

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАНА

ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени Абу Райхана Беруни

На правах рукописи

УДК 620.301.312

АБДУГАППАРОВ ШАВКАТ ФАХРИДДИНОВИЧ

На тему:

“Создание устройства автоматического регулирования малой мощности”

Специальность – 5А520203 –Электрические станции

Дипломная работа на соискание ученой степени
бакалавриата технических наук

Научный руководитель -
кандидат технических наук,
доцент Рахимжанов Р.Х.

Ташкент – 2010

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
Глава 1. Вопросы управления устройствами систем электроснабжения.....	9
1.1. Назначение и условия работы преобразователей токов в напряжение в системах управления устройствами электроснабжения. . .	9
1.2. Физические основы преобразования переменных токов в устройствах управления.....	17
Глава 2. Поиск принципов построения многофазных электромагнитных преобразователей тока в напряжение	19
2.1. Общие вопросы поиска принципов построения электромагнитных преобразователей тока в напряжение	29
Глава 3. Математические модели многофазных электромагнитных преобразователей токов в напряжение	36
3.1. Математическая модель магнитной цепи электромагнитных преобразователей тока в напряжение	46
3.2. Математическая модель цепей различной физической природы конструкции многофазных электромагнитных преобразователей трехфазных токов в напряжение	51
Глава 4. Исследование основных характеристик	53
4.1. Основные характеристики многофазных электромагнитных преобразователей тока в напряжение.	55
Заключение	61
Список использованной литературы.....	62
Приложения	67

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Управление режимами работы источников активной мощности и энергии и других устройств систем электроснабжения: генераторов, трансформаторов, линии электропередач, электродвигателей, а также автоматизированный учет вырабатываемой и потребляемой электрической мощности и энергии основаны на информациях о одно, двух и трехфазных токах, получаемых с помощью трансформаторов тока (ТТ) на основе электромагнитных измерительных преобразователей (ЭИП). Расширение функциональных возможностей преобразователей токов на основе принципа одновременного преобразования токов одной, двух и трех фаз и снижения погрешности преобразования, повышение чувствительности путем линеаризации выходной характеристики, а также достижение стабильности работы этих ЭИП позволяют повысить эффективность применения систем автоматического управления режимами работы устройств электроснабжения. В связи с этим разработка ЭИП с расширенными функциональными возможностями, обеспечивающие преобразование тока одной, двух и трех фаз и высокой точностью в различных режимах систем электроснабжения является актуальной задачей.

Связь диссертационной работы с тематическими планами НИР. Диссертационная работа выполнена в соответствии с планом научно-исследовательских работ Энергетического факультета Ташкентского Государственного Технического Университета «Совершенствование электромагнитных измерительных средств систем управления, учета и контроля электрической энергией и мощностью».

Цель работы. Целью диссертационной работы являются разработка и исследование МФ ЭМПТН на основе ПИО с расширенными

функциональными возможностями, Создание устройства автоматического регулирования малой мощности

Объект и предмет исследования –Преобразователи токов в напряжение с унифицированным выходным сигналом на основе ПИО для систем управления малой мощностью

точность управления, в результате чего более эффективно используются энергетические ресурсы систем электроснабжения.

Реализация результатов. Разработанные МФ ЭМПТН на основе ПИО внедрен в производственный процесс на ОАО ЧТЗ (Чирчикский трансформаторный завод), СП «URGUT ANTER YASHAM», ОАО «Urgut yashil oltini», ООО «Нурли дон» для получения унифицированного выходного сигнала в системе автоматического регулирования реактивной мощностью и энергией источников реактивной мощности - косинусных конденсаторных установок (ККУ) при управлении состоянием магнитных пускателей и контакторов – устройств системы электроснабжения.

ГЛАВА 1

ВОПРОСЫ УПРАВЛЕНИЯ УСТРОЙСТВАМИ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

§1.1. Назначение и условия работы преобразователей тока в напряжении в системах управления устройствами электроснабжения

Современные системы производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии и установки можно условно рассматривать как органическое единство мощного электроэнергетического комплекса (ЭЭК). Возможности развития ЭЭК путем увеличением массы и габаритов электрооборудования, а также созданием запасов в нем – практически исчерпаны. Обеспечении экономичной, надежной и качественной работы ЭЭК все большее зависит от так называемые вторичные системы ЭЭК (ВСЭЭК) – измерения, контроля, управления, регулирования и релейной защиты [24, 53, 59, 72, 118, 123, 128].

ВСЭЭК позволяют не только избежать значительных затрат, необходимых для создания запасов в основном дорогостоящем электрооборудовании ЭЭК, но и решить многие качественно новые задачи эффективного использования энергетических ресурсов и электротехнических устройств [20, 75, 110, 111].

ЭЭК и ВСЭЭК взаимосвязаны системой и устройствами получения, обработки и передачи информации, построенными на основе измерительных преобразователей электрических величин, в частности, одно, двух и трехфазных переменных токов. Необходимость преобразования большого тока в различных отраслях народного хозяйства, возникает при контроле и управлении режимов работы генераторов, электродвигателей, трансформаторов и выпрямительных устройств подстанций, линий

электропередач, потребителей; испытании электротехнического оборудования и аппаратов; учете вырабатываемой и потребляемой активной и реактивной электрической энергии и мощности, где используются измерительные преобразователи одно, двух и трехфазных токов [10, 18, 29, 46, 52, 53, 54, 55, 73, 108, 136, 137].

В табл. 1.1 представлены отдельные объекты систем электроснабжения, использующие преобразователи одно, двух и трехфазного тока для оперативного контроля и управления рабочими режимами, а также их контролируемые параметры.

Таблица 1.1

**Перечень объектов контроля и управления в системах
электроснабжения**

Объекты контроля и управления	Контролируемые параметры
Генераторы	Ток возбуждения, фазные, линейные токи, напряжение, энергия (мощность)
Трансформаторы, повышающие и понижающие	Ток, напряжение, энергия (мощность)
Линии электропередач	Токи, напряжения, энергия
Силовые полупроводниковые преобразователи подстанций	Ток, напряжение, энергия
Синхронные и асинхронные двигатели	Ток возбуждения, фазные, линейные токи, напряжение, энергия (мощность)
Трансформаторы собственных нужд	Фазные, линейные токи, напряжение, энергия (мощность)
Фидера 6 кВ – КРУН (комплектное распределительное устройство наружное)	Фазные, линейные токи, напряжение, энергия (мощность)
ККУ (косинусные компенсирующие устройства)	Фазные, линейные токи, напряжение, энергия (мощность)

В зависимости от целей преобразования преобразователям токов предъявляют требования к точностным характеристикам. Например, при преобразованиях с целью дальнейшего использования в системах контроля и управления требуются высокая надежность устройства для преобразования и стабильность её характеристик, но не требуется очень высокая точность, как

это необходимо, например, в образцовых поверочных установках [26,27,97,98,132]. Более высокая точность преобразований требуется при испытаниях новых изделий – электрических машин, аппаратов и т. д. Для получения необходимого запаса надежности в этих случаях применяют преобразователи токов в 2 – 3 раза более точные, чем в предыдущем случае [26,68,77,97,98,133,138].

Для достижения высокой точности окончательного результата необходимо стремиться к снижению всех составляющих погрешности, в том числе погрешности преобразователей тока и напряжения [27, 40, 61, 62].

