

На правах рукописи

Сахно Людмила Ивановна

ТЕОРИЯ, РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ НОВЫХ ЭКОНОМИЧНЫХ
ДВУХМОСТОВЫХ СВАРОЧНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ С МНОГООБМОТОЧНЫМИ
ТРАНСФОРМАТОРАМИ

Специальность 05.09.01 – Электромеханика и электрические аппараты.

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Санкт – Петербург – 2006

Работа выполнена в ОАО “Институт сварки России”.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,
профессор
Богуславский Илья Зеликович;

доктор технических наук,
профессор
Коровкин Николай Владимирович;

заслуженный деятель науки и техники РФ,
доктор технических наук,
профессор
Васильев Александр Сергеевич.

Ведущая организация:

ГУП “Всероссийский электротехнический институт”
(г. Москва).

Защита состоится “22” декабря 2006 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.11 при Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования “Санкт-Петербургский государственный политехнический университет” по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, Главное здание, ауд.284.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО “Санкт-Петербургский государственный политехнический университет”.

Автореферат разослан “ “ ноября 2006 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
канд. техн. наук, доцент

Попов М.Г.

Общая характеристика работы

Актуальность темы и проблем исследования. Рынок сварочной техники и технологии является неотъемлемой частью мировой рыночной системы. К настоящему времени этот рынок составляет не менее 40 млрд долларов США, из которых 30 % приходится на сварочное оборудование. Лидирующее положение на мировом рынке сварочного оборудования стабильно занимает оборудование для дуговой сварки (45 –47 %), причем предполагается, что доля его и дальше будет возрастать. В связи с этим источники питания для дуговой сварки в настоящее время являются одним из наиболее динамично развивающихся видов оборудования.

В диссертационной работе рассматриваются неуправляемые сварочные выпрямители с номинальными токами в диапазоне от 40 А до 300 А. Эти выпрямители широко представлены на рынке сварочного оборудования постоянного тока благодаря сравнительно низкой стоимости, высокой надежности работы в жестких условиях эксплуатации и высокой ремонтоспособности. Практически все фирмы, занимающиеся производством сварочного оборудования, имеют в номенклатуре своих изделий неуправляемые сварочные выпрямители. На международных выставках сварочного оборудования, проходивших в г. Санкт-Петербурге за последние 10 лет, они составляли не менее 20% представленного оборудования. В связи с этим постоянно ведутся работы в направлении совершенствования сварочных выпрямителей. К этим направлениям относятся улучшение качества активных материалов, полупроводниковых элементов и компьютеризация управления источником питания. По-прежнему актуальной остается проблема снижения массы источников питания из-за неуклонного роста стоимости активных материалов. Ещё одна проблема связана с необходимостью снижения тока, потребляемого из сети при сварке, поскольку возросло количество малых предприятий и отдельных потребителей, использующих при сварке питание от бытовых сетей.

Исследования, проведенные автором настоящей работы совместно с группой сотрудников ИС России по заказам предприятий, занимающихся производством сварочного оборудования, показали, что перспективным направлением уменьшения массы и электропотребления неуправляемых сварочных выпрямителей является использование двухмостовых выпрямителей. Эти выпрямители имеют два диодных моста, на входы которых подаются разные напряжения от двух вторичных обмоток одного трансформатора, а выходы мостов подключены параллельно дуговому промежутку. Один мост двухмостового выпрямителя служит для зажигания и частичного обеспечения рабочего тока дуги, а другой, имеющий пониженное напряжение холостого хода по сравнению с первым, – для обеспечения основной части рабочего тока выпрямителя. Это запатентованное техническое решение позволяет снизить на 20-40% массу сварочного выпрямителя с одновременным снижением электропотребления на 25-30% и создать новый класс неуправляемых сварочных двухмостовых выпрямителей. Они могут питаться от однофазной, двухфазной или трехфазной сети, иметь различные способы регулирования сварочного тока, различные схемы выпрямления и виды статических внешних характеристик. Области применения двухмостовых сварочных выпрямителей также как и традиционных, весьма разнообразны. Они могут применяться для ручной дуговой сварки покрытыми штучными электродами, аргонодуговой и плазменной сварки вольфрамовым электродом, сварки сжатой дугой, механизированной сварки под флюсом и других. В зависимости от ряда показателей сварочного процесса (тип электрода, характер среды, в которой происходит сварка, степени механизации и способа регулирования режима дуги) выпрямитель может иметь пологопадающую или крутопадающую внешнюю характеристику. Возможно создание двухмостовых сварочных выпрямителей, сочетающих в себе оба вида этих внешних характеристик (универсальные сварочные выпрямители). Существенное уменьшение массы, а следовательно, и стоимости двухмостовых сварочных выпря-

мителей по сравнению с традиционными наряду с сохранением высокой надёжности их работы, повышает конкурентоспособность неуправляемых сварочных выпрямителей и создает хорошие перспективы для их производства и продажи. Актуальность проблемы уменьшения массы и электропотребления сварочного оборудования подтверждается анализом материалов международных и отечественных выставок сварочного оборудования и конференций, посвященных вопросам разработки нового сварочного оборудования.

Целью диссертационной работы является создание теории новых экономичных двухмостовых сварочных выпрямителей, которая включает методы расчета электромагнитных процессов во всех элементах этих выпрямителей и экспериментальное исследование устойчивости горения электрической дуги в них. Эта теория необходима для научно обоснованного поиска электрических схем выпрямления, конструкций трансформаторов, разработки теоретических основ расчета и проектирования двухмостовых сварочных выпрямителей.

Научная новизна. В диссертационной работе:

- разработан новый класс неуправляемых сварочных выпрямителей - двухмостовые сварочные выпрямители, - которые отличаются от традиционных сварочных выпрямителей уменьшением электропотребления на 25-30% и уменьшением массы до 40% при питании от однофазной сети и до 25% при питании от трехфазной сети,
- показано, что двухмостовые сварочные выпрямители имеют переменный коэффициент трансформации по току и переменное внутреннее эквивалентное сопротивление, зависящие от тока нагрузки,
- введено понятие дополнительной ЭДС в трансформаторе, использование которого позволяет просто и наглядно объяснить влияние конструкции трансформатора на статическую внешнюю характеристику двухмостового сварочного выпрямителя,
- получена новая схема замещения трехобмоточного трансформатора, которая содержит новые элементы – индуктивно связанные катушки и зависимые ЭДС, необходимые для анализа дополнительных ЭДС в трансформаторе,
- проведено сравнение новой схемы замещения трехобмоточного трансформатора и известной трехлучевой схемы, на основании которого получено, что коэффициент взаимной индукции вторичных обмоток трансформатора по потокам рассеяния новой схемы замещения, приведенный к первичной стороне, равен параметру L_1 трехлучевой схемы замещения,
- получены уравнения многообмоточных трансформаторов, которые в явном виде содержат выражения для дополнительных ЭДС в трансформаторе, и соответствующие этим уравнениям схемы замещения многообмоточных трансформаторов, не содержащие дополнительных идеальных трансформаторов, но позволяющие воспроизводить при расчете любые сложные соединения вторичных обмоток и анализировать влияние конструкции трансформатора на внешнюю характеристику двухмостового сварочного выпрямителя,
- даны способы измерения параметров схем замещения многообмоточных трансформаторов, предложенных в диссертационной работе,
 - теоретически и экспериментально показано, что электрическое соединение вторичных обмоток трансформатора, к которым подключены мосты двухмостового сварочного выпрямителя увеличивает устойчивость горения дуги по сравнению с отсутствием такого соединения,
 - разработаны конструкции однофазных и трехфазных трансформаторов, обеспечивающих крутопадающую статическую внешнюю характеристику двухмостового сварочного выпрямителя,
 - определены диапазоны изменения номинальных сварочных токов, в которых целесообразно применять разработанные конструкции трансформаторов.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

- разработана методика расчета электромагнитных процессов в двухмостовых сварочных выпрямителях, которая необходима для создания этих выпрямителей,

- предложенные в диссертационной работе схемы замещения однофазных и трехфазных многообмоточных трансформаторов могут использоваться при разработке преобразовательных трансформаторов с вторичными обмотками, имеющими между собой сложные соединения,
- созданы и испытаны опытные образцы однофазных двухмостовых сварочных выпрямителей с номинальными токами 100 А, 120 А и 200 А с продолжительностью нагрузки (ПН) 20%,
- на основе теории, разработанной в диссертации, созданы и успешно эксплуатируются партии однофазных двухмостовых сварочных выпрямителей ВД-80 (номинальный ток $I_H = 80$ А, продолжительность нагрузки ПН=20%), ВД-130 ($I_H = 130$ А, ПН=60%) и трехфазный двухмостовой сварочный выпрямитель ВД-300 ($I_H = 300$ А, ПН=40%).

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Теория двухмостовых сварочных выпрямителей, включающая разработку и исследование электрических схем и конструкций однофазных и трехфазных трансформаторов таких выпрямителей.
2. Свойства двухмостовых сварочных выпрямителей, отличающие их от традиционных двухмостовых выпрямителей, – уменьшение электропотребления и массы, зависимость коэффициента трансформации по току и внутреннего эквивалентного сопротивления от тока нагрузки.
3. Анализ параметров двухмостового сварочного выпрямителя, влияющих на устойчивость горения дуги.
4. Способы получения крутопадающих статических внешних характеристик двухмостовых выпрямителей.
5. Уравнения и новые схемы замещения многообмоточных трансформаторов, содержащие новые параметры – коэффициенты взаимной индукции по потокам рассеяния и по основному потоку и коэффициенты при зависимых ЭДС.
6. Экспериментальные способы определения параметров новых схем замещения многообмоточных трансформаторов.
7. Методика расчета электромагнитных процессов в двухмостовых сварочных выпрямителях.
8. Обоснование выбора конструкции трансформатора для определенного диапазона изменения номинального сварочного тока.

Достоверность теоретических результатов подтверждается:

- совпадением расчетных и экспериментальных значений первичных токов и форм статических внешних характеристик выпрямителей,
- совпадением расчетных и экспериментальных осциллограмм выпрямленных токов в опытных образцах выпрямителей с различными конструкциями трансформаторов.

Объект исследования – двухмостовые сварочные выпрямители, включая их статические внешние характеристики и рабочие режимы.

Предмет исследования – электромагнитные процессы в многообмоточных трансформаторах, схемы замещения трансформаторов, расчетное и экспериментальное определение их параметров.

Методы исследования - базируются на использовании общей теории трансформаторов, численных методов расчета электромагнитных полей и электрических цепей, а также на методах измерения электромагнитных параметров электротехнических устройств.

Апробация работы. - Основные положения диссертации докладывались на следующих конференциях: на международных научно-технических конференциях “Современные проблемы и достижения в области сварки, родственных технологий и оборудования” (г. Санкт-Петербург, 1992, 1995, 2000, 2002), на семинаре “Прогрессивные технологические процессы и оборудование для сварочного производства” (г. Санкт –Петербург, 1994), на международной научно-технической конференции “Электротехнология XXI века” (г. Санкт-Петербург, 2001) на международных научно-технических конференциях “ Power and Electrical Engineer-

ing” (г.Рига, 2001, 2002), на научно-практической конференции “Состояние и проблемы отечественного трансформаторостроения” (г.Санкт-Петербург, 2001), на научном семинаре кафедры ТОЭ Санкт – Петербургского Политехнического университета (г. Санкт- Петербург, 2005), на заседании секции “Источники питания и системы автоматического управления сварочным оборудованием” межгосударственного совета по сварке и родственным технологиям (г.Санкт-Петербург, 2005).

Публикации. Основные результаты диссертационной работы изложены в 34 научных работах.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка используемой литературы. Общий объем диссертации – 318 страниц, 100 рисунков и 59 таблиц.

Краткое содержание работы.

Во **введении** дается краткая характеристика современного состояния рынка сварочной техники, обосновывается актуальность разработки экономичных неуправляемых двухмостовых сварочных выпрямителей, формулируются цель и задачи работы.

В **первой главе** излагается принцип работы и обосновываются преимущества новых двухмостовых сварочных выпрямителей, формулируются требования к неуправляемым сварочным выпрямителям для ручной дуговой сварки штучными электродами, дается классификация разработанных в диссертации схем и конструкций трансформаторов двухмостовых сварочных выпрямителей, рассматриваются вопросы создания двухмостовых сварочных выпрямителей.

Преимущества новых двухмостовых сварочных выпрямителей показаны на примере сравнения однофазного традиционного одномостового (рис.1а) и нового двухмостового (рис.1б) сварочных выпрямителей.

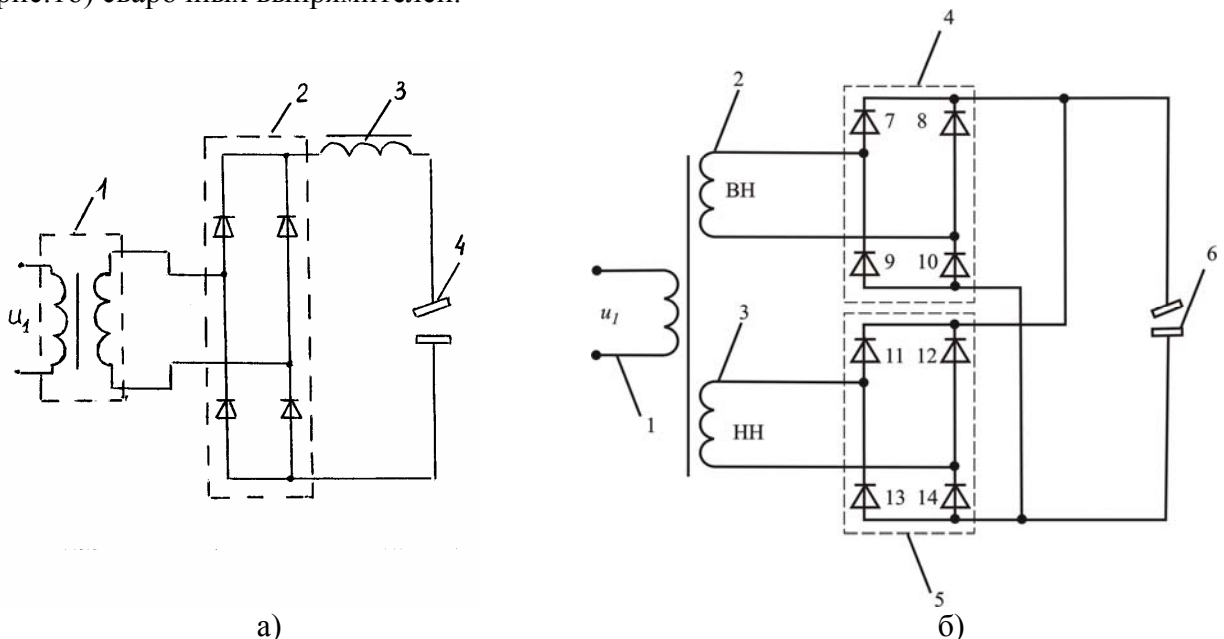


Рис.1. Электрическая схема однофазного традиционного одномостового (а) и нового двухмостового (б) сварочных выпрямителей.

