s \sin nt + 2 \sum_{n=2,4,6}^{\infty} a_n c \cos nt) x = 0 \quad (6)$$

в случае возбуждения второй гармоники;

$$\frac{d^2x}{dt^2} + (a_0 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos nt) x = 0 \quad (7)$$

в случае возбуждения третьей гармоники и третьей субгармоники и

$$\frac{d^2x}{dt^2} + [a_0 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(2nt - \nu)] x = 0 \quad (8)$$

в случае феррорезонансного делителя частоты в три раза.

Результаты проведенных экспериментальных проверок удовлетворительно согласуются с расчетными данными. Погрешность во всех случаях не превышает 15%.

Показано, что наличие двух идентичных последовательных феррорезонансных цепей позволяет создать удвоитель частоты без подмагничивания со сравнительно небольшим отклонением формы выходного напряжения от синусоидальной. С помощью же трех одинаковых феррорезонансных контуров можно производить преобразование однофазного переменного тока в трехфазный пониженной частоты на основе субгармонического деления частоты. Форма кривой выходного напряжения практически синусоидальна. При этом параметры цепи зависят от выбранного спектра магнитной индукции.

Третья глава посвящена исследованию и расчету двухконтурной феррорезонансной схемы. Для этой цели двухконтурная схема (рис. 2) была описана системой дифференциальных уравнений

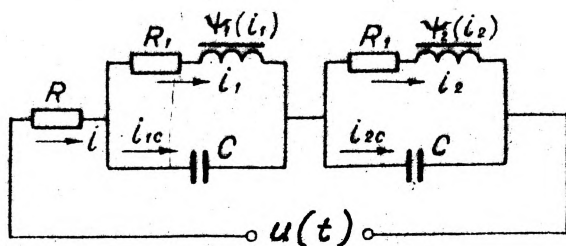


Рис. 2. Схема двухконтурной феррорезонансной цепи.

$$\frac{dB_1}{dt} = -\frac{R_1 l}{W^2 S} H_1 + \frac{1}{WS} U_{c1}; \quad (9)$$

$$\frac{dB_2}{dt} = -\frac{R_2 l}{W^2 S} H_2 + \frac{1}{WS} U_{c2}; \quad (10)$$

$$i = u(t) - \frac{R_1 l}{RW} H_1 - \frac{R_2 l}{RW} H_2 - \frac{WS}{R} \frac{dB_1}{dt} - \frac{WS}{R} \frac{dB_2}{dt}; \quad (11)$$

$$U_{c1} = \frac{1}{C} \int i dt - \frac{l}{WC} \int H_1 dt; \quad (12)$$

$$U_{c2} = \frac{1}{C} \int i dt - \frac{l}{WC} \int H_2 dt. \quad (13)$$

- Здесь R - сопротивление, учитывающее сопротивление соединительных проводов и контактов;
- R_1 - сопротивление, учитывающее потери в меди и стали нелинейных дросселей;
- l - длина средней силовой линии сердечника нелинейного дросселя;
- W - число витков нелинейного дросселя.

Исследование двухконтурной феррорезонансной схемы проводится с целью выяснения возможности использования ее в качестве феррорезонансных преобразователей частоты без подмагничивания (умножители и делители частоты в два раза).

Блок-схема математической модели исследуемой схемы изображена на Рис.3.

На схеме (Рис.3) контакты K_1-K_3 служат для задания начальных условий и создания переходного режима, а коэффициенты при переменных величинах зависят только от конструктивных параметров, выбранных масштабов переменных величин и начальных условий.

В результате исследования на аналоговой вычислительной машине МНБ было установлено, что субгармонические колебания второго порядка могут возбуждаться при наличии толчка тока, который может быть создан наличием достаточно большого постоянного напряжения на конденсаторах, если индукция в сердечниках в момент включения будет равна нулю. Однако при наличии остаточной индукции в сердечниках (порядка 0,6 - 1 тл.) субгармоника возбуждается и без начального заряда на конденсаторах. Причем наиболее легко она возбуждается в случае, если остаточная индукция в сердечниках имеет разные знаки, что в действительности наблюдается очень часто, т.к. в момент переходного процесса при установлении свободных колебаний, амплитуды их имеют разные знаки.