Измерительные преобразователи токов (ИПТ), предназначенные для лабораторных и научных исследований отличаются от рассмотренных своим назначением, из чего вытекают их отличия в технических характеристиках и конструктивном исполнении [4, 37, 76]. Они отличаются, прежде всего, широким диапазоном значений преобразуемого тока. Вторая их особенность – существенно более высокая точность. Поэтому именно из ИПТ, предназначенных для лабораторных и научных исследований, формируют номенклатуру для измерений при различных испытаниях электротехнических устройств, приборов для поверочных работ.

Измерение одно, двух и трехфазных токов имеет некоторые свои особенности [10, 25, 44, 49, 52]. Одна из них связана с техническим исполнением самих сильноточных цепей и их геометрическими размерами. Токопроводы в таких цепях – жестко смонтированные массивные стационарные шины или пакеты шин. Разъединение такого токопровода – процесс трудоемкий и далеко не всегда может быть сделано в нужном месте или в нужное время. Следовательно, одним из требований является создание разъемных конструкций ИПТ [20]. Следующая особенность цепей ИПТ – непрерывность режима энергопитания. В линиях электропередач переменного тока, а также на выводах трансформаторов и генераторов

главным требованием служит обеспечение гальванической развязки между измерительной и силовой цепями [20].

Назначение ИПТ – преобразование одно, двух и трехфазных токов, протекающего в устройствах первичных систем, в такой выходной сигнал, информативные параметры которого функционально связаны с информативными параметрами входного сигнала и могут измеряться с заданной точностью [61, 111].

Верхний предел диапазона ИПТ определяется достижением современной энергетики. Максимальные переменные токи, освоенные в промышленности, достигают 70 кА в установившихся режимах, и до 700 кА – в переходных режимах работы электротехнического оборудования [10, 25, 52, 109].

Таким образом, диапазон изменения ИПТ составляет $10 - 7 \cdot 10^5$ А. Создание универсального устройства, позволяющего измерять с требуемой точностью в этом диапазоне – задача очень трудная. Поэтому рекомендуется разбить общий диапазон на следующие поддиапазоны: сравнительно не большие ($10 - 10^2$ А); БТ ($10^2 - 10^4$ А); очень большие ($10^4 - 10^5$ А); сверх большие (10^5 А и более) и для каждого конкретного поддиапазона необходимо рекомендовать тот или иной тип и конструктивное решение ИПТ [10].

При этом ИПТ должны реализовать ряд операций, позволяющих в итоге использовать выходные сигналы преобразователей последующими элементами вторичных систем – систем управления и контроля: 1) нормирование уровня сигнала; 2) динамическое преобразование сигнала; 3) снижение потенциала сигнала по отношению к земле; 4) гальваническое разделение входа и выхода; 5) согласование выходного сопротивления ИПТ и входного сопротивления последующих элементов и устройств вторичных систем; 6) преобразование характера изменения сигнала во времени (аналогового в дискретный); преобразование физической природы сигнала (например, электрического в оптический или механический); 8) передача

энергии, обеспечивающей заданный уровень мощности выходного сигнала [65, 103, 110, 111, 129].

Следует отметить, что в конкретном ИПТ обычно реализуются не все отмеченные операции, а только их часть. В то же время первая, вторая и третья операции являются обязательными, так как без их реализации невозможно дальнейшее использование сигнала во вторичных системах, поэтому в дальнейшем будем их называть основными.

Принципиальная схема использования ИПТ приведена на рис.1.1. Анализ работы этой схемы показывает, что ИПТ является элементом систем управления, контроля и регулирования режимами работа ЭЭК.

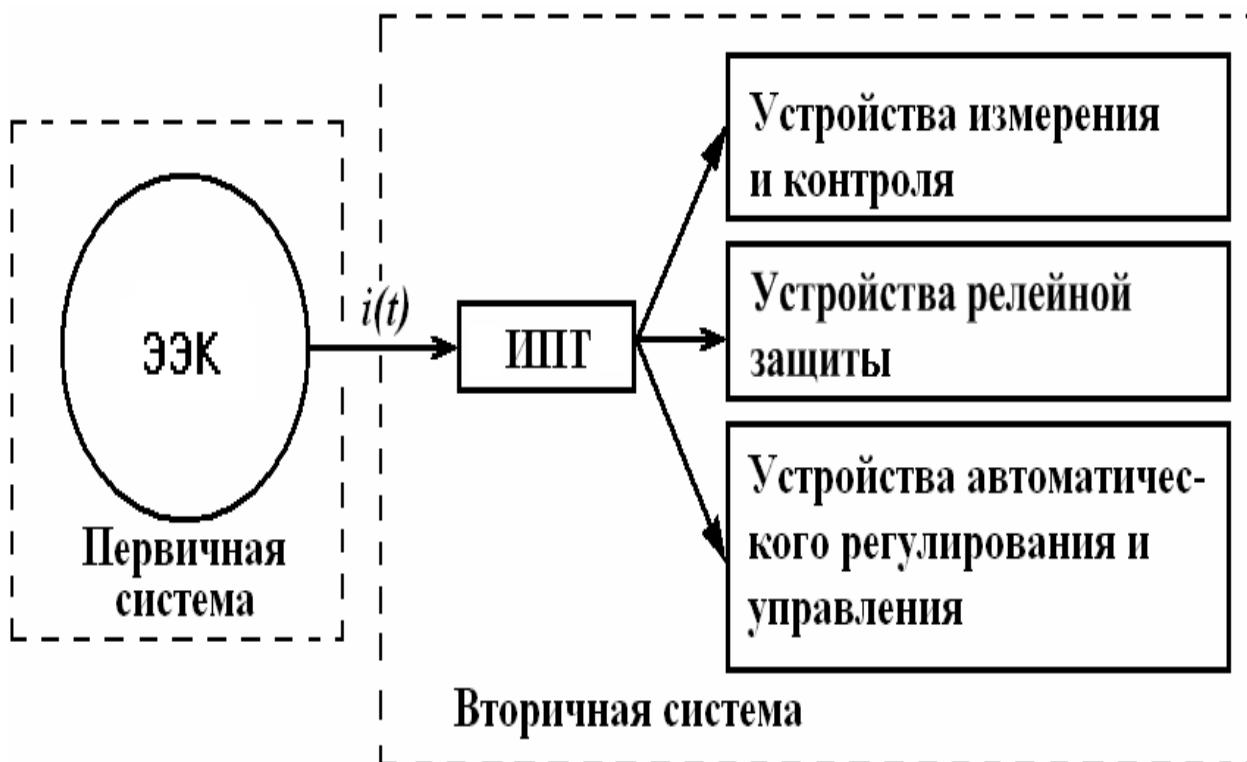
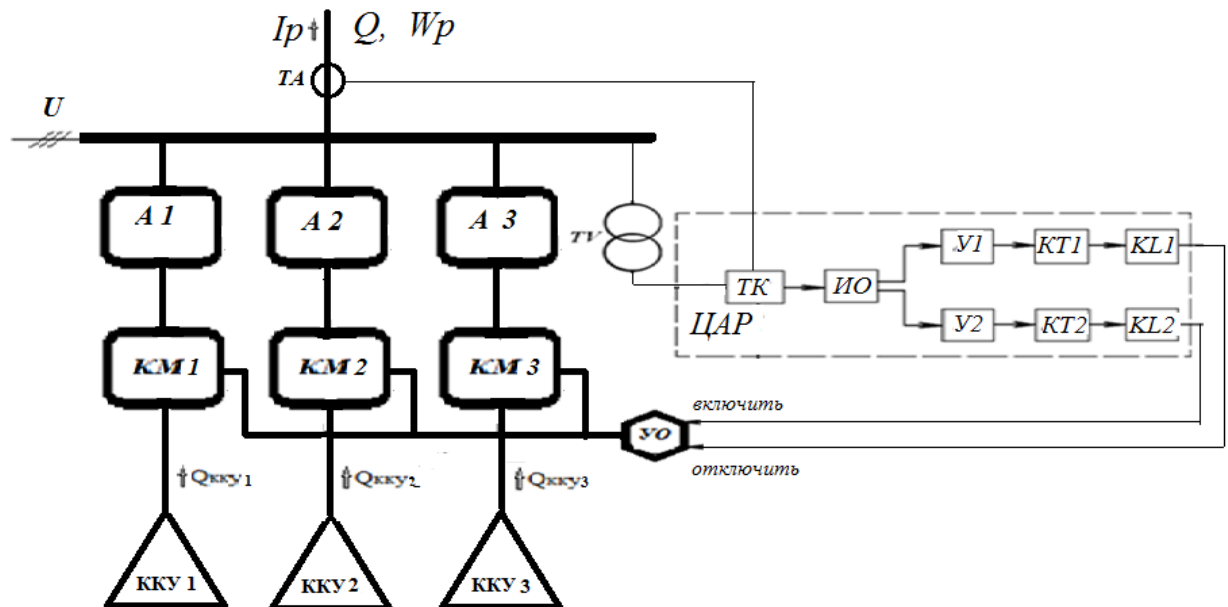