В диссертации приведены некоторые сведения о традиционных сварочных выпрямителях для ручной дуговой сварки штучными электродами, которые необходимы для дальнейшего изложения. Электрическая схема традиционного одномостового сварочного выпрямителя (рис.1а) содержит двухобмоточный трансформатор 1, диодный мост 2, сглаживающий дроссель 3 и дуговой промежуток 4. Выпрямленный ток I_H является сварочным током выпрямителя. Выпрямленное напряжение U_H при некотором значении сварочного тока называют ус-

ловным рабочим напряжением на зажимах выпрямителя. При ручной дуговой сварке штучными электродами согласно требованиям стандартов рабочее напряжение U_H в вольтах и сварочный ток I_H в амперах связаны следующим соотношением $U_H = 20 + 0,04I_H$ (рис.2а, прямая 1). Точка пересечения статической внешней характеристики выпрямителя $U_H(I_H)$ (рис.2а, кривая 2) и прямой $U_H = 20 + 0,04I_H$ определяет рабочий ток I_P и условное рабочее напряжение U_P выпрямителя при сварке. Вводится понятие крутизны внешней характеристики выпрямителя, которая определяется отношением тока короткого замыкания I_{K3} выпрямителя к его рабочему току.

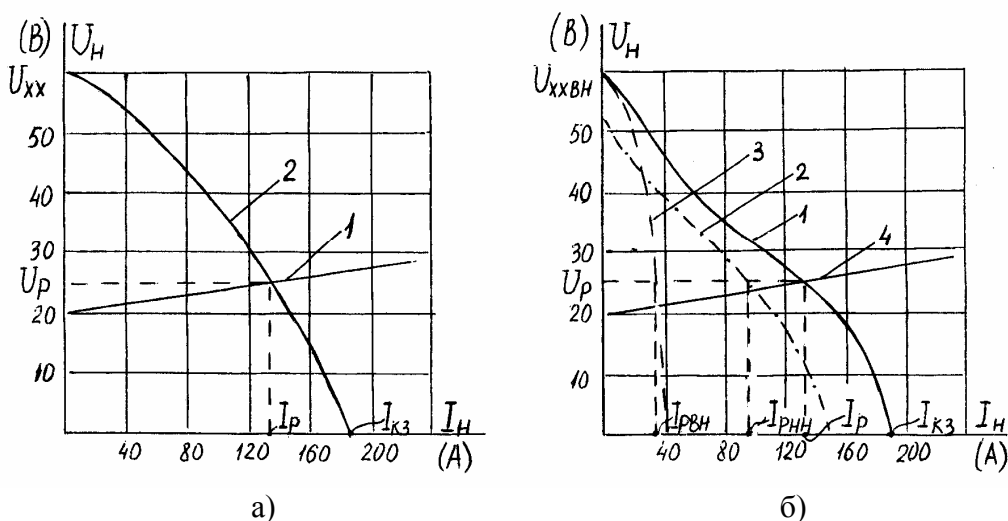


Рис.2. Внешние характеристики а) традиционного однофазового и б) нового двухфазового сварочных выпрямителей.

Основные требования, которые предъявляются как к традиционным, так и к новым двухфазовым неуправляемым сварочным выпрямителям для ручной дуговой сварки штучными электродами состоят в следующем:

- напряжение холостого хода выпрямителя составляет 60-80 В,
- статическая внешняя характеристика выпрямителя является крутопадающей, то есть $\frac{I_{K3}}{I_P} < 1,5$ (I_{K3} - среднее значение тока короткого замыкания, I_P - среднее значение рабочего тока выпрямителя),
- отношение минимального мгновенного значения тока сварки i_{min} (рис.3а) к его амплитудному значению I_m составляет не менее 10%.

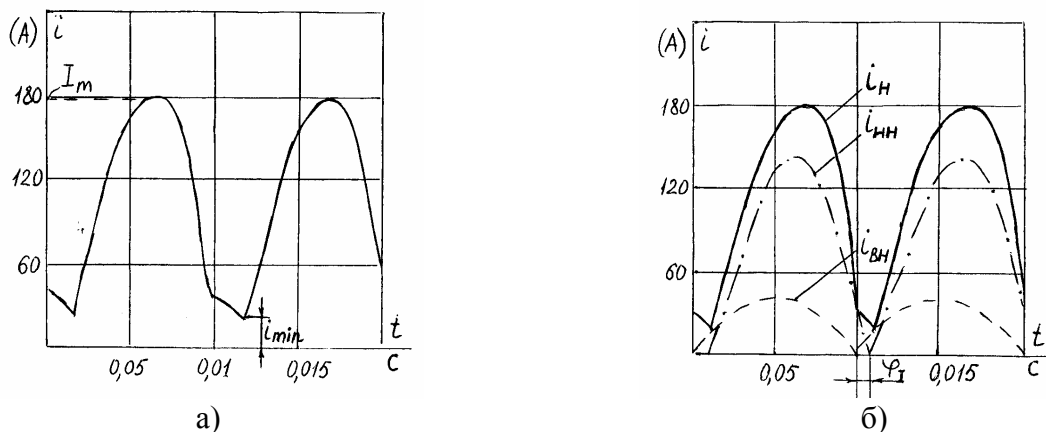


Рис.3. Осциллограммы выпрямленных токов а) традиционного однофазного и б) нового двухфазного сварочных выпрямителей.

В отличие от традиционного сварочного выпрямителя (рис.1а) новый двухфазный сварочный выпрямитель (рис.1б) содержит трехобмоточный трансформатор с первичной 1 и двумя вторичными обмотками 2 и 3. Обмотка 2 соединена с мостом 4, а обмотка 3 с мостом 5. Выходы мостов 4 и 5 параллельно подключены к дуговому промежутку 6. Напряжение холостого хода обмотки 2 равно 60 - 80 В, а напряжение холостого хода обмотки 3 приблизительно в 1.5 раза меньше. Обмотка 2 с мостом 4 служат для зажигания и поддержания устойчивого горения дуги, а обмотка 3 с мостом 5 для обеспечения основной части рабочего тока. Для удобства изложения целесообразно назвать обмотку 2 обмоткой высокого напряжения (ВН), а обмотку 3 - низкого напряжения (НН). Обмотку ВН с подключенным к ней мостом 4 назовем выпрямителем ВН, а обмотку НН с мостом 5 - выпрямителем НН.

При включении выпрямителя (зажигание дуги) ток начинает протекать по обмотке ВН и диодам 7, 10 и 8, 9 попеременно. Поскольку напряжение холостого хода обмотки ВН $U_{XXВН}$ больше напряжения холостого хода обмотки НН $U_{XXНН}$ и оно же устанавливается на выходе моста ВН, диоды 11, 12, 13, 14 моста НН большую часть периода не проводят ток. По мере увеличения тока в нагрузке (от зажигания дуги до её нормального горения) напряжение на выходе моста ВН снижается из-за значительного индуктивного сопротивления обмотки ВН и сравнивается с напряжением моста НН. После этого ток протекает весь период как по обмотке ВН, так и по обмотке НН. При этом в один из полупериодов ток проводят диоды 7, 10 и 11, 14, а в другой диоды 8, 9 и 12, 13. На рис.2б показаны статическая внешняя характеристика $U_H(I_H)$ (1) двухфазного сварочного выпрямителя, внешние характеристики выпрямителей НН $U_{НН}(I_{НН})$ (2) и ВН $U_{ВН}(I_{ВН})$ (3), полученные при их совместной работе для одного из разработанных двухфазных сварочных выпрямителей. Рабочий ток I_p складывается из рабочего тока выпрямителя ВН $I_{РВН}$ (рис.2б) и рабочего тока выпрямителя НН $I_{РНН}$. Осциллограммы выпрямленного тока (i_H) и выходных токов выпрямителей ВН ($i_{ВН}$) и НН ($i_{НН}$) показаны на рис.3б. Мгновенное значение выпрямленного тока в однофазном двухфазном сварочном выпрямителе не уменьшается до нуля за счет сдвига фаз токов $i_{ВН}$ и $i_{НН}$ выпрямителей ВН и НН.

Расчетная мощность трансформатора двухфазного сварочного выпрямителя при пренебрежении током холостого хода I_{XX} (он составляет не более 2,5 % рабочего тока) определяется формулой:

$$S_p = U_1 I_1 \approx |\dot{U}_{XXВН} \dot{I}_{РВН} + \dot{U}_{XXНН} \dot{I}_{РНН}|, \quad (1)$$

где U_1 и I_1 - действующие значения напряжения и тока первичной обмотки.

Эта мощность меньше расчетной мощности традиционного однофазного выпрямителя при $I_p \gg I_{XX}$:

$$S_p^* = U_1 I_1 \approx U_{XX} I_p, \quad (2)$$

где $U_{XX} = U_{XXВН}$ - напряжение холостого хода трансформатора однофазного выпрямителя, поскольку в двухфазном выпрямителе только часть рабочего тока потребляется от обмотки ВН с $U_{XXВН} = 60 - 80$ В, а основная часть - от обмотки НН с меньшим напряжением $U_{XXНН}$. Разница между значениями мощностей трансформатора, рассчитанных по формулам (1) и (2), зависит от соотношений напряжений холостого хода выпрямителей высокого и низкого напряжения и рабочих токов этих выпрямителей. Для примера на рис.4 даны зависимости отношения расчетных мощностей трансформаторов нового двухфазного и традиционного сварочных выпрямителей при $U_{XX} = U_{XXВН}$ от отношения напряжения холостого хода обмоток ВН и НН при сдвиге фаз токов в этих обмотках не более $\varphi_l = 5^\circ$. В этом случае

$$S_p \approx U_{XXВН} I_{РВН} + U_{XXНН} I_{РНН}, \quad (3)$$

где $U_{XXBH}, I_{PBH}, U_{XXHH}, I_{PHH}$ - действующие значения, поэтому:

$$\frac{S_p}{S_p^*} \approx \frac{I_{PBH}}{I_p} + \frac{U_{XXHH}}{U_{XXBH}} \frac{I_{PHH}}{I_p} \quad (4)$$

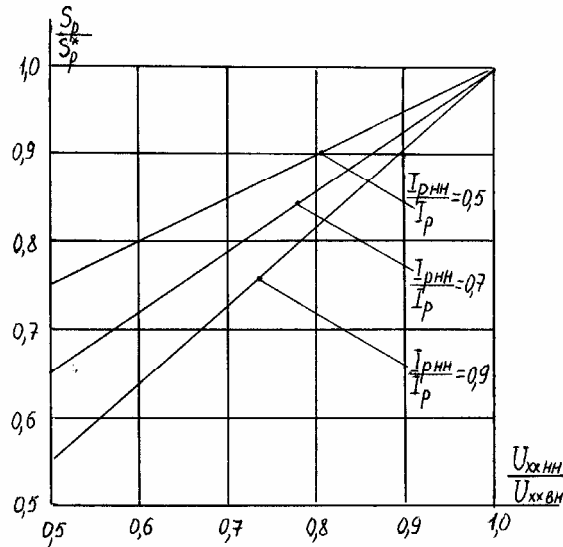


Рис. 4. Зависимость расчетной мощности трансформатора от параметров $\frac{U_{XXHH}}{U_{XXBH}}$ и $\frac{I_{PHH}}{I_p}$.

Из зависимостей на рис.4 видно, что, чем меньше значение напряжения XX обмотки НН, тем меньше мощность S_p трансформатора двухмостового выпрямителя по сравнению с мощностью S_p^* традиционного. Кроме того, мощность трансформатора двухмостового выпрямителя существенно зависит и от соотношения рабочих токов обмоток ВН и НН. Разница между расчетными мощностями традиционного и двухмостового выпрямителей может превышать 40 %. Уменьшение расчетной мощности трансформатора двухмостового выпрямителя по сравнению с мощностью трансформатора традиционного выпрямителя приводит к уменьшению массы выпрямителя. Кроме того, масса однофазного двухмостового выпрямителя сокращается за счет устранения из схемы сглаживающего дросселя, который обычно составляет до 30 % от массы трансформатора.

Однако параметры $\frac{U_{XXHH}}{U_{XXBH}}, \frac{I_{PHH}}{I_p}$, влияющие на расчетную мощность трансформатора, в значительной степени влияют и на условия зажигания и устойчивость горения дуги, поскольку они влияют на параметр $\frac{i_{\min}}{I_m}$ и вид внешней характеристики выпрямителя. Опыты

показали, что чем меньше значение параметра $\frac{U_{XXHH}}{U_{XXBH}}$ и больше $\frac{I_{PHH}}{I_p}$, то есть чем больше экономия электроэнергии, тем менее устойчиво горит дуга. На устойчивость горения дуги влияет и схема выпрямления.

В связи с этим определение электромагнитных параметров трансформаторов и выбор схемы выпрямления, которые с одной стороны обеспечивают снижение потребляемой мощности и массы по сравнению с традиционным, а с другой стороны, обеспечивают легкое зажигание и устойчивое горение дуги, являются основными задачами при создании двухмостовых сварочных выпрямителей. Для их решения необходимо:

- разработать специальные сварочные трансформаторы, обеспечивающие соответствующие электромагнитные параметры,

- исследовать различные варианты электрических схем однофазных и трехфазных двухмостовых сварочных выпрямителей,
- определить напряжение XX обмотки НН и соотношение между рабочими токами выпрямителей ВН и НН, при которых дуга горит устойчиво и легко зажигается,
- разработать методику расчета двухмостовых сварочных выпрямителей, которая позволяет проектировать оптимальные варианты выпрямителей с заданными номинальными данными.

Среди этих проблем наибольшую трудность вызывает поиск конструкций трансформаторов, электромагнитные параметры которых обеспечивают крутопадающую внешнюю характеристику выпрямителя. Эти трудности вызваны низким значением напряжения холостого хода обмотки низкого напряжения (40 - 45 В), особенно при увеличении номинального сварочного тока и взаимным влиянием токов вторичных обмоток. Получение крутопадающей внешней характеристики двухмостового сварочного выпрямителя явилось основным препятствием при осуществлении простой и ясной идеи питания сварочной дуги постоянного тока от двух обмоток с разными напряжениями холостого хода и разными рабочими токами. Попытки воплощения этой идеи имеются в ряде работ, однако проблема получения крутопадающих внешних характеристик в них не была решена, поэтому двухмостовые выпрямители не нашли применения на практике.