Было установлено так же, что фаза субгармонического колебания зависит от знака начальных условий (знака остаточных индукций) и фазы входного напряжения.

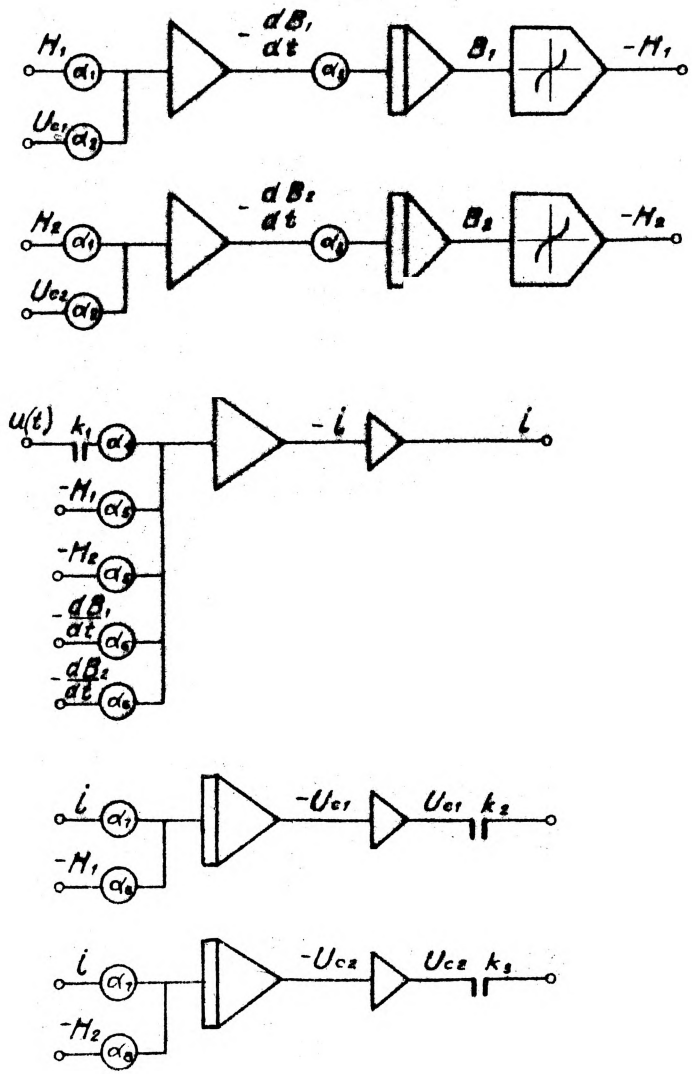


Рис.3. Блок-схема математической модели двухконтурной феррорезонансной схемы.

Наиболее легко возбуждается вторая субгармоника при начальной фазе входного напряжения равной 0. Это объясняется тем, что в этот момент индукция имеет максимальное значение, которое суммируется с величиной остаточной индукции. При значении индукции, близкой к ее значению в области насыщения, происходит возбуждение субгармоник. Постоянная составляющая в индукции каждого сердечника имеет один и тот же знак. Поэтому в сумме индукций она удваивается, а в разности исчезает.

Далее в этой главе приводится методика расчета двухконтурной феррорезонансной схемы (Рис.2) в режиме возбуждения второй гармоники и субгармоники.

Решение дифференциального уравнения исходной схемы, записанного в относительных единицах:

$$C \frac{d^2 B_k}{dt^2} = -sh B_k \cdot ch(B, \sin t) \quad (14)$$

в режиме возбуждения второй гармоники ищется в виде:

$$B_k = B_0 + B_2 \cos 2t, \quad (15)$$

где B_k - разность амплитуд магнитных индукций сердечников в относительных единицах;

B_1 - амплитуда индукции основной частоты в относительных единицах;

B_0 - постоянная составляющая магнитной индукции;

B_2 - амплитуда индукции второй гармоники.

Подстановка уравнения (15) в (14) и последующее разложение sh и ch в ряд Фурье, коэффициентами которого являются функции Бесселя от мнимого аргумента, после преобразований приводит к следующим соотношениям:

$$th B_0 = \frac{2 J_{12} J_{21}}{J_{02} J_{01} + 2 J_{22} J_{41}}; \quad (16)$$

$$C = \frac{ch B_0 (J_{12} J_{01} + J_{12} J_{41}) - sh B_0 (J_{02} J_{21} + J_{22} J_{21})}{2 B} \quad (17)$$

Формулы (I6) и (I7) позволяют определить постоянную составляющую магнитной индукции и относительное значение емкости C , при которых возбуждается вторая гармоника.