Рис. 1.1. Функциональная схема использования ИПТ в системах электроснабжения

На рис. 1. представлена функциональная схема автоматического регулирования источников реактивной мощности Q и энергии W_p на основе напряжения U и тока I_p электрической сети [4].



$A1, A2, A3$ – автоматические выключатели, $KM1, KM2, KM3$ – магнитопускатели; TA, TV – преобразователи тока и напряжения; TK – блок токовой компенсации; $ИО$ – измерительный орган; $У1, У2$ – усилители; $КТ1, КТ2$ – элементы выдержки по времени; $КЛ1, КЛ2$ – исполнительные органы; $УО$ – управляющий орган; $ЦАР$ – цифровой автоматический регулятор источника реактивной мощности; $ККУ$ – источник реактивной мощности – косинусная конденсаторная установка

Рис. 1. Функциональная схема системы автоматического регулирования источников реактивной мощности.

Принцип регулирования величиной реактивной мощности и энергии на основе представленной функциональной схемы заключается в изменении состояния якоря электромагнита магнитного пускателя КМ путем регулирования тока на её обмотке. Напряжения U , регулируемое на основе источника реактивной мощности $Q_{кку}$ – косинусной конденсаторной установки ($ККУ$) подается на цифровой автоматический регулятор ($ЦАР$) через трансформатор напряжения TV . С трансформатора TV напряжение

поступает блок токовой компенсации *ТК*. Благодаря токовой компенсации обеспечивается так называемое «встречное регулирование», необходимое для поддержания напряжения на шинах у потребителя электрической энергии. Блок токовой компенсации *ТК*, подключенный к трансформатору тока *ТА*, учитывает падение напряжения в линии, питающей потребителя. Напряжение с учетом токовой компенсации подается на измерительный орган *ИО*, который в зависимости от результатов измерений направляет информацию на усилитель *А1* в тракт «Прибавить» или *А2* в тракт «Убавить». С помощью элементов *КТ1* и *КТ2* создается выдержка времени на срабатывание обеспечивающая отстройку контролируемого напряжения от кратковременных бросков. Далее сигнал поступает на исполнительный орган *КЛ1* и *КЛ2* и на управляющий орган – обмотку электромагнита магнитного пускателя (*КМ*), который управляет силовую цепь источника реактивной мощности *ККУ*.

1.2. Физические основы преобразования переменных токов в устройствах управления

Принципиально для измерения одно, двух и трехфазных токов может быть использовано любое его физическое (электрическое, механическое, тепловое, магнитное и т.д.) проявление [25, 27, 105]. Так, измерение одно, двух и трехфазных токов (*I*) возможно на основании определения падения напряжения (*U*) на резистивном, индуктивном и емкостном элементах с известными соответствующими сопротивлениями (*R*, *X_L* и *X_C*). Измерение в этом случае осуществляется контактным методом, а физической основой функционирования служит закон Ома:

$$U = Iz, \quad (1.1)$$

где *z* - полное сопротивление цепи, Ом.

Измерение одно, двух и трехфазных токов также возможно на основании определения количества тепла (W), выделяемого на резисторе с известным сопротивлением (R) за определенный промежуток времени (t) при прохождении через него измеряемого тока (I) [92]. Физической основой функционирования этого способа измерения одно, двух и трехфазных токов служит закон Джоуля-Ленца

$$W = I^2 R t . \quad (1.2)$$

Бесконтактное измерение токов возможно только благодаря магнитному полю вокруг проводника с током и измерению его параметров. Математическая связь преобразуемого тока с параметрами электрического и магнитного полей описывается системой следующих уравнений Максвелла [31, 51]:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \bar{H} &= \bar{J} ; \operatorname{rot} \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} ; \operatorname{div} \bar{B} = 0 ; \\ \operatorname{div} \bar{D} &= \rho ; \bar{B} = \mu_a \bar{H} ; \bar{D} = \varepsilon_a \bar{E} , \end{aligned} \quad (1.3)$$

где \bar{H} и \bar{E} – векторы напряженности соответственно магнитного и электрического полей; \bar{J} – вектор плотности электрического тока; \bar{B} – вектор магнитной индукции; \bar{D} – вектор электрического смещения; ρ – плотность электрического заряда; μ_a и ε_a – соответственно абсолютные магнитная и электрическая проницаемости.

Первое уравнение Максвелла в интегральной форме, называемое законом полного тока, гласит: циркуляция вектора напряженности магнитного поля \bar{H} по замкнутому контуру l равна току, пронизывающему данный контур [51, 92], т.е.

$$\oint \bar{H} d\bar{l} = i . \quad (1.4)$$

Уравнение (1.4) характеризует связь тока с его магнитным полем в отсутствии ферромагнитного сердечника. В этом случае магнитодвижущая сила (МДС) интегрируется равномерной намоткой витков измерительной обмотки и каждый виток обмотки эквивалентен отдельной точке измерения напряженности, а в целом можно считать, что количество точек равно числу витков одного ряда измерительной обмотки [25].

1.3. Сравнительный анализ существующих преобразовательных устройств управления

В настоящее время известно значительное количество ИПТ и это создает определенные трудности при выборе необходимого типа, конкретной конструкции этих преобразователей. В этой связи целесообразно классификация ИПТ, которая позволит выявить принципиальные и в некоторой степени их конструктивные особенности. Несмотря на значительное количество работ в этой области, в настоящее время отсутствует обобщенная классификация ИПТ [25, 28, 32, 52, 63, 65, 69, 111]. Классификации же, приведенные в работах [24, 63, 91], включают в себя не все разновидности известных ИПТ.

На рис. 1.3 приведена разработанная автором классификация ИПТ. Согласно этой классификации, существующие в настоящее время ИПТ подразделяются по способу их включения в измеряемую цепь на два больших класса: 1) ИПТ, основанные, как отмечалось 1.2, на определении падения напряжения на резистивном, индуктивном и емкостном элементах с известными сопротивлениями, включенными в измеряемую цепь, т.е. контактные ИПТ; 2) ИПТ, основанные на использовании магнитного поля, создаваемого измеряемым током, т.е. бесконтактные.