В диссертационной работе эта задача решена путем разработки специальных сварочных трансформаторов, в которых уменьшено взаимное влияние друг на друга вторичных обмоток трансформатора. На рис.5 представлена классификационная схема разработанных в диссертации конструкций трансформаторов, на которой указаны основные признаки классификации и основные типы трансформаторов. Из этой схемы видно, что разработаны шесть типов однофазных (рис.6) и два типа трехфазных трансформаторов (рис.7). Трансформаторы имеют три обмотки – первичную и две вторичные, к которым подключены мосты ВН и НН. Поскольку вторичные обмотки должны иметь разные напряжения холостого хода (XX), разные индуктивности рассеяния и, кроме того, токи, протекающие в них, должны быть сдвинуты по фазе, каждая из этих обмоток выполняется в виде двух секций (иногда более двух), имеющих разные напряжения XX и разные индуктивности рассеяния. Одна из секций каждой вторичной обмотки (секция ВНІ обмотки ВН и секция ННІ обмотки НН на рис.6,7) имеет повышенную индуктивность рассеяния. Для этого первичная обмотка и эта секция располагаются на разных стержнях магнитопровода или на одном стержне, но на некотором расстоянии друг от друга. Другие секции вторичных обмоток (ВНІІ и ННІІ на рис.6,7) располагаются поверх первичной обмотки и имеют существенно меньшие индуктивности рассеяния, чем секции ВНІ и ННІ. Они служат для получения требуемого напряжения XX обмоток ВН и НН. Если используется электрическая схема выпрямления с электрически соединенными вторичными обмотками, то в трансформаторе имеется дополнительная секция ВНН (общая для обмоток ВН и НН), которая располагается поверх секции ВНІ обмотки ВН. Секции ВНІ, ВНІІ и ВНН соединяются последовательно и согласно, также как и секции ННІ, ННІІ и ВНН. Каждую секцию вторичных обмоток трансформатора формально можно рассматривать как отдельную обмотку, поэтому трансформаторы двухмостовых сварочных выпрямителей являются многообмоточными. Каждый из трансформаторов на рис.6,7 предназначен для работы в определенном диапазоне изменения рабочего тока. Разнообразие конструкций однофазных трансформаторов обусловлено трудностями получения крутопадающей внешней характеристики двухмостового сварочного выпрямителя в широком диапазоне изменения номинальных сварочных токов. Для создания двухмостовых выпрямителей, в которые входят указанные конструкции трансформаторов, необходим расчет и анализ электромагнитных процессов во всех элементах выпрямителя. Исходными данными для расчета являются номинальный сварочный ток, диапазон и способ регулирования сварочного тока, продолжительность нагрузки выпрямителя (ПН), напряжения холостого хода обмоток. Для выполнения таких расчетов необходимы схемы замещения многообмоточных трансформаторов, представленных на рис.6,7.

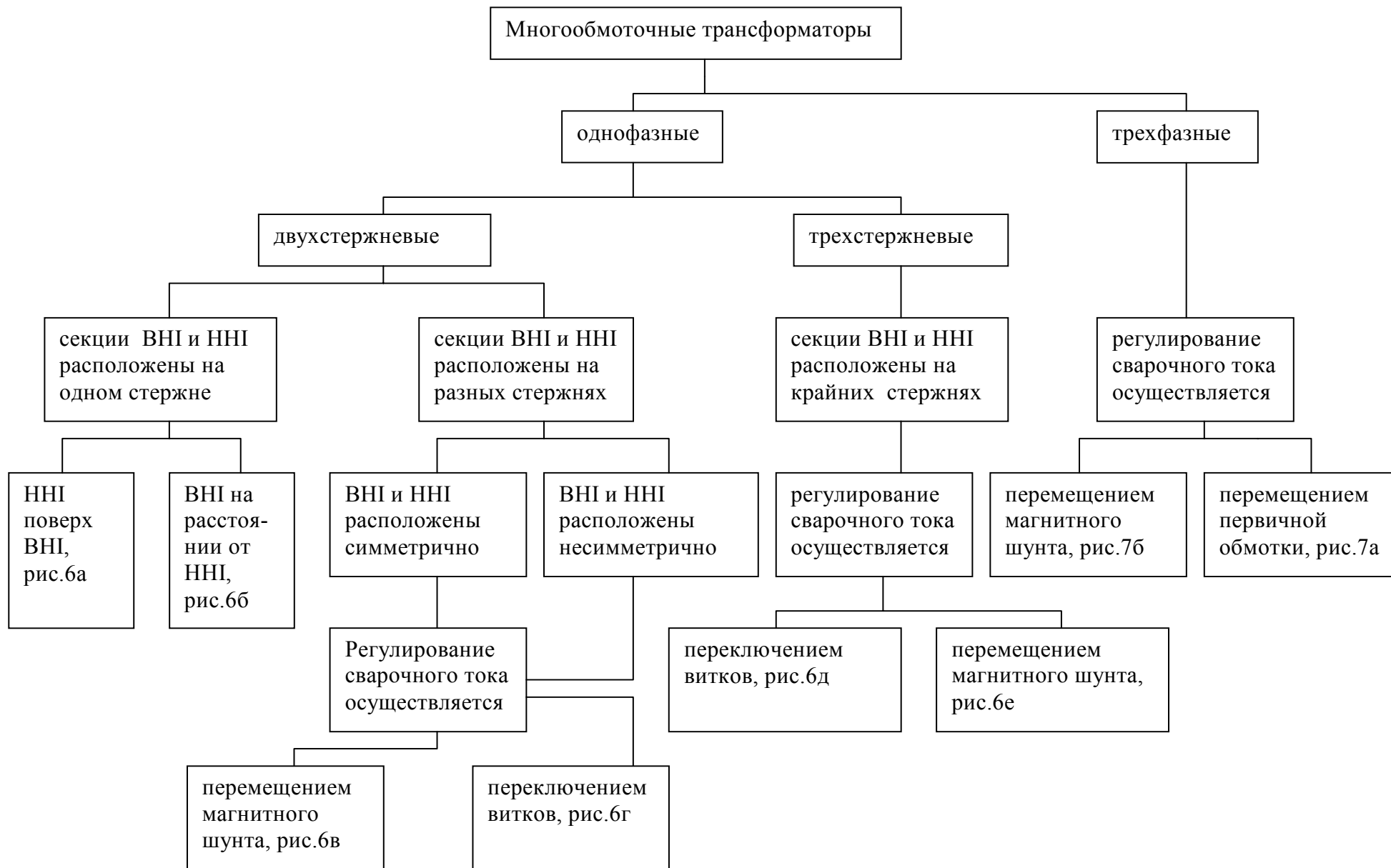


Рис.5. Классификация конструкций трансформаторов

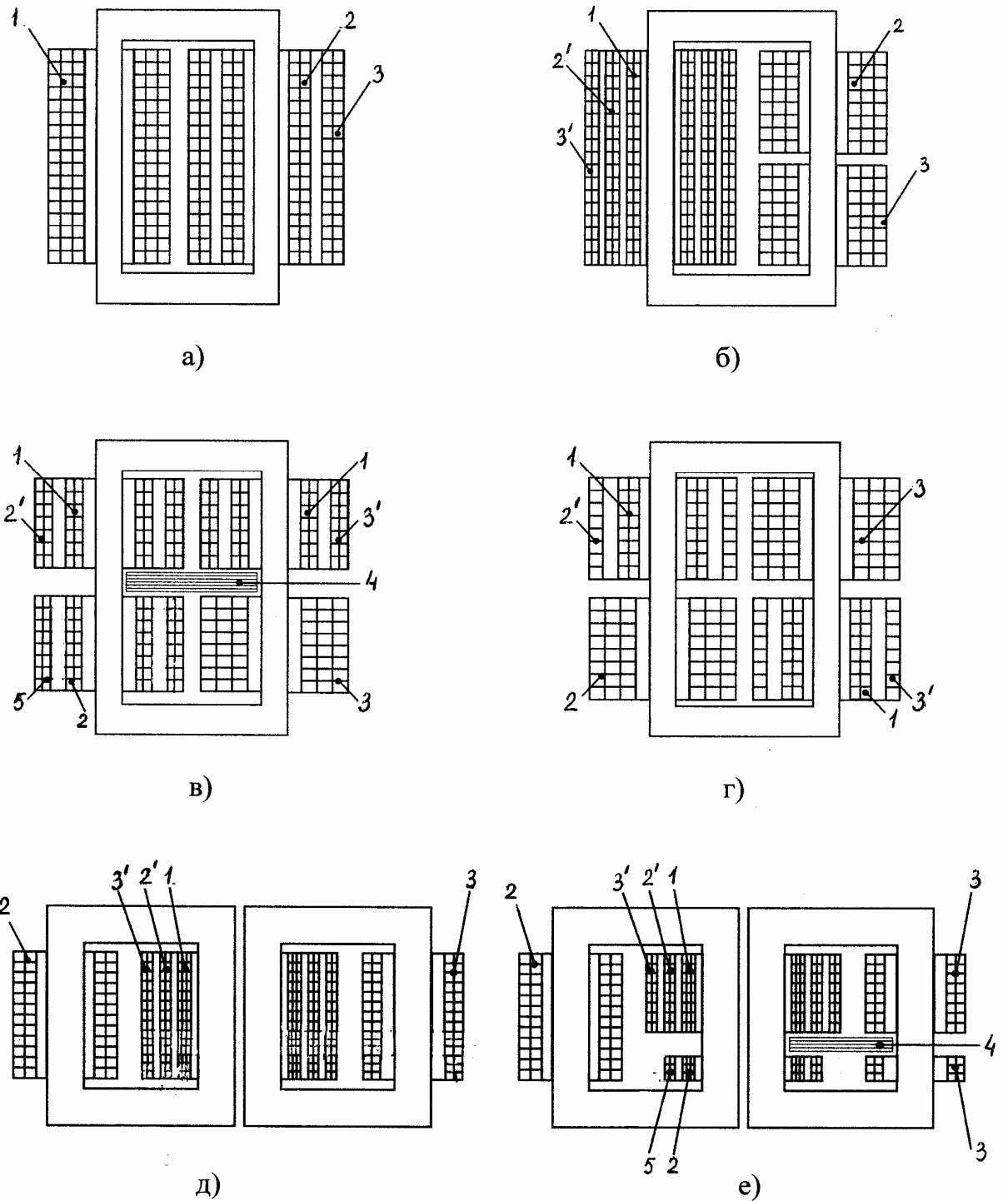


Рис.6. Конструкции однофазных трансформаторов.

1- первичная обмотка, 2 - секция ВНИ, 2' - секция ВНИ, 3 –секция ННИ, 3' - секция ННИ, 4 - магнитный шунт, 5- секция ВНИ, которая используется при электрическом соединении обмоток высокого и низкого напряжения.

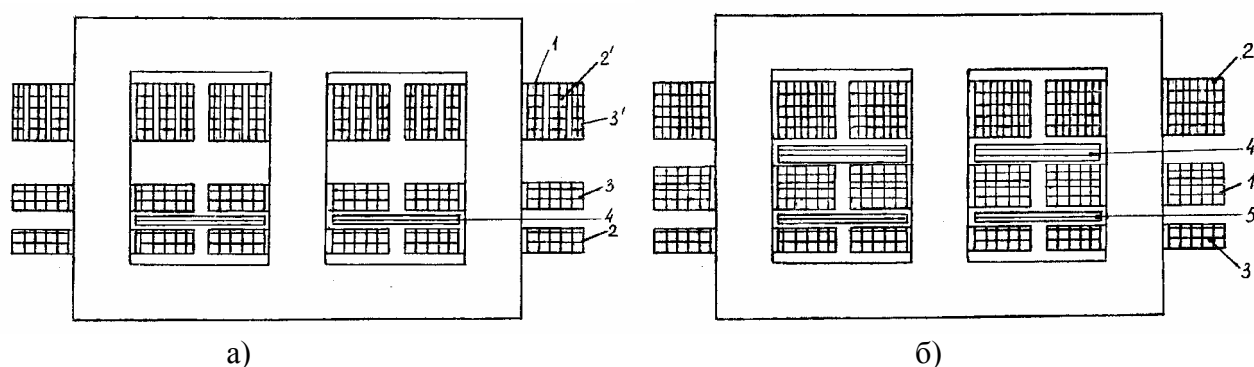


Рис.7. Конструкции трехфазных трансформаторов.

а) 1 – первичная обмотка, 2 - секция ВНІ, 2' - секция ВНІІ, 3 - секция ННІ, 3' - секция ННІІ, 4 - неподвижный магнитный шунт, 5 - подвижный магнитный шунт.

Во второй главе диссертации проводится анализ известных схем замещения многообмоточных трансформаторов без учета намагничивающего тока и разрабатываются новые схемы замещения таких трансформаторов для расчета двухмостовых сварочных выпрямителей.

Теория и вопросы практического применения схем замещения трансформаторов даны в работах Марквардта Е.Г., Петрова Г.Н., Иванова-Смоленского А.В., Костенко М.П., Пиотровского Л.М., Вольдека А.И., Пинцова А.М., Лейтеса Л.В., Лурье А.И., Горева А.А., Костенко М.В., Васютинского С.Б., Шакирова М.А., Александрова Г.Н. и других. Известные схемы замещения многообмоточных трансформаторов основаны на приведении уравнений трансформатора к первичной обмотке. Наиболее широко используется построенная таким образом схема замещения трехобмоточного трансформатора – трехлучевая звезда. Известны точные схемы замещения многообмоточных трансформаторов, представляющие собой многоугольники с непересекающимися диагоналями. Большое распространение получили приближенные древовидные схемы замещения, которые в отличие от точных схем имеют более простую структуру и не содержат замкнутых контуров, вызывающих определенные трудности при расчете. Однако известные схемы замещения практически не применимы для разработки конструкций трансформаторов двухмостовых сварочных выпрямителей из-за громоздкости получающихся формул и трудности их анализа. Кроме того, анализ электромагнитных процессов в сварочных трансформаторах с использованием этих схем усложняется в связи с необходимостью введения в схему замещения идеальных трансформаторов.

В диссертационной работе предлагаются схемы замещения многообмоточных трансформаторов, которые в отличие от известных схем позволяют при расчете воспроизводить любые сложные соединения вторичных обмоток без введения идеальных трансформаторов. Формулы для определения параметров схем замещения просты, что позволяет наглядно объяснять процессы в трансформаторе с целью поиска подходящей конструкции.

Для получения схемы замещения n -обмоточного трансформатора любой режим его работы представляется в виде наложения режимов работы $(n-1)$ -го двухобмоточного трансформатора, каждый из которых имеет первичную обмотку многообмоточного трансформатора и одну из его вторичных обмоток. Такое представление дает возможность воспользоваться классическими уравнениями двухобмоточного трансформатора и записать уравнения многообмоточного трансформатора в виде системы уравнений $(n-1)$ -ого порядка относительно неизвестных вторичных токов. Каждое уравнение этой системы является уравнением двухобмоточного трансформатора, параметры которого приведены к вторичной обмотке. Эти уравнения дополнены членами, обусловленными взаимным влиянием указанных двухобмоточных трансформаторов. С этой целью введено понятие дополнительной (по сравнению с ЭДС холостого хода трансформатора) ЭДС на разомкнутых зажимах каждой вторичной обмотки одного двухобмоточного трансформатора, вызванной протеканием тока по об-

моткам всех других двухобмоточных трансформаторов, заменяющих n - обмоточный трансформатор. В диссертации показано, что для составления схемы замещения многообмоточного трансформатора необходимо получить выражения для дополнительных ЭДС на разомкнутых зажимах вторичных обмоток в трехобмоточном трансформаторе. Эти выражения зависят от конструкции трансформатора. В диссертации получены выражения для дополнительных ЭДС трехобмоточных трансформаторов с обмотками 1, 2, 3 на рис.6, 7 которые входят в состав многообмоточных трансформаторов двухмостовых сварочных выпрямителей. Для получения этих выражений использовались результаты экспериментальных исследований.