В уравнениях (I6) и (I7)

$$J_{01} = J_0(jB_1); J_{02} = J_0(jB_2); J_{12} = -j J_1(jB_2)$$

и т.д. - функции Бесселя от мнимого аргумента.

По уравнению (I7) были построены кривые зависимости емкости (в относительных единицах) от величины второй гармоники индукции для различных значений первой гармоники индукции.

В режиме возбуждения второй субгармоники решение уравнения (I4) ищется в виде

$$B_k = B_1 \cos t. \quad (I8)$$

где

B_k - разность индукций сердечников в относительных единицах;
 B_1 - относительное значение индукции второй субгармоники.

Выражение для определения емкости, обеспечивающей возбуждение заданного значения второй субгармоники, в этом случае имеет вид:

$$C = \frac{2 [J_{02} J_{11} - J_{22} (J_{31} + J_{33})]}{B_1} \quad (I9)$$

По уравнению (I9) были построены зависимость напряжения второй субгармоники ($U = f(C)$) при постоянном входном напряжении ($U = \text{const}$) и зависимость напряжения второй субгармоники от входного напряжения ($U_2 = f(U)$) при постоянной емкости ($C = \text{const}$). Проведенная экспериментальная проверка показала хорошее совпадение расчетных кривых с опытными.

В обоих случаях получены соотношения, позволяющие определять устойчивость периодических решений.

Исследования этой схемы (Рис.2) показали, что при встречном включении вторичных обмоток нелинейных дросселей она может быть использована для создания умножителя и делителя частоты в два раза с формой выходного напряжения, как видно из осциллограмм, приведенных в диссертации, близкой к синусоидальной.

В четвертой главе приводится расчет феррорезонансного ста-

Осилителя напряжения (ФСН) в режиме холостого хода и в случае активной нагрузки, когда форма выходного напряжения близка к синусоидальной.

В режиме холостого хода, если пренебречь потерями в элементах схемы, индукцию насыщенного дросселя в относительных единицах можно записать в виде

$$B = B_1 \sin t - B_3 \sin 3t \quad (20)$$

Разлагая sAB в ряд Фурье получим следующие выражения для первой и третьей гармоник напряженности

$$H_1 = 2 \left[J_{11} J_{03} + (J_{21} + J_{41}) J_{13} + J_{51} J_{23} \right]; \quad (21)$$

$$H_3 = -2 \left[J_{01} J_{13} + (J_{03} + J_{23}) J_{31} + (J_{13} + J_{33}) J_{51} \right],$$

где

$$J_{01} = J_0(jB_1); \quad J_{11} = -j J_1(jB_1);$$

$$J_{03} = J_0(jB); \quad J_{13} = -j J_1(jB_3)$$

и т.д. -

функция Бесселя от мнимого аргумента.

Полная проводимость линейной части схемы замещения стабилизатора (Лурье А.Г. Теория феррорезонансных стабилизаторов напряжения. ГЭИ, 1958) может быть записана в виде:

$$Y = j \left(3 - \frac{1}{3K_p} \right) C, \quad (22)$$

где $K_p = LC$ - коэффициент резонанса.

Используя выражения (21) и (22), а также соотношение $Y_3 = -H_3 / j3B_3$ получим формулу, позволяющую определить величину емкости ФСН при заданных значениях первой и третьей гармоник индукции

$$C = \frac{2 \left[J_{01} J_{13} + J_{31} (J_{03} + J_{23}) \right]}{3 B_3} \quad (23)$$

где $J_{01} J_{13}$ и т.д. - коэффициенты функций Бесселя от мнимого аргумента

B_3 - индукция третьей гармоники в относительные единицах;
 Q - коэффициент, равный $9 - \frac{1}{k_p}$