Принципиально для измерения токов можно использовать электротепловые и электрохимические эффекты, но из-за сложности

осуществления и низких метрологических характеристик они не нашли практического применения [4, 25].

По типу используемых магниточувствительных элементов бесконтактные ИПТ делятся на электрометрические, электромеханические, индукционные, магнитогальванические, магниторезонансные и магнитооптические [25, 92]. По типу преобразования они подразделяются на ИПТ прямого преобразования и уравнивающего преобразования.

Сравнительный анализ основных характеристик существующих типов ИПТ показывает, что контактные преобразователи, несмотря на инвариантность показаний к внешним магнитным полям и ферромагнитным массам, отсутствие потребности к вспомогательным источникам питания, имеют относительно большую массу и потребляемую мощность, низкую надежность, сложность осуществления многопредельности, их практически невозможно применять в системах управления и контроля, цепях высокого напряжения, а также они обладают большими динамическими погрешностями [9, 25, 92].

Физической основой построения электромеханических ИПТ является силовое взаимодействие измеряемого тока со вспомогательными магнитными полями или ферромагнитными массами [27,92]. Они обладают рядом преимуществ, такими как простота конструкции, высокая надежность, абсолютная автономность, возможность осуществления многопредельности и измерения постоянного, переменного и импульсного токов. Этим объясняется тот факт, что в настоящее время большинство промышленных клещевых ИПТ на токи от 10 до 5000 А изготавливаются на основе электромеханического измерительного механизма [52]. В табл. 1.3 приведены основные характеристики лучших зарубежных образцов клещевых электромеханических ИПТ (фирмы «Кролигтон Паркинсон» Англия, Э784, Э785 «ВНИИЭП» Россия) [63].

В основе работы магниторезонансных ИПТ лежит явление, заключающееся в том, что атомные частицы вещества в результате магнитных дипольных переходов между энергетическими подуровнями, создаваемых магнитным полем, поглощают и излучают энергию высокой частоты [113]. В зависимости от вида резонирующих частиц различают несколько видов магнитного резонанса: ядерный, электронный, парамагнитный и др. При измерении больших токов применяются преобразователи, основанные на явлении ядерного магнитного резонанса (ЯМР). В таких ИПТ под действием внешнего магнитного поля ядра атомов вещества поляризуются и начинают вращаться (прецессировать) вокруг новой оси, совпадающей с вектором магнитной индукции внешнего поля.

Таблица 1.3

Основные технические характеристики зарубежных клещевых
электромеханических ИПТ

Страна, название организации, тип ИПБТ	Пределы измерения, А	Погреш- ность, %	Рабочее напря- жение, кВ	Общая длина магни- топрово- да, мм	Размеры окна, мм
Англия, фирма «Кролигтон Паркинсон», Тип А	50, 75, 100, 150, 200	2,0	0,6	283	41
Тип В	200, 300, 400, 500, 600	2,0	0,6	283	41
Россия, «ВНИИЭП» Тип Э784	30, 100, 300	5,0	0,65	345	75x60
Тип Э785	150, 300	5,0	0,65	345	75x60

Существенное достоинство магнитогальванических ИПТ – достаточно высокое быстродействие, позволяющее использовать их в системах

управления и контроля переменных параметров и величин. Недостатки подобных ИПТ обусловлены их конструктивной и технической сложностью, недостаточной надежностью, наличием в схеме вспомогательного источника питания, усилителей, цепей коррекции и т.д. В связи с вышеуказанными недостатками магнитогальванические ИПТ не нашли широкого применения в системах управления и контроля режимами работы ЭЭК на переменном токе.

Наиболее распространенный вид ИПТ – трансформаторы тока (ТТ) промышленной частоты [57, 79–86, 93, 94, 95]. Все другие бесконтактные ИПТ требуют дополнительного источника питания того или иного рода, что усложняет схему и снижает надежность. Большие трудности возникают в том случае, когда требуется, чтобы дополнительный источник находился на высоком потенциале. В данном случае положение усугубляется также тем, что дополнительный источник питания должен не просто давать энергию, а иметь определенные метрологические характеристики, обеспечивающие заданную точность работы всего ИП [27]. Кроме того, многопредельность, т.е. регулирование диапазона преобразования у ТТ обеспечивается довольно просто [34, 35]. В настоящее время на предприятиях нашей республики в эксплуатации находятся несколько сот тысяч ТТ с номинальными первичными токами от 25 до 3000 А (наиболее распространенная номенклатура). Относительно менее многочисленны ТТ на первичные токи от 3000 А до 10000 А и ещё менее распространены ТТ на токи 20-50 кА [10].

Основными элементами ТТ, участвующими в преобразовании тока, являются первичная и вторичная обмотки, намотанные на магнитопровод. Первичная обмотка включается последовательно в токопровод и постоянно обтекается током I_1 . Значение первичного тока I_1 не зависит от параметров трансформатора, а определяется только первичной цепью. К вторичной обмотке подключаются измерительные приборы или реле, и при работе ТТ вторичная обмотка должна быть всегда замкнута на нагрузку.

На рис. 1.8 [28] изображены только те элементы классического трансформатора, которые участвуют в преобразовании тока.

Из принципиальной схемы ТТ видно, что первичная и вторичная обмотки изолированы друг от друга на полное рабочее напряжение и между ними нет электрической связи. Так как обмотки намотаны на один и тот же сердечник, то они являются магнитосвязанными [32, 51]. Принцип действия ТТ состоит в следующем. При протекании тока I_1 по первичной обмотке в магнитопроводе трансформатора создается переменный магнитный поток Φ_1 , изменяющийся с той же частотой, что и ток I_1 . Магнитный поток, пересекая витки вторичной обмотки, индуцирует в ней ЭДС. Если вторичная обмотка замкнута на нагрузку, то по ней под действием индуцируемой ЭДС будет протекать ток I_2 . Индукционный ток всегда имеет такое направление, что он ослабляет действие причины, возбуждающей этот ток согласно правилу Ленца [32].

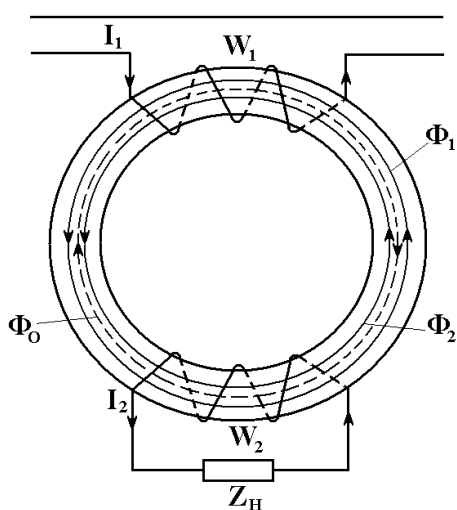


Рис.1.8. Принципиальная схема классических ТТ

Поэтому ток, проходящий по вторичной обмотке I_2 , создает в магнитопроводе переменный магнитный поток Φ_2 , близкий по значению, но направленный встречно магнитному потоку Φ_1 . В результате сложения магнитных потоков Φ_1 и Φ_2 в магнитопроводе устанавливается магнитный поток Φ_0 , составляющий несколько процентов от магнитного потока Φ_1 . Этот поток Φ_0

передает энергию (информацию) от первичной обмотки во вторичную в процессе преобразования тока.