Проиллюстрируем применение этого подхода на примере однофазных двухобмоточных трансформаторов на рис.8а, б (1-первичная обмотка, 2, 3 – вторичные обмотки), которые отличаются взаимным расположением секций первичных обмоток и вторичных обмоток. Секции первичной обмотки соединены последовательно и согласно. В соответствии с изложенным подходом для получения схемы замещения необходимо составить уравнение равновесия ЭДС на зажимах вторичной обмотки двухобмоточного трансформатора, в которое следует ввести выражение для дополнительной ЭДС, которая вызвана током, протекающим в другой вторичной обмотке. С целью получения этого выражения были проведены измерения ЭДС на разомкнутых зажимах обмотки 3 в опыте, схема которого показана на рис.9а.

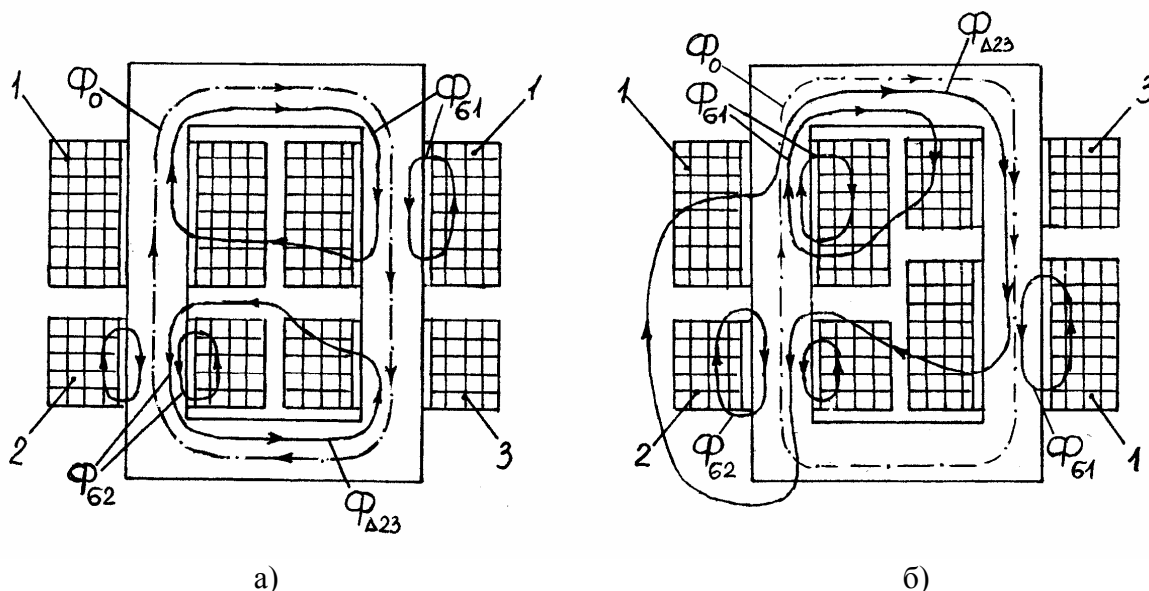


Рис.8. Магнитные потоки в трансформаторах: Φ_0 - основной магнитный поток, $\Phi_{\sigma 1}, \Phi_{\sigma 2}$ - магнитные потоки рассеяния, условно отнесенные к первичной и вторичным обмоткам, $\Phi_{\Delta 32}$ - дополнительный магнитный поток в разомкнутой обмотке 3 в режиме 1-2.

Результаты измерения представлены на рис.9б в виде зависимости отношения действующего значения ЭДС на разомкнутой обмотке 3 (E_3) при протекании тока в обмотке 2 к ЭДС ХХ этой обмотки при разомкнутой обмотке 2 ($E_{ХХ3}$) от действующего значения тока в обмотке 2 (I_2). Из этих зависимостей видно, что при прохождении тока по обмотке 2 ЭДС на зажимах разомкнутой обмотки 3 уменьшается по сравнению с $E_{ХХ3}$ для конструкции на рис.8а, и увеличивается для конструкции на рис.8б. Поскольку индуктивные сопротивления рассеяния обмоток исследуемых трансформаторов значительно больше их активных сопротивлений, можно предположить, что изменение напряжения на зажимах обмотки 3 в основном обусловлено дополнительным (по сравнению со случаем, когда она разомкнута) потоком, вызванным током в обмотке 2 и сцепляющимся с витками обмотки 3. На рис.8 показаны некоторые линии поля рассеяния этих трансформаторов, полученные численным методом. Для конструкции на рис.8а направление поля рассеяния, сцепляющегося с обмоткой 3, противоположно направлению основного магнитного поля, а для конструкции на рис.8б направления

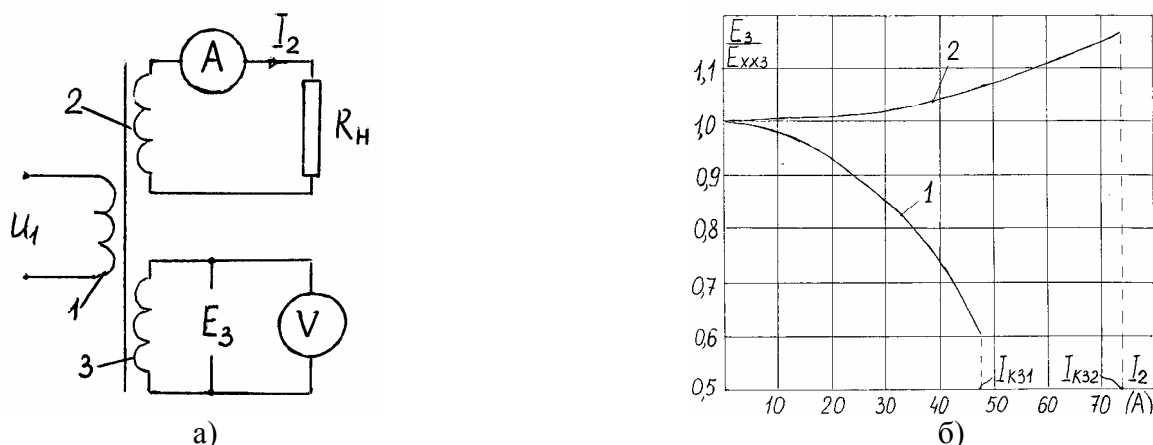


Рис.9. Результаты измерения ЭДС на разомкнутых зажимах обмоток 3 трансформаторов. а) схема измерений, б) результаты измерений: 1-для конструкции 8а, 2- для конструкции 8б, I_{K31}, I_{K32} -токи короткого замыкания.

этих полей совпадают. Поток рассеяния $\Phi_{\Delta 32}$ в режиме 1-2, который пересекает витки обмотки 3, является дополнительным потоком, который изменяет ЭДС на разомкнутых зажимах обмотки 3. Эту ЭДС можно представить в виде:

$$e_3 = -w_3 \frac{d\Phi_0}{dt} \pm \frac{d\Psi_{\Delta 32}}{dt}, \quad (5)$$

где w_3 - количество витков обмотки 3, $\Psi_{\Delta 32}$ - потокосцепление дополнительного потока $\Phi_{\Delta 32}$ с обмоткой 3 в режиме 1-2.

Используя уравнения двухобмоточного трансформатора для определения члена $\frac{d\Phi_0}{dt}$, получим выражение для ЭДС в виде:

$$e_3 = e_{xx3} - \frac{r_1}{k_{12}k_{13}} i_2 + \frac{d}{dt} \left(\frac{\Psi_{\sigma 12}}{k_{13}} \pm \Psi_{\Delta 32} \right), \quad (6)$$

где i_2 - ток во вторичной обмотке 2, r_1 - активное сопротивление первичной обмотки 1, $k_{12} = \frac{w_1}{w_2}$, $k_{13} = \frac{w_1}{w_3}$ - коэффициенты трансформации двухобмоточных трансформаторов с обмотками 1, 2 и 1, 3, w_1, w_2, w_3 - количества витков обмоток 1, 2, 3, $\Psi_{\sigma 12}$ - поток рассеяния в режиме 1-2, условно отнесенный к обмотке 1.

Потокосцепления $\Psi_{\sigma 12}$ и $\Psi_{\Delta 32}$ в (6) пропорциональны току в обмотке 2. Введем понятие коэффициента взаимной индукции вторичных обмоток 2 и 3 как коэффициента пропорциональности между током в обмотке 2 и потокосцеплением $\Psi_{\sigma 132}$:

$$\Psi_{\sigma 132} = \frac{\Psi_{\sigma 12}}{k_{12}} \pm \Psi_{\Delta 32} = -M_{\sigma 132} i_2. \quad (7)$$

В этом выражении $M_{\sigma 132}$ - условно назван коэффициентом взаимной индукции обмоток 2 и 3 по потокам рассеяния в режиме 1-2. В диссертации принято, что $M_{\sigma 132} > 0$, если основной поток Φ_0 и дополнительный поток в обмотке 3 $\Phi_{\Delta 32}$ направлены встречно, и $M_{\sigma 132} < 0$, если $\Psi_{\Delta 32} > \frac{\Psi_{\sigma 12}}{k_{13}}$ и потоки Φ_0 и $\Phi_{\Delta 32}$ направлены согласно. Тогда ЭДС на разомкнутых зажимах обмотки 3:

$$e_3 = e_{XX3} - M_{\sigma 132} \frac{di_2}{dt} - i_2 \frac{r_1}{k_{12}k_{13}}. \quad (8)$$

В этом выражении $e_{132} = -M_{\sigma 132} \frac{di_2}{dt} - i_2 \frac{r_1}{k_{12}k_{13}}$ - **дополнительная ЭДС** на зажимах обмотки

3, обусловленная потоком рассеяния и падением напряжения на первичной обмотке в режиме 1-2. Аналогичное выражение можно получить и для режима 1-3. В комплексном виде дополнительные ЭДС на разомкнутых зажимах вторичных обмоток 2 и 3 можно представить в виде:

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_{123} &= -j\omega M_{\sigma 123} \dot{I}_3 - \frac{r_1}{k_{12}k_{13}} \dot{I}_3 \\ \dot{E}_{132} &= -j\omega M_{\sigma 132} \dot{I}_2 - \frac{r_1}{k_{12}k_{13}} \dot{I}_2 \end{aligned} \right\}, \quad (9)$$

где \dot{I}_2, \dot{I}_3 - токи во вторичных обмотках 2, 3, $M_{\sigma 123}$ - условно назван коэффициентом взаимной индукции по потокам рассеяния обмоток 2 и 3 в режиме 1-3, ω - круговая частота.

В выражении (9) член $-j\omega M_{\sigma 123} \dot{I}_3$ равен ЭДС, которая наводится на разомкнутых зажимах обмотки 2 потоком рассеяния в режиме 1-3, а член $-j\omega M_{\sigma 132} \dot{I}_2$ - ЭДС, которая наводится потоком рассеяния в режиме 1-2. Член $-\frac{r_1}{k_{12}k_{13}} \dot{I}_3$ показывает, что при протекании тока по обмоткам 1 и 3 ЭДС на разомкнутой обмотке 2 меньше ЭДС холостого хода этой обмотки из-за падения напряжения на активном сопротивлении первичной обмотки этого двухобмоточного трансформатора. Многочисленные эксперименты показали, что $M_{\sigma 123} = M_{\sigma 132}$ и коэффициент взаимной индукции $M_{\sigma 123}$ не зависит от токов в обмотках трансформатора.

С учетом (9) уравнения трехобмоточного трансформатора имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_{XX2} &= \left(j\omega \left(\frac{L_{\sigma 1}}{k_{12}^2} + L_{\sigma 2} \right) + \frac{r_1}{k_{12}^2} + r_2 \right) \dot{I}_2 + \frac{r_1}{k_{12}k_{13}} \dot{I}_3 + j\omega M_{\sigma 123} \dot{I}_3 + z_{H2} \dot{I}_2 \\ \dot{E}_{XX3} &= \left(j\omega \left(\frac{L_{\sigma 1}}{k_{13}^2} + L_{\sigma 3} \right) + \frac{r_1}{k_{13}^2} + r_3 \right) \dot{I}_3 + \frac{r_1}{k_{12}k_{13}} \dot{I}_2 + j\omega M_{\sigma 123} \dot{I}_2 + z_{H3} \dot{I}_3 \end{aligned} \right\}, \quad (10)$$

где $\dot{E}_{XX2}, \dot{E}_{XX3}$ - ЭДС холостого хода обмоток 2 и 3, z_{H2}, z_{H3} - сопротивления нагрузки, подключенной к обмоткам 2 и 3, $L_{\sigma 1}, L_{\sigma 2}, L_{\sigma 3}$ - индуктивности рассеяния, условно отнесенные к обмоткам 1, 2, 3, r_2, r_3 - активные сопротивления обмоток 2 и 3.

В этих уравнениях параметр $j\omega \left(\frac{L_{\sigma 1}}{k_{12}^2} + L_{\sigma 2} \right) + \frac{r_1}{k_{12}^2} + r_2 = j\omega L''_{\sigma 12} + r''_{12} = z''_{K12}$ представляет собой

приведенное к вторичной стороне комплексное сопротивление короткого замыкания двухобмоточного трансформатора с обмотками 1 и 2, а параметр

$j\omega \left(\frac{L_{\sigma 1}}{k_{13}^2} + L_{\sigma 3} \right) + \frac{r_1}{k_{13}^2} + r_3 = j\omega L''_{\sigma 13} + r''_{13} = z''_{K13}$ - приведенное к вторичной стороне комплексное

сопротивление короткого замыкания трансформатора с обмотками 1 и 3.