Произведен также расчет ФСН в нагрузочном режиме. В этом случае закон изменения магнитной индукции насыщенного дросселя с учетом третьей гармоники определяется выражением:

$$B = B_1 \sin t + B_3 \sin(3t + \psi_3) \quad (24)$$

Тогда из уравнения (3) можно получить для первой и третьей гармоник напряженности магнитного поля:

$$\begin{aligned} H_1 &= 2(\dot{J}_{11} \dot{J}_{03} - \dot{J}_{21} \dot{J}_{13} - \dot{J}_{41} \dot{J}_{13} + \dot{J}_{51} \dot{J}_{23}) \\ H_3 &= 2(\dot{J}_{01} \dot{J}_{13} - \dot{J}_{31} \dot{J}_{03} - \dot{J}_{31} \dot{J}_{23} + \dot{J}_{41} \dot{J}_{13}). \end{aligned} \quad (25)$$

где $\dot{J}_{kp} = J_{kp} \cdot \exp(jk\psi_p)$.

Записав выражения для комплексной проводимости и комплексного удельного магнитного сопротивления для третьих гармоник получим уравнение

$$g_3 + j\beta_3 = j \frac{2}{3} \cdot \frac{(\dot{J}_{01} \dot{J}_{13} - \dot{J}_{31} \dot{J}_{23} - \dot{J}_{31} \dot{J}_{03} + \dot{J}_{41} \dot{J}_{13})}{B_3}. \quad (26)$$

позволяющее для заданных значений B_1 и B_3 определить численными методами угол сдвига ψ_3 и по первому уравнению (25) вычислить H_1 .

Далее в данной главе приводится инженерный способ расчета высших гармоник в электрической цепи с одним нелинейным элементом.

Применение этого метода в сочетании с методом итераций позволяет сравнительно просто производить расчет нелинейной электрической цепи при любом заданном числе высших гармоник.

Кривая намагничивания также аппроксимируется выражением гиперболического синуса, а закон изменения магнитной индукции записывается в виде:

$$B = B_1 + \sum B_k \quad (27)$$

где $B_1 = B_{1m} \cos(t + \psi_1)$;

$$\sum B_k = \sum_{k=3,5,7}^{\infty} B_{km} \cos(kt + \psi_k).$$

После подстановки решения (27) в уравнение (3) и последующих преобразований получим выражение для напряженности магнитного поля

$$H = \sum_{k=1,3,5}^{\infty} A_{km} \cos(kt + \varphi_k) + \quad (28)$$

$$+ \sum_{k=3,5,7}^{\infty} B_{km} \cos(kt + \varphi_k) \cdot D_0 + \sum_{k=2,4,6}^{\infty} D_{km} \cos(kt + \theta_k)$$

Из последнего соотношения можно выделить выражения для отдельных гармоник напряженности магнитного поля, совместное решение которых и замена \dot{M}_k на $-jk B_k \dot{Y}_k$ (Y_k - проводимость схемы k -той гармоники со стороны нелинейного элемента при коротком замыкании первичных зажимов) позволяет получить систему уравнений для определения отдельных гармоник магнитной индукции

$$\dot{B}_3 = \frac{-A_3}{D_0 + j3 Y_3};$$

$$\dot{B}_5 = \frac{-A_5 - \frac{1}{2} \dot{B}_3 D_2}{D_0 + j5 Y_5};$$

$$\dot{B}_7 = \frac{-A_7 - \frac{1}{2} (\dot{B}_3 D_4 + \dot{B}_5 D_2)}{D_0 + j7 Y_7};$$

$$\dot{B}_9 = \frac{-A_9 - \frac{1}{2} (\dot{B}_3 D_6 + \dot{B}_5 D_4 + \dot{B}_7 D_2)}{D_0 + j9 Y_9}.$$

где коэффициенты A_k и D_k выражаются через коэффициенты функций Бесселя от мнимого аргумента k -ого порядка, а величина D_1 для целого ряда устройств (преобразователи частоты, ФСН) является величиной известной.

Предложенный способ расчета высших гармоник иллюстрируется на примере расчета ФСН с последующим сравнением расчетных и экспериментальных данных.

Основные выводы по диссертационной работе.

1. Предложена методика расчёта последовательной феррорезонансной схемы на заданный закон изменения магнитной индукции в режимах возбуждения второй и третьей гармоник, а также третьей субгармоники, т.е. решена задача, близкая к синтезу нелинейных цепей. Параметры цепи определяются в зависимости от заданных значений отдельных гармоник магнитной индукции.