Витки первичной и вторичной обмоток имеют примерно равное сцепление с магнитопроводом и в каждом витке индуцируется одинаковая

ЭДС. Под воздействием тока I_1 , протекающего в первичной обмотке с числом витков w_1 , создается магнитодвижущая сила (МДС) $F_1 = I_1 w_1$, а во вторичной обмотке с числом витков w_2 , под воздействием протекающего в ней тока I_2 , создается вторичная МДС $F_2 = I_2 w_2$. При отсутствии потерь в процессе преобразовании токов МДС в первичных и вторичных обмотках будут численно равны, но направлены в противоположные стороны.

Для идеального ТТ будет справедливо следующее равенство [28, 122]:

$$F_1 = -F_2, \quad (1.16)$$

или

$$I_1 w_1 = I_2 w_2. \quad (1.17)$$

Из равенства (1.17) вытекает следующее равенство:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{w_1}{w_2} = k, \quad (1.18)$$

где k – коэффициент трансформации идеального ТТ.

Из равенства (1.18) можно получить следующее выражение:

$$I_1 = I_2 \frac{w_2}{w_1} = \frac{I_2}{k}. \quad (1.19)$$

Таким образом, первичный ток I_1 равен измеренному вторичному току I_2 , разделенному на коэффициент трансформации ТТ k . Эта зависимость положена в основу метода измерений тока с помощью измерительного ТТ.

В реальном ТТ преобразование тока сопровождается потерями энергии на создание магнитного потока в магнитопроводе, на гистерезис, нагрев первичной и вторичной обмоток и др.

Поэтому в реального ТТ первичная МДС F_1 должна, кроме создания вторичной МДС F_2 , обеспечить создание дополнительной МДС F_0 , компенсирующей потери энергии при преобразовании тока.

Для реального ТТ уравнение (1.16) примет следующий вид [28]:

$$F_1 = F_2 + F_0, \quad (1.20)$$

или

$$I_1 w_1 = I_2 w_2 + I_0 w_1, \quad (1.21)$$

где I_0 – ток намагничивания, создающий магнитный поток F_0 .

Разделив все члены уравнения (1.21) на w_1 , получим

$$I_1 = \frac{1}{k} I_2 + I_0. \quad (1.22)$$

Формулы для идеального (1.19) и реального (1.22) ТТ отличаются членом I_0 , т.е. реальный ТТ имеет погрешность, определяемую значением I_0 .

Основными отличительными особенностями ТТ от силовых по режимам работы являются следующие [16, 28, 111, 122]:

1. ТТ работает в условиях, близких к короткому замыканию, что является для него нормальным, а для силовых трансформаторов – аварийным режимом.

2. Силовой трансформатор может быть включен в действующую цепь с разомкнутой вторичной обмоткой; между тем работа ТТ с разомкнутой вторичной обмоткой, наоборот совершенно недопустима.

3. Индукция в ТТ не постоянна, а в силовых трансформаторах – постоянна (при постоянном напряжении сети).

4. В силовых трансформаторах индукция измеряется единицами тесла (1,0 – 1,7 Тл), в ТТ – сотыми теслами при нормальном режиме.

5. Ток во вторичной обмотке ТТ в известных пределах не зависит от величины нагрузочного сопротивления во вторичной цепи и в основном следует только за изменениями первичного тока. В силовых трансформаторах ток во вторичной обмотке следует за изменениями нагрузки, т.е. целиком зависит от величины нагрузочного сопротивления. Первичный ток в ТТ совершенно не зависит от режима вторичной обмотки: вторичный ток следует за первичным. В силовых трансформаторах, наоборот, первичный ток следует за изменениями вторичного.

6. Нагрузка ТТ и его погрешности взаимосвязаны. Нагрузка ТТ может быть различной при разных величинах допускаемых погрешностей.

7. ТТ – по существу, измерительное устройство. В нем, как и во всяком трансформаторе, происходит преобразование электрической энергии и выдается известная мощность. Однако главной целью этого устройства является не отдача мощности, а выдача измерительной информации. Поэтому основное в ТТ, как и в измерительном, информирующем устройстве – его точность, т.е. точность и постоянство коэффициента трансформации (чувствительности) в различных режимах его работы, минимальные искажения фазного угла преобразуемого тока, отсутствие искаженной формы кривой тока, удовлетворительные динамические характеристики. Поэтому ТТ рассматривается, в основном, как электромагнитный измерительный элемент систем управления и контроля, характеризуемый статическими, динамическими и метрологическими характеристиками.

1.4. Электромагнитные преобразователи одно, двух и трехфазного тока в напряжение

Электромагнитные преобразователи (ЭМП) одно, двух и трехфазного тока широко применяются на практике преобразования токов и напряжений. Принцип действия таких устройств основан на силовом воздействии измеряемого тока и вспомогательного магнитного поля. В этом смысле они аналогичны электромагнитным или ферродинамическим электроизмерительным устройствам прямого преобразования, поэтому также разделяются на измерительные преобразователи электромагнитного и ферродинамического типов, т.к. содержат магнитопровод, охватывающий токопровод. В узком зазоре магнитопровода расположен подвижный сердечник магнитомягкого материала.

Измерители такого типа используются с 20-х годов для измерения токов в электролизном производстве. Они имеют ряд достоинств (надежность, автономность, возможность измерения постоянного и переменного токов), но их погрешности довольно значительны (2...5 %). В настоящее время они выполняются в виде клещей для бесконтактного измерения токов до 5 кА.

В данной диссертационной работе рассматривается одно, двух и трехфазный преобразователь тока в напряжение. ЭМП (рис.1.1) . имеет первичную обмотку 1 (обмотка возбуждения), к которой подводится электрический ток $I_{\text{эвх}}$ или напряжение $U_{\text{эвх}}$, магнитопровод 2, вторичную измерительную обмотку (ИО) 3, которая нанесена на изоляционную линейку 4, от ИО информация об электрической энергии в виде электрического тока $I_{\text{эвых}}$ или напряжение $U_{\text{эвых}}$ отводится к комплексу обработки информации - нагрузке $Z_{\text{н}}$.

Передача энергии в виде информации из одной обмотки в другую производится путем электромагнитной индукции. Для усиления электромагнитной связи между обмотками последние обычно располагаются на магнитпроводе - ферромагнитном сердечнике 2.

При частоте электрического тока $f < 150$ Гц магнитопровод преобразователя тока или напряжения т.е. ЭМП, изготавливается из листов электротехнической стали толщиной 0,35-0,50 мм. При более высоких частотах применяется более тонкая листовая сталь.

Высококачественные ЭМП весьма малой мощности для измерительных, радиотехнических, счетно-решающих и других устройств изготавливаются также с сердечниками из ферритов, которые представляют собой особый вид магнитодиэлектриков с малыми магнитными потерями.