Уравнения (10) дают возможность заменить каждый из рассмотренных трехобмоточных трансформаторов двумя двухобмоточными, имеющими общую магнитную систему. Взаимное влияние этих трансформаторов формально привело к связи индуктивностей рассеяния в этих уравнениях путем взаимной индукции. Уравнениям (10) поставлена в соответствие

электрическая схема на рис.10а, в которой помимо активных сопротивлений, индуктивно связанных элементов и независимых источников ЭДС имеются зависимые источники ЭДС

$$\frac{r_1}{k_{12}k_{13}} \dot{I}_2 \text{ и } \frac{r_1}{k_{12}k_{13}} \dot{I}_3.$$

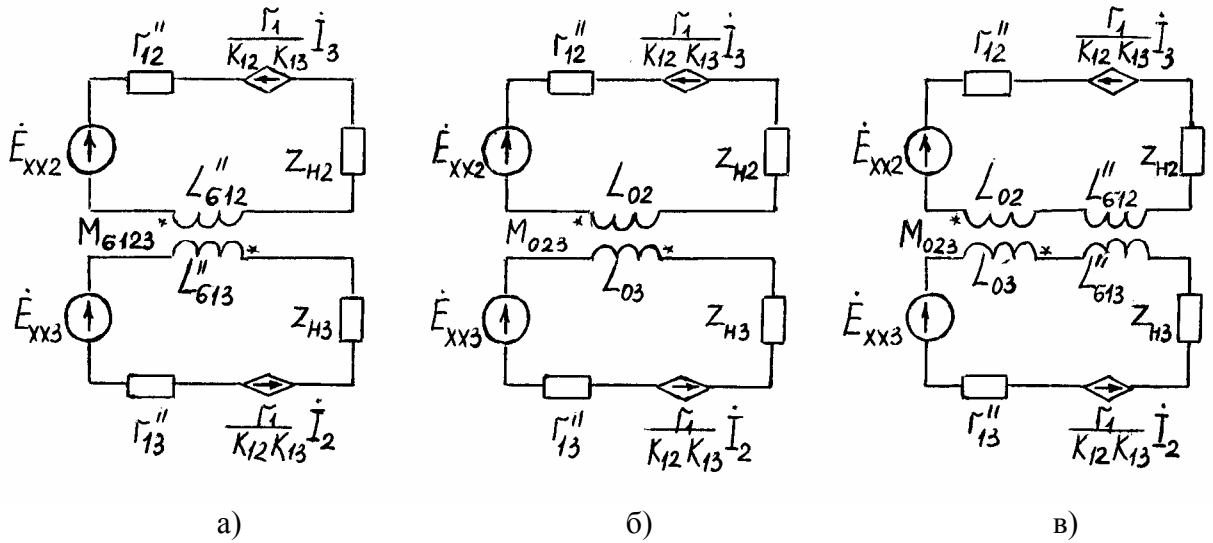


Рис.10. Схемы замещения однофазных трехобмоточных двухстержневых трансформаторов а) без магнитного шунта, б) с магнитным шунтом, в) трехстержневого трансформатора

В диссертационной работе теоретически показано, что параметр $M_{\sigma 123}$ равен параметру $\frac{L_1}{k_{12}k_{13}}$ трехлучевой схемы замещения. Этот вывод подтвержден экспериментально.

В однофазном трехобмоточном двухстержневом трансформаторе с магнитным шунтом (рис.6в) дополнительные ЭДС на разомкнутых вторичных обмотках можно представить в виде:

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_{123} &= -j\omega M_{023} \dot{I}_3 - \frac{r_1}{k_{12}k_{13}} \dot{I}_3 \\ \dot{E}_{132} &= -j\omega M_{032} \dot{I}_2 - \frac{r_1}{k_{12}k_{13}} \dot{I}_2 \end{aligned} \right\}, \quad (11)$$

где $M_{032} = M_{023} \approx \frac{w_2 w_3}{R_{III}}$ - условно называется коэффициентом взаимной индукции вторичных обмоток по **основному** магнитному потоку, R_{III} - магнитное сопротивление шунта.

Член $-j\omega M_{032} \dot{I}_3$ обусловлен основным магнитным потоком, который ответвляется в магнитный шунт в режиме 1-2, а член $-j\omega M_{023} \dot{I}_2$ - магнитным потоком, который ответвляется в магнитный шунт в режиме 1-3. Индекс "0" в обозначении этого коэффициента показывает, что дополнительные ЭДС вызваны основным магнитным потоком, а не потоком рассеяния как в предыдущем случае.

Уравнения трехобмоточного трансформатора с магнитным шунтом имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_{XX2} &= j\omega L_{02} \dot{I}_2 + j\omega M_{023} \dot{I}_3 + \left(\frac{r_1}{k_{12}^2} + r_2 \right) \dot{I}_2 + \frac{r_1}{k_{12}k_{13}} \dot{I}_3 + z_{H2} \dot{I}_2 \\ \dot{E}_{XX3} &= j\omega L_{03} \dot{I}_3 + j\omega M_{023} \dot{I}_2 + \left(\frac{r_1}{k_{13}^2} + r_3 \right) \dot{I}_3 + \frac{r_1}{k_{12}k_{13}} \dot{I}_2 + z_{H3} \dot{I}_3 \end{aligned} \right\}, \quad (12)$$

где $j\omega L_{02} + \left(\frac{r_1}{k_{12}^2} + r_2\right) = z''_{k_{12}}$ - приведенное к вторичной стороне комплексное сопротивление короткого замыкания двухобмоточного трансформатора с обмотками 1 и 2 и магнитным шунтом, а $j\omega L_{03} + \left(\frac{r_1}{k_{13}^2} + r_3\right) = z''_{k_{13}}$ - приведенное к вторичной стороне комплексное сопротивление короткого замыкания двухобмоточного трансформатора с обмотками 1 и 3 и магнитным шунтом, $L_{02} \approx \frac{w_2^2}{R_{III}}$, $L_{03} \approx \frac{w_3^2}{R_{III}}$.

Схема замещения однофазного трехобмоточного трансформатора с магнитным шунтом, соответствующая уравнениям (12), показана на рис.10б.

В однофазном трехобмоточном трехстержневом трансформаторе с первичной обмоткой на среднем стержне и вторичными обмотками, расположенными на разных крайних стержнях (рис.6.д), дополнительные ЭДС на разомкнутых вторичных обмотках определяются формулой (11), в которой $M_{032} = M_{023} \approx -\frac{w_2 w_3}{R_{M2} + R_{M3}}$ - коэффициент взаимной индукции обмоток 2 и 3 по дополнительному основному магнитному потоку, R_{M2}, R_{M3} - магнитные сопротивления частей магнитопровода. В этом случае члены $-j\omega M_{032} \dot{I}_3$ и $-j\omega M_{023} \dot{I}_2$ обусловлены перераспределением основного магнитного потока между крайними стержнями магнитопровода.

Уравнения трехобмоточного трехстержневого трансформатора имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_{XX2} &= (r''_{12} + j\omega L''_{\sigma 12} + j\omega L_{02}) \dot{I}_2 + j\omega M_{023} \dot{I}_3 + \frac{r_1}{k_{12} k_{13}} \dot{I}_3 + z_{H1} \dot{I}_2 \\ \dot{E}_{XX3} &= (r''_{13} + j\omega L''_{\sigma 13} + j\omega L_{03}) \dot{I}_3 + j\omega M_{023} \dot{I}_2 + \frac{r_1}{k_{12} k_{13}} \dot{I}_2 + z_{H2} \dot{I}_3 \end{aligned} \right\}, \quad (13)$$

где $j\omega L_{02} + j\omega L''_{\sigma 12} + \left(\frac{r_1}{k_{12}^2} + r_2\right) = z''_{k_{12}}$ - приведенное к вторичной стороне комплексное сопротивление короткого замыкания трансформатора в режиме 1-2, $j\omega L_{03} + j\omega L''_{\sigma 13} + \left(\frac{r_1}{k_{13}^2} + r_3\right) = z''_{k_{13}}$ - приведенное к вторичной стороне комплексное сопротивление короткого замыкания трансформатора в режиме 1-3, $L_{02} = \frac{w_2^2}{R_{M1} + R_{M2}}$ и $L''_{\sigma 12}$ - индуктивности, определяемые основным магнитным потоком и потоком рассеяния трансформатора в режиме 1-2, $L_{03} = \frac{w_3^2}{R_{M1} + R_{M2}}$ и $L''_{\sigma 13}$ - индуктивности, определяемые основным магнитным потоком и потоком рассеяния в режиме 1-3.

Уравнениям (13) поставлена в соответствие электрическая схема на рис.10в.

Принимая во внимание выражения для дополнительных ЭДС трехобмоточных трансформаторов (9) и (11), уравнения n - обмоточного трансформатора с произвольной конструкцией магнитной системы представлены в виде:

$$\left. \begin{aligned}
 \dot{E}_{xx2} &= (j\omega L''_{12} + r''_{12})\dot{I}_2 + \frac{r_1}{k_{12}k_{13}}\dot{I}_3 + \dots + \frac{r_1}{k_{12}k_{1p}}\dot{I}_p + \dots + \frac{r_1}{k_{12}k_{1n}}\dot{I}_n + \\
 &+ j\omega M_{123}\dot{I}_3 + \dots + j\omega M_{12p}\dot{I}_p + \dots + j\omega M_{12n}\dot{I}_n + z_{H2}\dot{I}_2 \\
 \dot{E}_{xx3} &= (j\omega L''_{13} + r''_{13})\dot{I}_3 + \frac{r_1}{k_{13}k_{12}}\dot{I}_2 + \dots + \frac{r_1}{k_{13}k_{1p}}\dot{I}_p + \dots + \frac{r_1}{k_{13}k_{1n}}\dot{I}_n + \\
 &+ j\omega M_{123}\dot{I}_2 + \dots + j\omega M_{13p}\dot{I}_p + \dots + j\omega M_{13n}\dot{I}_n + z_{H3}\dot{I}_3 \\
 \dots\dots\dots \\
 \dot{E}_{xxn} &= (j\omega L''_{1n} + r''_{1n})\dot{I}_n + \frac{r_1}{k_{1n}k_{12}}\dot{I}_2 + \dots + \frac{r_1}{k_{1n}k_{1p}}\dot{I}_p + \dots + \frac{r_1}{k_{1n}k_{1,n-1}}\dot{I}_{n-1} + \\
 &+ j\omega M_{1n2}\dot{I}_2 + \dots + j\omega M_{1np}\dot{I}_p + \dots + j\omega M_{1n,n-1}\dot{I}_{n-1} + z_{Hn}\dot{I}_n
 \end{aligned} \right\} , \quad (14)$$

где $L''_{1n} = L''_{\sigma 1n} + L_{0n}$ - индуктивность двухобмоточного трансформатора с обмотками 1 и n в режиме короткого замыкания, первое слагаемое $L''_{\sigma 1n} = \frac{L_{\sigma 1}}{k_{1n}^2} + L_{\sigma n}$ в этом выражении определяется потоком рассеяния, а второе L_{0n} - основным магнитным потоком, $r''_{1n} = \frac{r_1}{k_{1n}^2} + r_2$ - активное сопротивление указанного двухобмоточного трансформатора в режиме короткого замыкания, $M_{1pn} = M_{\sigma 1pn} + M_{0pn}$ - коэффициент взаимной индукции n -ой и p -ой вторичных обмоток трехобмоточного трансформатора с обмотками 1, n , p , первое слагаемое $M_{\sigma 1pn}$ которого определяется магнитным потоком рассеяния, а второе M_{0pn} - основным магнитным потоком.

Уравнениям (14) поставлена в соответствие электрическая схема на рис.11. В диссертационной работе показано, что уравнения (10), (12), (13) являются частными случаями уравнений (14). Уравнения (14) и соответствующая им схема замещения позволяют рассчитать электромагнитные процессы в любой конструкции трансформатора двухмостового сварочного выпрямителя.

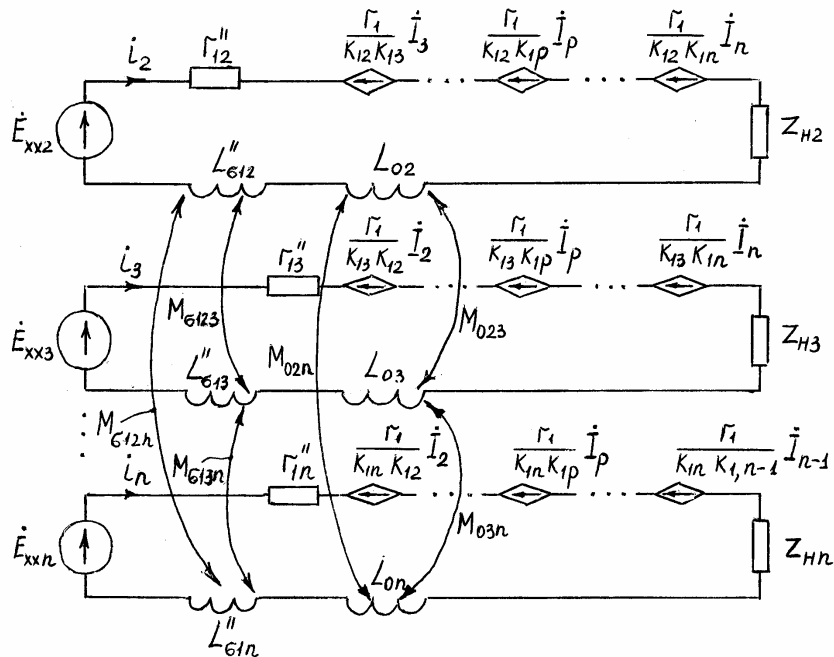


Рис.11. Схема замещения многообмоточного трансформатора.

В третьей главе даны способы измерения и расчета параметров новых схем замещения трехобмоточных трансформаторов, разработанных в диссертации, - коэффициента $\frac{r_1}{k_{12}k_{13}}$, входящего в зависимые ЭДС, и коэффициента взаимной индукции по потокам рассеяния $M_{\sigma_{123}}$ или основному потоку M_{023} .

В основе первого способа измерения указанных параметров в схеме замещения двухстержневого трехобмоточного трансформатора с обмотками 1, 2, 3 лежат опыты короткого замыкания в режимах 1-2, 1-3 и опыт короткого замыкания вторичных обмоток 2 и 3, соединенных последовательно и согласно (режим 1-(2+3)). Коэффициент $\frac{r_1}{k_{12}k_{13}}$ в выражении для зависимой ЭДС определяется по формуле:

$$\frac{r_1}{k_{12}k_{13}} = \frac{r_{1,2+3}'' - r_{12}'' - r_{13}''}{2}, \quad (15)$$

коэффициент взаимной индукции по потокам рассеяния:

$$M_{\sigma_{123}} = \frac{L_{\sigma_{1,2+3}}'' - L_{\sigma_{12}}'' - L_{\sigma_{13}}''}{2}, \quad (16)$$

где $r_{12}'', L_{\sigma_{12}}''$ - активное сопротивление и индуктивность рассеяния трансформатора в режиме 1-2, $r_{13}'', L_{\sigma_{13}}''$ - активное сопротивление и индуктивность рассеяния трансформатора в режиме 1-3, $r_{1,2+3}'', L_{\sigma_{1,2+3}}''$ - активное сопротивление и индуктивность рассеяния трансформатора при коротком замыкании последовательно и согласно соединенных обмоток 2 и 3.

Второй способ измерения параметров схемы замещения трехобмоточного трансформатора основан на следующих формулах, полученных в результате сравнения новой и трехлучевой схем замещения:

$$r_1 = \frac{r_{12}' + r_{13}' - r_{23}'}{2}, \quad (17)$$

$$M_{\sigma_{123}} = \frac{L'_{\sigma_{12}} + L'_{\sigma_{13}} - L'_{\sigma_{23}}}{2k_{12}k_{13}},$$

где $L'_{\sigma_{23}}, r'_{23}$ - индуктивность и активное сопротивление трансформатора в режиме 2-3.