2. Произведен расчёт этой цепи в данных режимах в последующей проверкой расчётных режимов на устойчивость. Результаты расчёта хорошо согласуются с экспериментальными данными.

3. На основании исследований на аналоговой вычислительной машине и физической модели указано на возможность создания на базе этой схемы, в отличие от существующих, феррорезонансного удвоителя частоты без подмагничивания.

4. Наличие трёх устойчивых фазовых состояний третьей субгармоники в последовательной феррорезонансной схеме позволило предложить схему преобразования однофазного переменного тока в трёхфазный пониженной частоты с практически синусоидальным выходным напряжением.

5. Произведено исследование двухконтурной феррорезонансной схемы. Было установлено, что в этой схеме кроме возбуждения нечетных гармоник возможно возбуждение второй гармоники и второй субгармоники.

6. Сделан аналитический расчёт двухконтурной феррорезонансной схемы на заданный закон изменения магнитной индукции в двух режимах:

- а) в режиме возбуждения второй гармоники;
- б) в режиме возбуждения второй субгармоники.

7. Проведенный с помощью АГН гармонический анализ показал, что предлагаемая методика расчёта феррорезонансных цепей, даёт вполне достаточную точность. Погрешность расчёта не превышает 15%, а в некоторых случаях (при сравнительно малом сопротивлении обмоток) не превышает 8%.

8. Анализ двухконтурной феррорезонансной цепи показал, что на базе этой схемы можно создать умножитель и делитель частоты

в два раза без подмагничивания с формой кривой выходного напряжения, близкой к синусоидальной.

9. Показано, что предлагаемая методика расчёта феррорезонансных цепей пригодна также для расчёта других электрических цепей с одним нелинейным элементом. В качестве примера произведен расчёт феррорезонансного стабилизатора напряжения.

10. Разработана установка для анализа гармоник напряжения, позволяющая измерить амплитуды и фазы гармоник на частотах $50 + 400$ гц, а также на частоте $16^{2/3}$ и 25 гц.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Бладыко В.М., Горбарук В.Н., Мазуренко А.А. Аналитический расчёт феррорезонансной цепи в режиме возбуждения второй гармоники. "Известия вузов СССР - Энергетика", № 3, 1966 г.

2. Бладыко В.М., Горбарук В.Н. Аналитический расчёт последовательной феррорезонансной цепи в режиме возбуждения третьей субгармоники. "Известия вузов СССР - Энергетика", № 3, 1970 г.

3. Бладыко В.М., Горбарук В.Н. Аналитический расчёт делителя частоты в три раза на заданный режим работы. Труды VII научно-технической конференции "Статические преобразователи автоматике и электроприводе" Из-во ТГУ, Томск, 1971.

4. Горбарук В.Н. Трёхфазный делитель частоты. Материалы XXVI научно-технической конференции Белорусского политехнического института совместно с работниками промышленности. Минск, 1970.

5. Горбарук В.Н. Аналитический расчёт делителя частоты в три раза на заданный режим работы. Труды IV Всесоюзной конференции по теории и методам расчёта нелинейных электрических цепей и систем. Ташкент, 1971.

6. Бладыко В.М., Горбарук В.Н., Мазуренко А.А. Преобразование однофазного переменного тока в трёхфазный пониженной частоты. "Известия вузов СССР - Энергетика", № 12, 1971.

7. Бладыко В.М., Горбарук В.Н., Мазуренко А.А. Возбуждение второй гармоники в двухконтурной феррорезонансной схеме. "Из-

вестия вузов СССР - Энергетика", №3, 1967.

8. Бладыко В.М., Горбарук В.Н. Расчёт высших гармоник в электрических цепях со сталью с одним нелинейным элементом. "Известия вузов СССР - Энергетика", № 8, 1971.

Результаты работы были доложены:

1. На IV Всесоюзной конференции по теории и методам расчёта нелинейных электрических цепей и систем, Ташкент, 1971.

2. На УП научно-технической конференции "Статические преобразователи в автоматике и электроприводе", Томск, 1971.

3. На ежегодных научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава Белорусского политехнического института совместно с работниками промышленности в 1966-1967, 1970-1972 гг. и в отчетах по НИР.