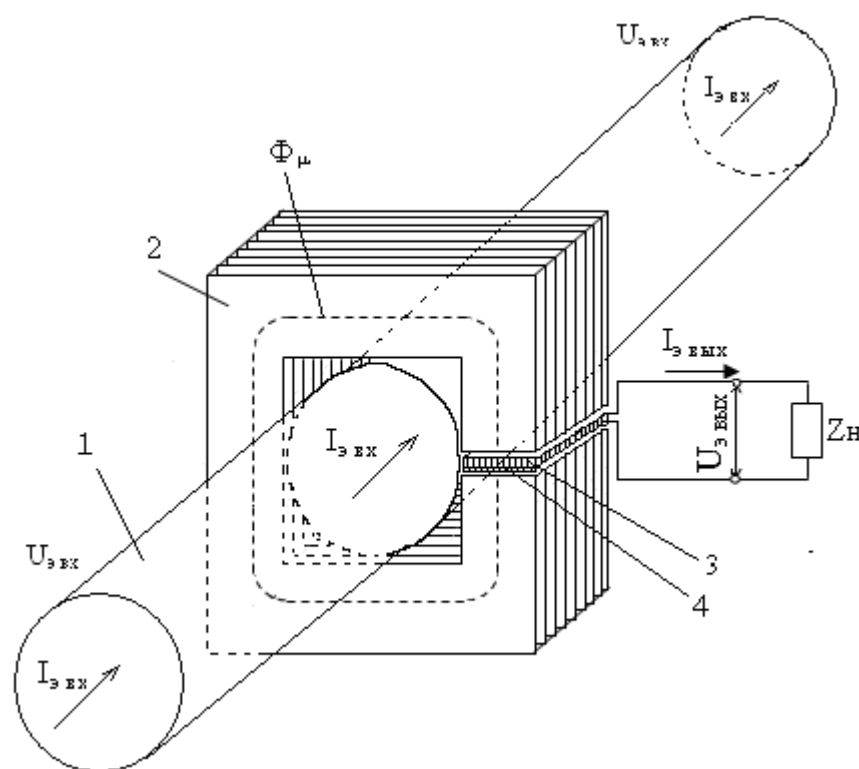


Рис. 1.1 Принцип устройства однофазного ЭМП тока в напряжение

При подключении первичной обмотки ЭМП (рис.1.1) к сети с синусоидальным напряжением $U_{Э ВХ}$ в обмотке возникает ток $I_{Э ВХ}$, который создает синусоидально изменяющийся магнитный поток Φ_{μ} , замыкающийся по сердечнику. Поток Φ_{μ} индуцирует э. д. с. как в первичной – обмотке возбуждения, так и незначительной величины в ИО. При подключении к вторичной обмотке - ИО нагрузки в этой обмотке возникает вторичный ток

$I_{\text{э вых}}$ и на ее зажимах устанавливается некоторое напряжение $U_{\text{э вых}}$. Результирующий магнитный поток сердечника Φ_{μ} создается током обеих обмоток, но в основном о первичной обмоткой – обмоткой возбуждения.

Таким образом, в идеальном ЭМП первичное и вторичное напряжения прямо пропорциональны, а первичный и вторичный токи обратно пропорциональны числам витков соответствующих обмоток. В реальном ЭМП полученные соотношения несколько нарушаются, однако в ЭМП с ферромагнитными сердечниками эти отклонения при нагрузках, близких к номинальным, относительно малы.

ГЛАВА 2 ПОИСК ПРИНЦИПОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МНОГОФАЗНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ТОКА В НАПРЯЖЕНИЕ

§2.1. Поиск принципа проектирование многофазных электромагнитных преобразователей одно, двух и трехфазного тока

Технико-экономические показатели элементов и устройств систем управления и контроля устройствами электроснабжения, в том числе и ЭМП на основе ПИО, могут значительно улучшиться при широком внедрении новых информационных технологий на этапе их поискового проектирования. Основные задачи этого этапа сводятся к анализу, синтезу и выбору проектно-конструкторских решений. В свою очередь это требует анализа и сравнения значительного количества альтернативных вариантов решений [9, 130].

Имеющиеся системы поискового проектирования на основе баз данных по физическо - техническим эффектам (ФТЭ) предназначены для синтеза технических устройств широкого назначения [2, 114]. В большинстве своем они осуществляют функции централизованного сбора, накопления и хранения информации о ФТЭ, организации автоматизированного

многоаспектного поиска ФЭ и принципов действий технических устройств и технологий. В данной работе использован принцип построения объектно-ориентированных систем информации, предназначенной для эксплуатации специалистами различных предметных областей, представления ФТЭ со словесным описанием причинно-следственной связи. Результатом работы является синтез физического принципа действия (ФПД) технического устройства в виде цепочки последовательных преобразований от входа до выхода. Работа таких систем организована вокруг банков данных ФЭ, причем способ описания данных индивидуален для каждой системы. И если синтез ФПД в таких системах представлен достаточно полно, то лишь в некоторых из них применяется морфологический синтез.

Усложненность формализованного языка описания вызывает определенные трудности при составлении математических моделей описания синтезированных вариантов ФПД, пополнении базы данных по ФТЭ, доступной рядовому пользователю. Отсутствие количественных критериев, необходимых для оценки эксплуатационных характеристик, не позволяет реализовать процедуру отбора наилучших вариантов. Описание ФТЭ не сопровождается конструктивной проработкой технических реализаций.

Известен энергоинформационный метод поискового проектирования технических устройств, основанный на энергоинформационной модели цепей различной физической природы и аппарата параметрических структурных схем (ПСС) [55, 56]. Он позволяет синтезировать ФПЭ элементов и устройств систем управления из элементарных звеньев – физико–технических эффектов (ФТЭ) и параметров цепей различной физической природы (основные соотношения между цепями различной физической природы по энергоинформационной модели цепей и аппарата ПСС приведены в приложении 1). Существенные отличия этого метода от других методов поискового проектирования заключаются в следующем:

–во-первых, сложные физические процессы, протекающие в технических устройствах, расчленяются на процессы в цепях различной физической природы, взаимодействие между которыми отражается наличием ФТЭ;

–во-вторых, используются сосредоточенные, распределенные и изменяющиеся во времени параметры – аналоги (сопротивление, индуктивность, емкость и их производные) для описания технических устройств. При этом предусмотрены всевозможные связи между величинами и параметрами;

–в третьих, используются критерии-уравнения, связывающие величины и параметры для описания процессов определенной физической природы с сосредоточенными, распределенными в пространстве и изменяющимися во времени величинами и параметрами.

Для составления ПСС элементов и устройств систем управления, использующих ФТЭ между цепями различной физической природы, их представляют в виде элементарных преобразований величин одной физической природы в величины или параметры другой физической природы.

Энергоинформационный метод позволяет сделать процесс поискового проектирования элементов и устройств систем управления наглядным, более содержательным, раскрывает как качественные, так и количественные связи. Кроме того, он позволяет автоматизировать процессы выбора ФПД и скелетной конструкции устройства.

С другой стороны, известен морфологический метод поискового проектирования технических устройств [114]. Основанный на анализе и синтезе конструктивных реализаций, он является эффективным средством для поиска новых технических решений, поскольку позволяет полностью учитывать все мыслимые и существующие варианты. Метод базируется преимущественно на комбинаторном принципе поиска решений, позволяя

планомерно закладывать в морфологические множества огромное число аналогов.

Описание всех потенциально возможных решений данной задачи может быть представлено в виде морфологической таблицы (МТ) или морфологического дерева. МТ – классификационная таблица, каждая строка которой представляет собой классификацию множества исследуемых систем по определенному существенному признаку.

Классификационный признак (K_j) – функционально – значимое общее свойство множества конструктивных реализаций ФТЭ. Значение классификационного признака – одно из значений подмножества морфологического множества технических реализаций ФТЭ. МТ – это совокупность разделенных на значения классификационных признаков ФТЭ.

Этап морфологического синтеза технических решений включает:

- 1) оценку всех имеющихся в МТ вариантов по совокупности эксплуатационных характеристик;
- 2) выбор из морфологической матрицы одного или нескольких вариантов технического решения по совокупности эксплуатационных характеристик.