Кроме того, разработан приближенный метод измерения коэффициента взаимной индукции для сварочных трансформаторов, у которых $\omega L_{12}'' \gg r_{12}'', \omega L_{13}'' \gg r_{13}''$. Его можно найти из опыта короткого замыкания одной вторичной обмотки при разомкнутой другой:

$$M_{\sigma_{123}} = \frac{E_{XX2} - E_2}{I_{K33}\omega}, \quad M_{\sigma_{123}} = \frac{E_{XX3} - E_3}{I_{K32}\omega}, \quad (18)$$

где E_{XX2}, E_2 - действующие значения ЭДС на разомкнутой обмотке 2 при разомкнутой и замкнутой накоротко обмотке 3, I_{K33} - действующее значение тока короткого замыкания в обмотке 3 при разомкнутой обмотке 2, E_{XX3}, E_3 - действующие значения ЭДС на разомкнутой обмотке 3 при разомкнутой и замкнутой накоротко обмотке 2, I_{K32} - действующее значение тока короткого замыкания в обмотке 2 при разомкнутой обмотке 3.

Формулы (18) использовались для определения параметра M_{023} двухстержневого трансформатора с шунтом (рис.бв) и трехстержневого трансформатора (рис.б.д,е). В диссертационной работе рассмотрены особенности измерения индуктивностей рассеяния $L_{\sigma_{12}}'', L_{\sigma_{13}}''$ трехстержневого трехобмоточного трансформатора.

Результаты измерения параметров схем замещения трехобмоточных двухстержневых сварочных трансформаторов тремя указанными способами отличаются на 2-5 %.

Расчет параметров новых схем замещения выполняется по формулам (15)-(17). Индуктивности рассеяния в этих формулах определяются на основе численного расчета плоскопараллельного магнитного поля рассеяния трансформатора. При определении активных сопротивлений в формулах (15)-(17) учитываются добавочные потери в обмотках трансформаторов.

В **четвертой главе** даются результаты теоретических и экспериментальных исследований схем и режимов работы двухмостовых сварочных выпрямителей. Расчет электромагнитных процессов в выпрямителях проводился численным методом с использованием разработанных схем замещения трансформаторов. В качестве примера на рис.12а приведена электрическая схема двухмостового выпрямителя с четырехобмоточным трансформатором, а на рис.12б – конструкция трансформатора.

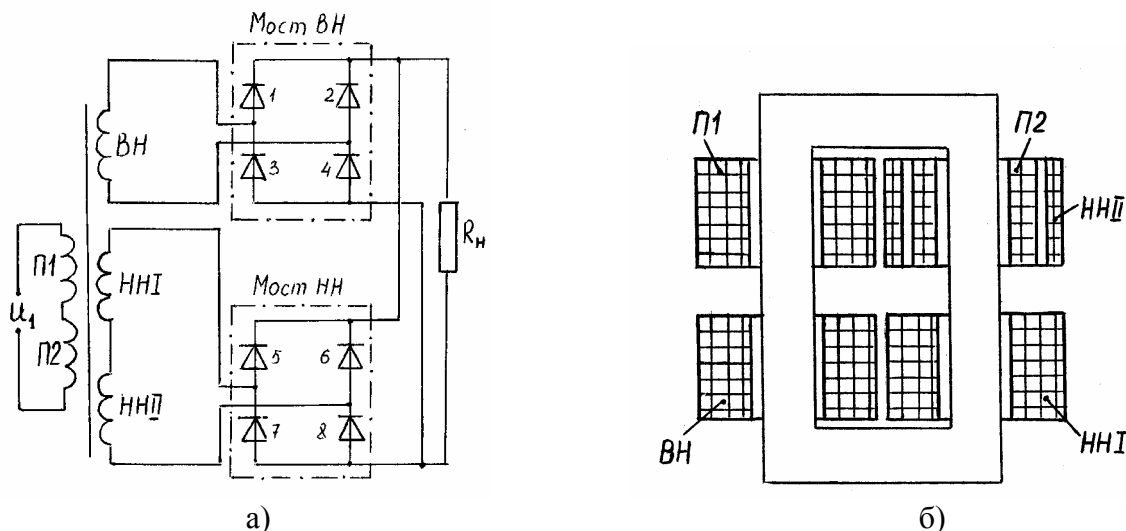


Рис.12. Электрическая схема двухмостового сварочного выпрямителя (а), конструкция трансформатора (б).

Схема замещения четырехобмоточного трансформатора получена на основе схемы замещения n - обмоточного трансформатора на рис.11 при $n = 4$. В соответствии с теорией, изложенной во второй главе, этот трансформатор при расчете следует заменить тремя двухобмоточными трансформаторами. Каждый из этих двухобмоточных трансформаторов имеет первичную обмотку, совпадающую с первичной обмоткой исходного четырехобмоточного трансформатора, и вторичную обмотку, совпадающую с одной из вторичных обмоток ВН, ННІ или ННІІ исходного трансформатора. ЭДС \mathcal{E} на зажимах вторичных обмоток этих трансформаторов обозначены как $\mathcal{E}_{ВН}$, $\mathcal{E}_{ННІ}$, $\mathcal{E}_{ННІІ}$, а параметры короткого замыкания, приведенные к своим вторичным обмоткам, - как $r_{1,ВН}''$, $L_{\sigma 1,ВН}''$, $r_{1,ННІ}''$, $L_{\sigma 1,ННІ}''$, $r_{1,ННІІ}''$, $L_{\sigma 1,ННІІ}''$. В обмотке ВН протекает ток $\dot{I}_{ВН}$, а в последовательно соединенных обмотках ННІ и ННІІ ток $\dot{I}_{НН}$. Индуктивности рассеяния двухобмоточных трансформаторов $L_{\sigma 1,ВН}''$, $L_{\sigma 1,ННІ}''$, $L_{\sigma 1,ННІІ}''$ связаны через магнитные поля рассеяния. Эти связи характеризуются коэффициентами взаимной индукции $M_{\sigma 1,ВН,ННІ}$, $M_{\sigma 1,ВН,ННІІ}$, $M_{\sigma 1,ННІ,ННІІ}$. Кроме того, необходимо учесть зависимые ЭДС, вызванные падением напряжения на первичных обмотках каждого из трех двухобмоточных трансформаторов:

$$\frac{r_1}{k_{ВН}k_{ННІ}}\dot{I}_{НН}, \quad \frac{r_1}{k_{ВН}k_{ННІІ}}\dot{I}_{НН}, \quad \frac{r_1}{k_{ВН}k_{ННІ}}\dot{I}_{ВН}, \quad \frac{r_1}{k_{ННІІ}k_{ННІ}}\dot{I}_{НН},$$

$$\frac{r_1}{k_{ВН}k_{ННІІ}}\dot{I}_{ВН}, \quad \frac{r_1}{k_{ННІІ}k_{ННІ}}\dot{I}_{НН}. \text{ В этих выражениях коэффициенты трансформации определяют}$$

ся соотношениями $k_{BH} = \frac{w_1}{w_{BH}}$, $k_{HNI} = \frac{w_1}{w_{HNI}}$, $k_{HNIH} = \frac{w_1}{w_{HNIH}}$, где $w_1, w_{BH}, w_{HNI}, w_{HNIH}$ - количество витков первичной обмотки и секций ВН, ННІ, ННІІ. Принимая во внимание последовательное и согласное соединение секций ННІ и ННІІ обмотки низкого напряжения, схема замещения трансформатора и расчетная схема выпрямителя принимают вид на рис.13.

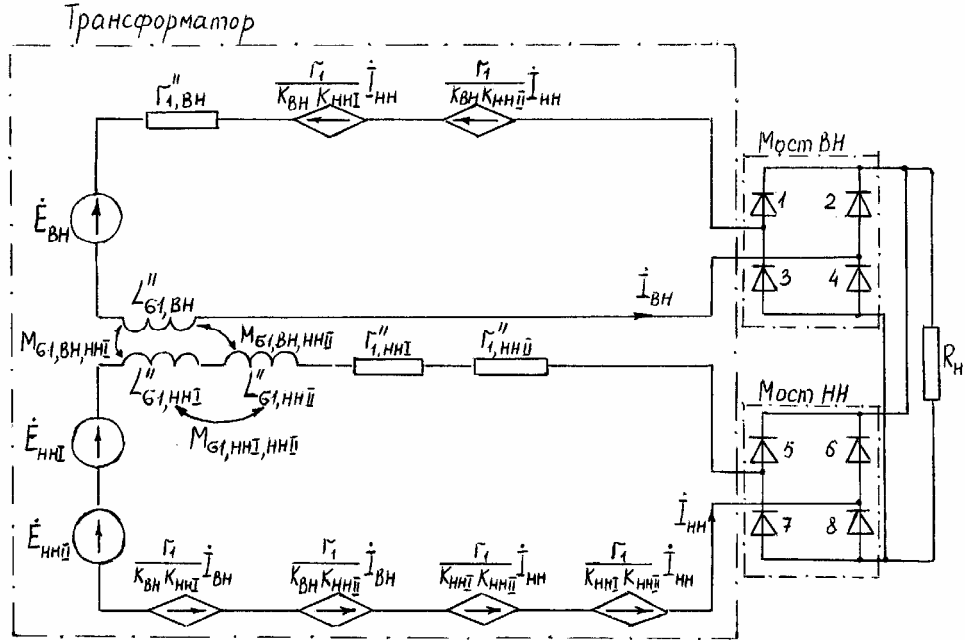


Рис.13. Расчетная схема выпрямителя.

Расчетную схему на рис.13 можно упростить, принимая во внимание результаты измерения параметров схемы замещения трансформатора, которые показали, что $M_{\sigma 1, BH, HNIH} \ll M_{\sigma 1, BH, HNI}$, $M_{\sigma 1, HNI, HNIH} \ll M_{\sigma 1, BH, HNI}$ и объединяя последовательно соединенные источники ЭДС. Упрощенная расчетная схема показана на рис.14. Эта схема достаточно проста по сравнению с известной схемой замещения в виде четырехугольника с непересекающимися диагоналями, которая приведена, например, в работах Васютинского С.Б., поэтому ее удобно использовать для исследования влияния конструкции трансформатора на внешнюю характеристику выпрямителя.

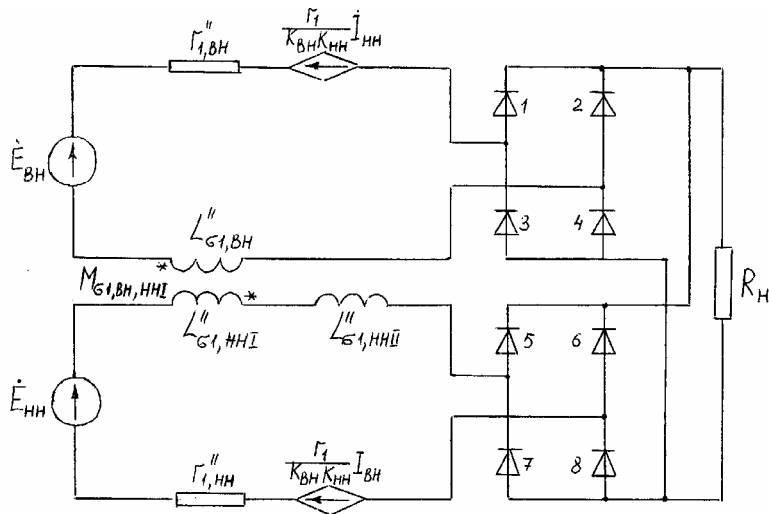


Рис.14. Упрощенная расчетная схема двухмостового сварочного выпрямителя.

В четвертой главе рассматриваются две основные схемы однофазного двухмостового сварочного выпрямителя – схемы с электрически несвязанными (рис.1б) и связанными между собой вторичными обмотками (рис.15а). В трехфазном двухмостовом выпрямителе используются традиционные схемы трехфазного выпрямления – соединение обмоток трансформатора треугольником и звездой. Для каждой схемы выпрямления получены эквивалентные (расчетные) схемы с учетом разработанных схем замещения трансформаторов. Для всех предложенных в диссертации схем выпрямления и конструкций трансформаторов даются осциллограммы выпрямленных токов, напряжений и токов в диодах и всех секциях обмоток трансформаторов, а также все параметры, характеризующие работу выпрямителя.

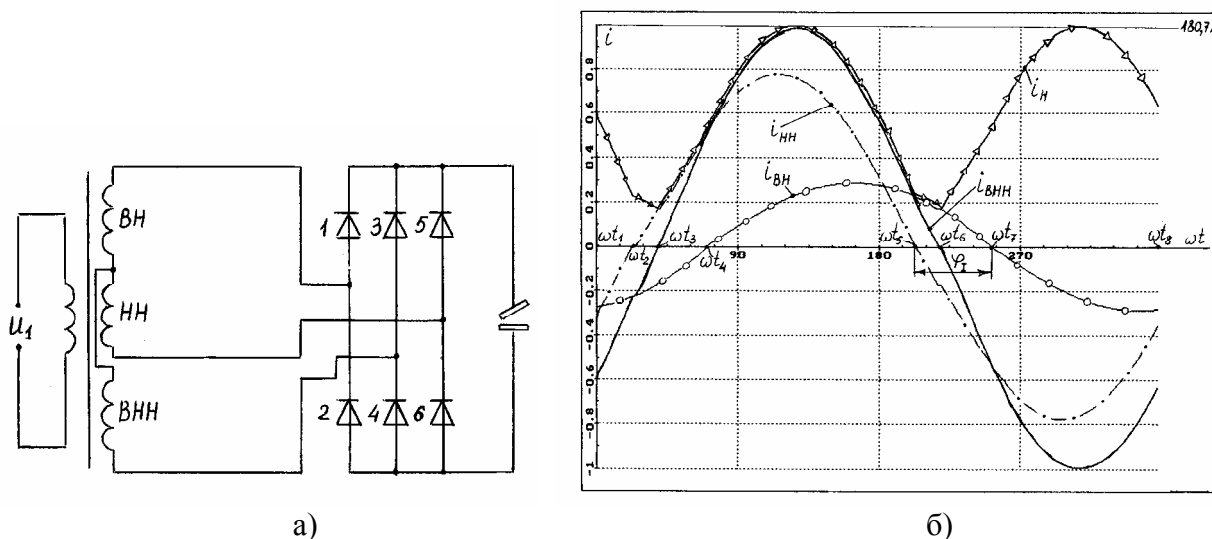


Рис.15.Электрическая схема (а) и осциллограммы токов в обмотках трансформатора (б).

В диссертации показано, что электрическое соединение вторичных обмоток высокого и низкого напряжения дает широкие возможности для увеличения минимального мгновенного значения выпрямленного тока, что повышает устойчивость горения дуги. Осциллограммы токов в этой схеме показаны на рис.15б. Увеличение минимального мгновенного значения выпрямленного тока в этой схеме по сравнению со схемой, в которой обмотки ВН и НН электрически не связаны между собой, достигается как за счет увеличения сдвига фаз токов в этих обмотках, так и за счет того, что на интервалах периода изменения выпрямленного тока, где его мгновенные значения достигают своего минимального за период значения, этот ток формируется под воздействием повышенных напряжений холостого хода выпрямителей по сравнению с теми, которые формируют выпрямленный ток на остальных интервалах периода. В схеме с электрически несвязанными между собой вторичными обмотками (рис.1б) для выбранной конструкции трансформатора сдвиг фаз токов $i_{ВН}$ и $i_{НН}$ в выпрямителях ВН и НН однозначно определяется основными параметрами выпрямителя – рабочим током выпрямителя, напряжениями ХХ выпрямителей высокого и низкого напряжений, рабочими токами этих выпрямителей и крутизной внешней характеристики выпрямителя. В схеме с электрически связанными вторичными обмотками можно получить разные сдвиги фаз токов выпрямителей ВН и НН при одинаковых основных параметрах двухмостового выпрямителя за счет изменения соотношения количества витков в секциях ВН, НН и ВНН. Применение этой схемы позволяет расширить номенклатуру марок электродов, которые можно использовать для получения устойчивого горения сварочной дуги при низком уровне электропотребления.

Экспериментальные исследования показали, что для легкого зажигания и устойчивого горения дуги в двухмостовых сварочных выпрямителях необходимо, чтобы напряжение ХХ обмотки НН составляло не меньше 40 В, минимальное мгновенное значение выпрямленного

тока не менее 10 % от амплитуды выпрямленного тока, а рабочие токи в обмотках ВН ($I_{PВН}$) и НН ($I_{PНН}$) были связаны с рабочим током (I_{HP}) соотношением:

$$I_{ВНР} \approx 30\%I_{HP}, I_{ННР} \approx 70\%I_{HP}. \quad (19)$$

Опыты подтвердили, что при напряжении холостого хода обмотки низкого напряжения не более 45 В ток, потребляемый из сети двухмостовым выпрямителем в рабочем режиме, на 25-30 % меньше, чем традиционного одномостового. Погрешность расчета внешних характеристик двухмостовых выпрямителей не превышает 10%.

В **пятой главе** исследуется влияние конструкций трансформаторов на внешние характеристики двухмостовых выпрямителей.

В диссертации показано, что главную роль при получении крутопадающей внешней характеристики выпрямителя играют дополнительные ЭДС. Для характеристики этих ЭДС введены коэффициенты связи вторичных обмоток трехобмоточного трансформатора по потокам рассеяния $k_{CB} = \frac{M_{\sigma_{123}}}{\sqrt{L''_{\sigma_{12}}L''_{\sigma_{13}}}}$ или основному потоку $k_{CB} = \frac{M_{023}}{\sqrt{L_{02}L_{03}}}$. Влияние коэффициента

связи на вид внешней характеристики иллюстрируют кривые на рис.16а. Они получены расчетным путем при постоянстве $L''_{\sigma_{1,ВН}}$ и $L''_{\sigma_{1,НН}}$ в цепях ВН и НН. Из этого рисунка видно, что если $k_{CB} > 0$ увеличение коэффициента связи уменьшает крутизну внешней характеристики. Важный вывод, сделанный из этих расчетов и подтвержденный экспериментально, состоит в том, что при определенном коэффициенте связи крутопадающую внешнюю характеристику можно получить только в определенном диапазоне изменения рабочего тока выпрямителя. Например, при $k_{CB} = 0,8$ изменение индуктивностей рассеяния не позволяет получить крутопадающую характеристику при рабочем токе 100 А, $U_{XXНН} = 45$ В, $I_{PНН} = 0,7I_P$ ни при каких значениях индуктивностей рассеяния в цепях ВН и НН. Для получения крутопадающей внешней характеристики необходимо уменьшить коэффициент связи, следовательно, перейти к другой конструкции трансформатора. Расчетные и экспериментальные исследования показали, что в однофазных двухстержневых трансформаторах с симметричным расположением вторичных обмоток (рис.6в) $M_{\sigma_{123}} > 0$, $M_{023} > 0$ и дополнительные ЭДС играют отрицательную роль при получении крутопадающих внешних характеристик. При несимметричном расположении вторичных обмоток (рис.6г) $M_{\sigma_{123}} < 0$ и дополнительные ЭДС положительно влияют на получение крутопадающей внешней характеристики. Это связано с тем, что в первом случае при включении выпрямителя дополнительные ЭДС, вызванные токами в обмотке ВН, уменьшают ЭДС на зажимах обмотки НН, а во втором случае – увеличивают. Наилучшими возможностями получения крутопадающей внешней характеристики обладает однофазный трехстержневой трансформатор, в котором ЭДС, определяемая основным магнитным потоком, один раз меняет знак при изменении нагрузки от холостого хода до короткого замыкания. На основании проведенных исследований и имеющегося опыта составлена таблица 1 предпочтительных конструкций трансформаторов в определенных диапазонах изменения тока. В этой таблице знак “+” соответствует конструкции трансформатора, которую целесообразно применять в соответствующем диапазоне изменения номинальных сварочных токов.

В **шестой главе** рассматриваются особые свойства двухмостовых сварочных выпрямителей, отличающие их от традиционных одномостовых и двухмостовых, и приводятся сведения о разработанных двухмостовых сварочных выпрямителях.

К особым свойствам двухмостовых сварочных выпрямителей относятся следующие:

- параллельное включение (через диодные мосты) двух вторичных обмоток трансформатора, имеющих разные напряжения холостого хода, на одну нагрузку,
- зависимость коэффициента трансформации тока выпрямителя от тока нагрузки,
- зависимость эквивалентной индуктивности выпрямителя от тока нагрузки,

- способность однофазного двухмостового выпрямителя обеспечивать отличные от нуля мгновенные значения выпрямленного тока в любой момент времени при отсутствии сглаживающего дросселя в цепи постоянного тока.

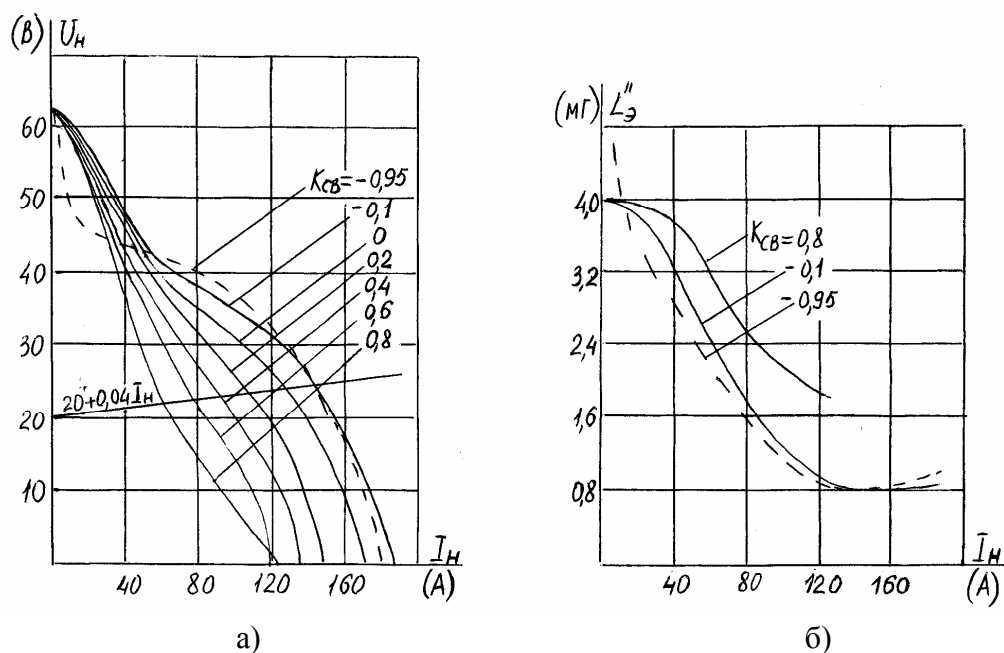


Рис.16. Влияние коэффициента связи на а) внешнюю характеристику и б) эквивалентную внутреннюю индуктивность двухмостового выпрямителя при $L''_{\sigma 1,HH} = const$, $L''_{\sigma 1,BH} = const$

Таблица 1

Тип трансформатора		Однофазный				Трех- стержневой	Трех- фазный
		двухстержневой с секциями вторичных обмоток ВН1 и НН1, расположенными на одном стержне		на разных стержнях			
		ВН1 на расстоянии от НН1	симметрично	несимметрично			
Диапазон изменения номинального рабочего тока	40-100, А	+	+	+	-	-	
	60-130, А	-	+	+	-	-	
	60-170, А	-	-	+	+	-	
	60-200, А	-	-	-	+	+	
	80-300, А	-	-	-	-	+	

Благодаря этим свойствам уменьшены электропотребление и масса этих выпрямителей по сравнению с традиционными сварочными выпрямителями при выполнении всех требований, предъявляемых к сварочным выпрямителям.

Коэффициент трансформации тока $k_I = \frac{I_H}{I_1}$, который равен отношению действующего значения тока нагрузки к действующему значению первичного тока, в относительных единицах определяется формулой:

$$k_I^* = 1 + \frac{I_{\Delta HH}}{I_1} (k_{HH}^* - 1), \quad (20)$$

где $k_{HH}^* = \frac{k_{HH}}{k_{BH}} = \frac{U_{XXBH}}{U_{XXHH}}$, k_{BH} и k_{HH} коэффициенты трансформации двухобмоточных трансформаторов с обмотками 1, ВН и 1, НН, $k_I^* = \frac{k_I}{k_{BH}}$, $I_H^* = \frac{I_H}{I_P}$, $I_{1HH} = \frac{I_{HH}}{k_{HH}}$.

В диссертации представлена зависимость относительного коэффициента трансформации $k_I^* = \frac{k_I}{k_{BH}}$ двухмостового выпрямителя от относительного тока нагрузки $I_H^* = \frac{I_H}{I_P}$, справедливая для большинства разработанных в диссертации двухмостовых выпрямителей (рис.17). Из этой зависимости следует, что при рабочем токе ($I_H = I_P$, $I_H^* = 1$) этот коэффициент увеличивается приблизительно на 30 %, следовательно, на такую же величину уменьшается первичный ток по сравнению с одномостовым выпрямителем, у которого напряжение холостого хода равно напряжению холостого хода обмотки ВН и коэффициент трансформации равен k_{BH} .

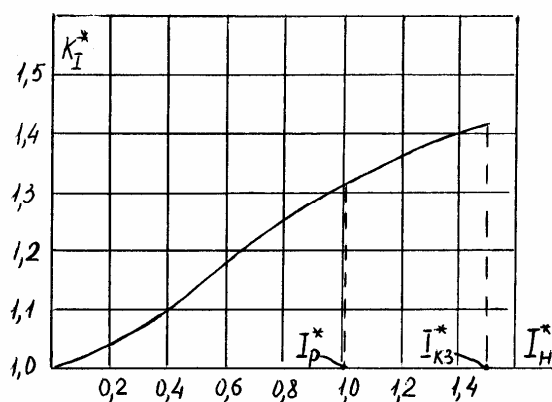


Рис.17. Зависимость коэффициента трансформации двухмостового выпрямителя от тока нагрузки.

Получено, что эквивалентная индуктивность двухмостового выпрямителя зависит от тока нагрузки, а вид этой зависимости в значительной степени определяется коэффициентом связи вторичных обмоток трансформатора. В диссертации представлены зависимости эквивалентной индуктивности двухмостового выпрямителя от тока нагрузки (рис.16б) для нескольких значений коэффициента связи, которые поясняют причину влияния конструкции трансформатора на вид внешней характеристики выпрямителя.

Параметры разработанных в диссертации однофазных двухмостовых сварочных выпрямителей, номинальные токи которых составляют 80 А, 100 А, 130 А, 200 А и трехфазного выпрямителя с номинальным током 300 А приведены в таблице 2.

Разработанные двухмостовые сварочные выпрямители.

Таблица 2.

Наименование параметра	Тип выпрямителя			
	ВД-80	ВД-100	ВД-130	ВД-200
Напряжение питающей сети, В	220			220/380
Напряжение ХХ выпрямителя (выпрямителя ВН), В	66	65	65	65
Напряжение ХХ выпрямителя НН, В	38	40	40	45
Номинальный сварочный ток, А	80	100	130	200

Рабочее напряжение при номинальном сварочном токе, В	23,2	24	25,2	28
Пределы регулирования сварочного тока, А	40-100	40-120	60-150	80-200
Продолжительность нагрузки, ПН%	20	20	60	40
Регулирование сварочного тока, А	4 ступени (40-60-80-100)		плавное	плавно-ступенчатое (2 ступени: 60-150, 150-200)
Потребляемая мощность, кВА	3,3	5,9	7,7	12
КПД, %	65	68	66	70
Масса, кг	18	20	35	45

Сравнение разработанных двухмостовых сварочных выпрямителей с традиционными одно-мостовыми даны в таблицах 3-6. Эти таблицы составлены по материалам международных выставок сварочного оборудования, проходивших в Санкт-Петербурге за последние десять лет.

Выпрямитель ВД-80

Таблица 3

Тип выпрямителя	Напряжение XX, В	Диапазон сварочного тока, А	Номинальный ток, А	ПН, %	Потребляемая мощность, кВА	Масса, кг
Универсал	48	40-125	80	20	4,4	29
ВД-80	69	40-100	80	20	3,6	18

Выпрямитель ВД-100

Таблица 4

Тип выпрямителя	Напряжение XX, В	Диапазон сварочного тока, А	Номинальный ток, А	ПН %	Потребляемая мощность, кВА	Масса, кг
ВСБ-102	65	65-100	100	20	7,3	30
ВД-100	60	40-120	100	20	5,9	20

Выпрямитель ВД-130.

Таблица 5

Тип выпрямителя	Напряжение XX, В	Диапазон сварочного тока, А	Номинальный ток, А	ПН %	Потребляемая мощность, кВА	Масса, кг
ВД-180/130	70	38-130	130	20	9,5	55
СУПЕР-КЕМПАК	70	5-130	130	15	9,5	45

PRIMUS-140	45	35-140	140	17	7,0	33
PRIMUS-180	52	40-180	140	20	9,0	40
ВД-130	65	60-150	130	60	7,7	35

Выпрямитель ВД-200.

Таблица 6

Тип выпрямителя	Напряжение хх, В	Диапазон сварочного тока, А	Номинальный ток, А	ПН %	Потребляемая мощность, кВА	Масса, кг
Quality 260	60	35-170	170	20	11	51,5
Linear 200	57	40-200	190	25	13,5	60
Euro Weld 200	70	20-200	200	20	14,6	61
SPM-200	72	50-200	200	20	15	65
Primus-200	66	35-200	200	30	13,9	63
ВД-200	65	60-200	200	20	11,4	45

Трехфазный выпрямитель ВД-300.

Таблица 6.