Как известно [114], этап составления МТ, т.е. получение обобщенного описания всех конструктивных реализаций технического устройства, называется морфологическим анализом, а этап извлечения из МТ конструктивных реализаций технического устройства – морфологическим синтезом. Задачей последнего этапа является построение скелетной конструкции устройства с лучшими значениями выбранной характеристики, например, точности или чувствительности.

Выбранные морфологические признаки должны быть независимыми друг от друга, существенными для любой реализации устройства, охватывающими все аспекты физического явления. МТ, как

многопризнаковая классификация исследуемых технических устройств может служить не только для достижения исходной цели, но и для решения многих задач, например, таких, как организация соответствующих информационных массивов, построение информационно-поисковых систем и т.д. Построение МТ основано на блочном принципе, предполагающем, что каждое значение морфологических множеств подлежит дальнейшей декомпозиции. Таким образом, МТ обладает свойством вложенности, т.е. в качестве значения морфологического признака может выступать система морфологических признаков более глубокого уровня.

Анализ возможностей энергоинформационного и морфологического методов поискового проектирования технических устройств показывает, что каждый метод имеет как свои преимущества, так и недостатки. Поэтому в настоящей диссертации предлагается совмещать положительные стороны этих двух методов: после выбора на основе энергоинформационного метода ФПД в виде ПСС МТ составит для ПСС ЭМП на основе ПИО, а затем, произведя дальнейшую декомпозицию морфологических признаков, составит МТ для каждого ФТЭ, имеющегося в ПСС ЭМП на основе ПИО. Такая методика применения вышеуказанных методов поискового проектирования позволяет резко увеличить количество всевозможных вариантов конструктивных реализаций ЭМП на основе ПИО и в конечном итоге выбрать ЭМП, наиболее полно отвечающее требованиям систем управления и контроля.

2.2. Основы построения МФ ЭМП с повышенной точностью и расширенными функциональными возможностями

Как известно [13, 28] и как отмечалось в первой главе диссертации, классические трансформатор тока в котором расширение функциональных возможностей, унификация выходного сигнала и повышение точности осуществляется регулированием количества витков обмоток при больших

значениях первичного тока что требуется применять специальные дугогасящие камеры и регулировочные устройства. В данной диссертации предложена новая конструкция с повышенной точностью и расширенными функциональными возможностями [22, 87]. На рис. 2.5 показан разработанный ЭМП на основе ПИО: на рис. 2.5,а – общий вид конструкции, а на рис. 2.5,б – изоляционные пластинки с плоской измерительной обмоткой.

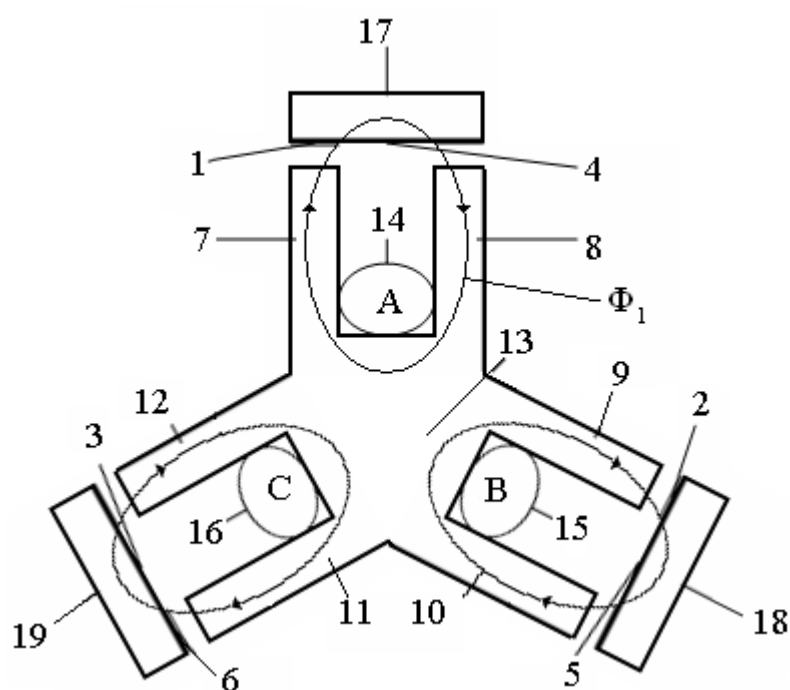


Рис.2.5.а. Общий вид конструкции МФ ЭМП на основе ПИО

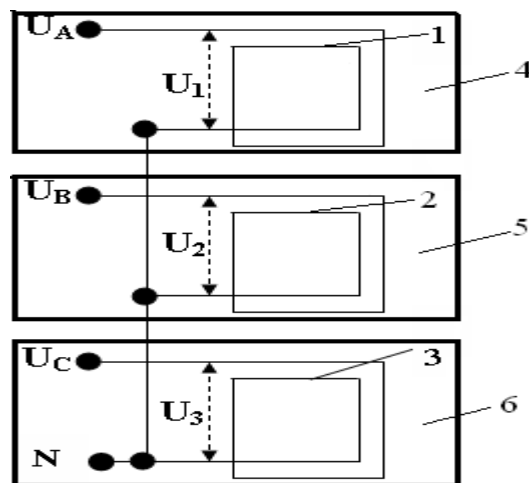


Рис. 2.5,б – Изоляционные пластинки с плоской измерительной обмоткой.

ЭМП содержит (рис.2.5.) ПИО 1,2 и 3, изоляционные пластинки 4, 5 и 6, стержня 7, 8, 9, 10, 11 и 12, магнитопровод с стречнями трехлучевой звездообразной формы с общим основанием 13, первичные обмотки 14 (фаза А), 15 (фаза В) и 16 (фаза С) и дополнительные сердечники 17, 18 и 19.

Данный ЭМП работает следующим образом.

При протекании тока в одной 14, второй 15 или третьей 16 фазах электрической сети, в стержнях 7, 8, 9, 10, 11 и 12 магнитопровода с стречнями трехлучевой звездообразной формы с общим основанием 13 появляются магнитные потоки Φ_1 , Φ_2 и Φ_3 , которые в зазорах между торцами стержней 7, 8, 9, 10, 11 и 12 магнитопровода с стречнями трехлучевой звездообразной формы и дополнительными сердечниками 17, 18 и 19 пересекают витки ПИО 1,2 и 3, при этом :

$$\Phi_1 = (I_A * W_{п1}) / R_{\mu 1} , \quad (1)$$

$$\Phi_2 = (I_B * W_{п2}) / R_{\mu 2} ; \quad (2)$$

$$\Phi_3 = (I_C * W_{п3}) / R_{\mu 3}, \quad (3)$$

где I_A , I_B , I_C – первичные фазные токи, протекающие по токопроводам трехфазной электрической сети,

$W_{п1}$, $W_{п2}$, $W_{п3}$ – числа витков первичной обмотки возбуждения (в данной конструкции $W_{п1} = W_{п2} = W_{п3} = 1$ – каждая первичная обмотка в виде одного витка одна первичная обмотка располагается в выемке между стержнями магнитопровода),

$R_{\mu 1} = R_{\mu 2} = R_{\mu 3}$ – соответственно суммарные магнитные сопротивления стержней магнитопровода с стержнями трехлучевой звездообразной формы, воздушного зазора и дополнительного сердечника на пути магнитных потоков Φ_1 , Φ_2 и Φ_3 .