Тип выпрямителя	Напряжение ХХ, В	Диапазон сварочного тока, А	Номинальный ток, А	ПН %	Потребляемая мощность, кВА	Масса, кг
ВД-306	70	45-315	315	60	24	165
ВД-300	70	60-315	315	60	19	132

Результаты сравнения новых двухмостовых сварочных выпрямителей с их одномотовыми прототипами показали, что электропотребление и масса любого разработанного двухмостового выпрямителя независимо от типа источника питания и конструкции трансформатора меньше, чем у соответствующего одномотового выпрямителя. При этом внешняя характеристика двухмостового выпрямителя является крутопадающей. Устойчивость горения дуги и качество сварки разработанных двухмостовых сварочных выпрямителей не уступают традиционным одномотовым прототипам.

Заключение.

В диссертационной работе решена научная проблема, заключающаяся в создании теории, разработке и исследовании новых экономичных двухмостовых сварочных выпрямителей с многообмоточными трансформаторами. Решение этой проблемы имеет важное народ-

но-хозяйственное значение. Все поставленные задачи выполнены в соответствии с целью работы. Основные результаты диссертации можно сформулировать следующим образом:

1. В работе выдвигается и обосновывается подход к созданию экономичных двухмостовых сварочных выпрямителей. Этот подход заключается в питании электрической дуги от двух неуправляемых выпрямителей, которые состоят из двух диодных мостов, на входы которых поданы разные напряжения от определенным образом соединенных вторичных обмоток многообмоточного трансформатора, а выходы мостов подключены параллельно дуговому промежутку. Напряжение холостого хода на входе одного из мостов составляет от 60 В до 80 В, как у традиционных одномостовых сварочных выпрямителей, а на входе другого не более 45 В. Теоретические и экспериментальные исследования показали, что в зависимости от соотношения напряжений холостого хода на входах мостов и от соотношения выпрямленных токов этих мостов масса двухмостового выпрямителя может быть снижена на 20- 40% с одновременным снижением на 25-30 % потребляемой электроэнергии по сравнению с традиционным одномостовым сварочным выпрямителем. Запатентованные технические решения использованы для создания сварочных выпрямителей для ручной дуговой сварки с номинальными токами от 40 А до 300 А. Проведенные исследования открывают перспективы для создания экономичных двухмостовых сварочных выпрямителей на номинальные токи более 300 А и для создания источников питания для других видов сварки.

2. Двухмостовые сварочные выпрямители обладают новыми свойствами по сравнению с известными двухмостовыми выпрямителями, которые состоят в том, что коэффициент трансформации тока и эквивалентная индуктивность выпрямителя зависят от величины выпрямленного тока. Показано, что благодаря этим свойствам получены экономия потребляемой электроэнергии и массы сварочного выпрямителя, а также выполнено одно из основных требований, предъявляемых к выпрямителям для ручной дуговой сварки - крутопадающая статическая внешняя характеристика выпрямителя.

3. Решение сложной задачи получения крутопадающих внешних характеристик выпрямителей в широком диапазоне изменения номинальных сварочных токов при напряжениях на входе одного из мостов не более 45 В основано на использовании явления изменения ЭДС на зажимах одной из вторичных обмоток трансформатора при прохождении тока по другим вторичным обмоткам. Для эффективного использования этого явления вторичные обмотки трансформатора разделены на секции, расположенные определенным образом по отношению друг к другу. На основе анализа этого явления теоретически обоснованы, разработаны и экспериментально исследованы оригинальные конструкции сварочных трансформаторов, обеспечивающие крутопадающие внешние характеристики сварочных выпрямителей:

- однофазные двухстержневые трансформаторы с симметрично и несимметрично расположенными секциями первичных и вторичных обмоток на разных стержнях магнитопровода,

- однофазные трехстержневые трансформаторы, вторичные обмотки которых, подсоединенные к входам разных мостов, расположены на разных крайних стержнях,

- трехфазный трансформатор, в котором установлен неподвижный магнитный шунт для получения повышенного рассеяния в цепи одного из выпрямителей.

В некоторых конструкциях трансформаторов установлен подвижный магнитный шунт для регулирования сварочного тока.

4. Для исследования электромагнитных процессов в многообмоточных трансформаторах, установленных в двухмостовых сварочных выпрямителях, поиска и разработки их конструкций составлены новые схемы замещения многообмоточных трансформаторов, отличающиеся от известных тем, что они позволяют сохранить реальное соединение вторичных обмоток трансформатора без введения в схему дополнительных идеальных трансформаторов. Кроме того, все параметры новых схем замещения имеют физический смысл. Новые схемы замещения основаны на замене n - обмоточного трансформатора $(n-1)$ - им двухобмоточным. Они содержат новые параметры – коэффициенты взаимной индукции по потокам рассеяния или по основному магнитному потоку, а также коэффициенты при зависимых ЭДС, которые оп-

ределяют дополнительные ЭДС трансформаторе, влияющие на вид внешней характеристики выпрямителя.

5. Разработаны методы измерения параметров новых схем замещения многообмоточных трансформаторов.

6. Рассмотрены важные частные случаи новых схем замещения многообмоточных трансформаторов:

- схема замещения однофазного двухстержневого трансформатора с магнитным шунтом и без магнитного шунта,

- схема замещения однофазного трехстержневого трехобмоточного трансформатора,

- схема замещения трехфазного трехобмоточного трансформатора с неподвижным магнитным шунтом.

7. Показано, что в схеме замещения однофазного двухстержневого трехобмоточного трансформатора коэффициент взаимной индукции по потокам рассеяния, приведенный к первичной стороне трансформатора, равен параметру L_1 трехлучевой схемы замещения, а активное сопротивление, приведенное к первичной стороне, равно параметру R_1 трехлучевой схемы замещения.

8. Выявлено на основе экспериментальных исследований и показано теоретически, что основной магнитный поток в крайних стержнях однофазного трехстержневого трансформатора с первичной обмоткой на среднем стержне и вторичными обмотками на разных крайних стержнях зависит от режима его работы. Это явление используется для получения крутопадающей характеристики двухмостового сварочного выпрямителя. Максимальная крутизна внешней характеристики получена при условии, что вблизи рабочей точки выпрямителя обеспечено равенство МДС секций обмоток, расположенных на крайних стержнях.

9. Создана теория двухмостовых сварочных выпрямителей, которая включает расчет электромагнитных процессов во всех элементах выпрямителя на основе использования известных комплексов программ расчета электромагнитных процессов в вентильных схемах и разработанных в диссертации схем замещения многообмоточных трансформаторов. Составной частью этой теории являются значения ряда параметров выпрямителя, обеспечивающих устойчивое горение сварочной дуги.

10. Получены обобщенные данные о целесообразности использования разработанных конструкций трансформаторов и схем выпрямления в определенных диапазонах изменения номинальных сварочных токов.

11. Разработаны и исследованы двухмостовые сварочные выпрямители на номинальные сварочные токи 80 А, 100 А, 130 А, 200 А, 300 А.

Основные публикации по теме диссертации.

1. Патент РФ № 2035275. Источник питания для дуговой сварки / А.И. Комарчев, Л.И.Сахно, О.И.Сахно, В.В. Смирнов. Оpubл. в БИ, 1995, №14

2. Патент РФ № 2056242. Установка для дуговой и контактной сварки. / А.И. Комарчев, Л.И. Сахно, О.И.Сахно, С.П. Карандасов . Оpubл. в БИ, 1996, №8

3. Патент РФ № 2056243. Установка для дуговой и контактной сварки. / А.И. Комарчев, Л.И.Сахно, О.И.Сахно, Оpubл. в БИ, 1996, №8

4. Патент РФ № 2063314. Источник питания для дуговой сварки. / А.И. Комарчев, Л.И.Сахно, О.И.Сахно, Смирнов В.В. Оpubл. в БИ, 1996, №9.

5. Патент РФ № 2141888. Источник питания для дуговой сварки./ А.И. Комарчев, Л.И.Сахно, О.И.Сахно, П.Д. Федоров. Оpubл. в БИ 1999, №33.

6. Свидетельство на полезную модель №23587. Источник питания для дуговой сварки./ А.И. Комарчев, Л.И.Сахно, О.И.Сахно, П.Д. Федоров, Т.П. Филина. Оpubл. в БИ 2002, №18,

7. Патент РФ № 2207942, Источник питания для дуговой сварки. / А.И. Комарчев, Л.И.Сахно, О.И.Сахно, П.Д. Федоров, Т.П. Филина. Оpubл. в БИ 2003, № 19.

8. Патент РФ № 2265504 “Источник питания для дуговой сварки” / А.И. Комарчев, Л.И.Сахно, Л.И.Сахно, П.Д. Федоров. Оpubл. в БИ, 2005, №34.
9. Боронин В.Н., Сахно Л.И. Численный расчет квазистационарного электромагнитного поля трансформатора // **Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт**- 1987.- № 6.-С.69-74.
10. Boronin V., Sakhno L. Sakhno O. Computation of frequency dependencies of losses in transformer and reactors winding // International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Japan, Nagoya, 1989.
11. Сахно Л.И. К расчету плоскопараллельных квазистационарных электромагнитных полей при резком поверхностном эффекте // **Электричество**- 1989. -№12-С. 74-75.
12. Б.А.Будилов, Б.Н.Резников, Л.И.Сахно. Исследование электромагнитных процессов в источниках питания для контактной сварки // Сборник статей “Моделирование силовых вентильных преобразователей”. Киев: Институт электродинамики АН УССР,1989.- С.105-108.
13. Исследование электромагнитных параметров сварочных трансформаторов при повышенных частотах / Будилов Б.А., Сахно Л.И // Тез. докл.VII Всесоюз. науч.-техн. конф. по трансформаторостроению, г. Запорожье, 12-14 сентября 1990г.- Запорожье: ВИТ,1990.-С.91.
14. Расчет добавочных потерь в обмотках трансформаторов / Боронин В.Н., Сахно Л.И., Сахно О.И. // Тез. докл.VII Всесоюз. науч.-техн. конф. по трансформаторостроению, г. Запорожье, 12-14 сентября, 1990г. –Запорожье: ВИТ, 1990.- С.-133.
15. Клямкин С.С., Красноштанов А.С., Сахно Л.И. Расчет сопротивления скрученного провода при постоянном токе. // **Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт**- 1990.- № 6.-С.130-133.
16. Будилов Б.А., Сахно Л.И., Сахно О.И. Разработка математической модели для анализа уровня электромагнитных помех, создаваемых контактными электросварочными машинами. // Труды X Международного Вроцлавского симпозиума по электромагнитной совместимости, Польша,1990-Вроцлав: Вроцлавский технический университет,1990-
17. Разработка и исследование инверторного источника питания для стыковой контактной сварки оплавлением стальных труб / Б.А.Будилов, Л.И.Сахно, Н.Я.Смирнов // Сборник научных трудов “Новые сварочные источники питания”- Киев: ИЭС им. Е.О.Патона,1992.- С.106-109.
18. Комарчев А.И., Сахно Л.И., Сахно О.И. Новые бытовые сварочные выпрямители. // Прогрессивные технологические процессы и оборудование для сварочного производства: Тез. докл. семинара, г.Санкт-Петербург, 15-17 февраля 1994 г. - СПб: ЛенЦНТИ, ИС России, ВНИИТВЧ, 1994.-С.9.
19. Комарчев А.И., Сахно Л. И., Сахно О.И., Федоров П.Д. Разработка энергосберегающих двухмостовых выпрямителей с крутопадающими внешними характеристиками. // Современные проблемы и достижения в области сварки, родственных технологий и оборудования на рубеже XI века: Материалы международной научно-технической конференции, г. Санкт-Петербург, 27-28 апреля, 2000 г. - СПб: ИС России, 2000.-С.55-58.
20. Боронина Л.Ф., Сахно Л.И. Трансформаторы для двухмостовых сварочных выпрямителей // Труды международной научно-технической конференции ”Power and Electrical Engineering” т.4 - Рига: Рижский технический университет, 2001-С.37-44.
21. Комарчев А.И., Сахно Л.И., Сахно О.И., Федоров П.Д. Двухмостовые выпрямители с трансформаторами, регулируемые магнитным шунтом. // **Сварочное производство**, 2001, № 11-С.16-20.
22. Сахно Л.И., Балагула Ю.М. Потери в обмотках трансформаторов контактных электросварочных машин с инверторными источниками питания // Состояние и проблемы отечественного трансформаторостроения: Материалы научно-практической конференции и школы-семинара , г.Санкт-Петербург, 30-31 марта 2001г- СПб.: СПбГТУ, 2001-С.22-26.
23. Комарчев А.И., Сахно Л. И., Сахно О.И., Федоров П.Д. Исследования трансформаторов контактных электросварочных машин с инверторными источниками питания // Современные проблемы и достижения в области сварки, родственных технологий и оборудования в

- XXI веке. Часть 2: Материалы международной научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 4-5 апреля 2001 г.- СПб: ИС России, 2001.-С.90-98.
24. Сахно Л.И. Исследование двухмостовых сварочных выпрямителей с крутопадающими внешними характеристиками для питания электрической дуги // **Электричество**- 2002- № 12-С.51-56.
25. Сахно Л.И. Трехфазные двухмостовые сварочные выпрямители // Современные проблемы и достижения в области сварки, родственных технологий и оборудования: Материалы международной научно-технической конференции, г.Санкт-Петербург, 29-30 мая 2002г.- СПб:ИС России, 2002-С.5-11.
26. L.I.Sakhno. An investigation of double-bridge rectifiers with steeply falling external characteristics for supplying an electric arc // *Electrical Technolodgy Russia* – 2002 - №1.
27. Сахно Л.И. К вопросу о схеме замещения трехобмоточного трансформатора // **Электричество**- 2003- № 8-С.25-33.
28. Сахно Л.И. Двухмостовые сварочные выпрямители с однофазными трансформаторами, имеющими трехстержневую магнитную систему // **Сварочное производство**- 2003- № 2-С.19-24.
29. Боронина Л.Ф., Сахно Л.И., Сахно О.И. Расчет добавочных потерь в трансформаторах машин контактной сварки // Труды международной научно-технической конференции "Power and Electrical Engeneering" т.7 - Рига: Рижский технический университет, 2002-С. 54-59.
30. L.I.Sakhno. Two-bridge welding rectifiers with single-phase transformers with a three-rod magnetic system // *Welding International*- 2003 – vol.17.-№7.-P.565-569.
31. Сахно Л.И. Исследование однофазных сварочных трансформаторов с трехстержневой магнитной системой, работающих на двухмостовые выпрямители // **Электричество** - 2004- № 10.-С.53-64.
32. Сахно Л.И., Сахно О.И. Уравнения и схема замещения двухстержневого многообмоточного трансформатора // **Научно-технические ведомости СПбГПУ**. - 2004 - № 4.-С.8-15.
33. L.I.Sakhno. Investigations of single-phase welding transformers with a three-core magnetic system used in double-bridge rectifiers // *Electrical Technolodgy Russia* – 2004- №4. -P.46-65.
34. Комарчев А.И., Сахно Л. И., Сахно О.И., Федоров П.Д. Новые схемные решения двухмостовых сварочных выпрямителей // Источники питания и системы автоматического управления сварочным оборудованием: Материалы заседаний секции межгосударственного научного совета по сварке и родственным технологиям, г. Санкт-Петербург, 25-26 мая 2005 г.-СПб: ИС России.- С. 6-10.