Напряжение на выходе каждой ПИО U_1 , U_2 , и U_3 , определяются в зависимости взаимовлияния магнитных потоков в стержнях магнитопровода с стержнями трехлучевой звездообразной формы (рис 2.5.а):

$$U_1 = 4.44 * f * W_{в1} * \Phi_1 , \quad (4)$$

$$U_2 = 4.44 * f * W_{в2} * \Phi_2 , \quad (5)$$

$$U_3 = 4.44 * f * W_{в3} * \Phi_3 , \quad (6)$$

где : $W_{в1}$, $W_{в2}$, $W_{в3}$ – числа витков ПИО,

$W_{в} = W_{в1} = W_{в2} = W_{в3}$ –ПИО выполняются с одинаковыми числами витков $W_{в}$.

f – частота питающей электрической сети.

Выходные напряжения U_a , U_b и U_c ПИО одно, двух или трехфазного тока в напряжение определяются на основе соединения ПИО :

$$U_a = U_1 \quad (8)$$

$$U_b = U_2 ; \quad (9)$$

$$U_c = U_3 . \quad (10)$$

Следовательно, магнитные потоки Φ_1 , Φ_2 и Φ_3 , созданные токами одной фазы IA, двух фаз: IA и IB или IB и IC и трех фаз : IA, IB и IC электрической сети, в трех торцах стержней 7, 8, 9, 10, 11 и 12 магнитопровода с стержнями трехлучевой звездообразной формы и с общим основанием 13, и дополнительными сердечниками 17, 18 и 19 позволяют получить информацию о токах электрической сети в виде выходных напряжении U_a , U_b и U_c ПИО 1, 2 и 3, расположенные неподвижно на изоляционных пластинках 4, 5 и 6 с напряжениями U_1 , U_2 , и U_3 с унифицированной величиной (до 25 В) на выходе.

2.3 МФ ЭМП с расширенными функциональными возможностями и упрощенной конструкцией.

Задачей МФ ЭМП является упрощение конструкции и расширение функциональных возможностей устройства преобразования тока в напряжение за счет одновременного преобразования токов одной, двух или трех фаз в электрических сетях.

Поставленная задача решается тем, что в ЭМП - устройстве преобразования тока в напряжение магнитопровод с одним общим основанием выполнен с параллельными стержнями обеспечивающие выемки, в которых неподвижно расположены первичные обмотки возбуждения в виде одно, двух и трехфазных проводов электрической сети, причем напротив каждой выемки магнитопровода в зазоре между дополнительными

сердечниками расположены по одной плоской измерительной катушке, укрепленной на неподвижной изоляционной пластинке.

Выполнение магнитопровода с одним общим основанием и с параллельными стержнями, на выемках которых расположены первичные обмотки возбуждения, а также расположения плоских измерительных катушек между дополнительными сердечниками позволяет уменьшить количество измерительных катушек и привести их количество в соответствие с количеством первичных обмоток, что существенно упрощает конструкцию преобразователя и обеспечивает возможность преобразования токов одной, двух и трех фаз электрической сети самостоятельно и повышая тем самым функциональные возможности преобразователя.

На чертежах представлена конструкция предлагаемого ЭМП : на рис 2.6.а. – общий вид конструкции ЭМП; на рис.2.6.б. – изоляционные пластинки с плоскими измерительными катушками.

ЭМП на основе ПИО содержит (рис 5.2.1.) магнитопровод с общим основанием 1 и с четырьмя параллельными стержнями 2, 3, 4 и 5; первичные обмотки 6 (фаза А), 7 (фаза В), и 8 (фаза С) в виде одно, двух и трех проводов электрической сети расположенных в выемках параллельных стержней; ПИО 9, 10 и 11 расположены между дополнительными сердечниками 12, 13, 14 и 15 на изоляционных пластинках 16, 17 и 18 (рис 5.2.2).

ЭМП работает следующим образом.

При протекании тока в одной 6, второй 7 или третьей 8 первичных обмоток фазных токов электрической сети, в параллельных стержнях 2, 3, 4 и 5 магнитопровода с общим основанием 1, появляются магнитные потоки $\Phi_{\mu 1}$, $\Phi_{\mu 2}$ и $\Phi_{\mu 3}$, которые в зазорах между торцами дополнительных сердечников 12, 13, 14 и 15 пересекают витки ПИО 9, 10 и 11, при этом :

$$\Phi_{\mu 1} = (I_A * W_{\pi 1}) / R_{\mu 1} , \quad (1)$$

$$\Phi_{\mu 2} = (I_B * W_{\pi 2}) / R_{\mu 2} , \quad (2)$$

$$\Phi_{\mu 3} = (I_C * W_{\pi 3}) / R_{\mu 3} , \quad (3)$$

где: I_A , I_B , I_C - первичные фазные токи, протекающие по токопроводам трехфазной электрической сети;

$W_{\pi 1}$, $W_{\pi 2}$, $W_{\pi 3}$ - числа витков первичной обмотки возбуждения (в данной конструкции $W_{\pi 1} = W_{\pi 2} = W_{\pi 3} = 1$ - т.е. одна первичная обмотка располагается в выемке между параллельными стержнями магнитопровода с общим основанием) ;

$R_{\mu 1} = R_{\mu 2} = R_{\mu 3}$ - соответственно суммарные магнитные сопротивления двух стержней магнитопровода с общим основанием, воздушного зазора и участков дополнительного сердечника на пути магнитных потоков $\Phi_{\mu 1}$, $\Phi_{\mu 2}$ и $\Phi_{\mu 3}$,

причем :

$$R_{\mu 1} = 2 \times R_{\mu \text{ м}} + R_{\mu \text{ серд}} + R_{\mu \text{ возд}} ,$$

$$R_{\mu \text{ м}} = l_{\mu \text{ м}} / (4 \times \pi \times F) ,$$

$$R_{\mu \text{ серд}} = l_{\mu \text{ серд}} / (4 \times \pi \times F),$$

$$R_{\mu \text{ возд}} = (2 \times \delta + \delta_1) / (4 \times \pi \times F),$$

где $R_{\mu \text{ м}}$ - магнитное сопротивление одного стержня магнитопровода ;

$R_{\mu \text{ серд}}$ - магнитное сопротивления участков дополнительного

сердечника;

$l_{\mu \text{ м}}$ – активная длина стержней магнитопровода и по которой протекает магнитный поток Φ_{μ} ;

$R_{\mu \text{ серд}} = l_{\mu \text{ серд}} / (4 \times \pi \times F)$ – магнитное сопротивление участков дополнительного сердечника;

$l_{\mu \text{ серд}}$ – активная длина участков дополнительного сердечника, по которой протекает магнитный поток Φ_{μ} ;

$F = m \times n$ – сечение общего основания и параллельных стержней магнитопровода и участков дополнительного сердечника;

$R_{\mu \text{ возд}}$ – магнитное сопротивление воздушных зазоров между стержнями магнитопровода, участков дополнительного сердечника и воздушного зазора между торцами участков дополнительного сердечника, причем:

$$R_{\mu \text{ возд}} \gg R_{\mu \text{ и}} \text{ и } R_{\mu \text{ возд}} \gg R_{\mu \text{ серд}} ;$$

δ – длина воздушного зазора между торцами параллельных стержней магнитопровода с общим основанием и участков дополнительного сердечника ,

δ_1 – длина воздушного зазора между торцами участков дополнительного сердечника,

$\pi = 3,14$ – константа.

Э.д.с на выходе каждой ПИО E_1 , E_2 , и E_3 , определяются в зависимости от величины магнитного потока в стержнях магнитопровода с общим основанием, в воздушных зазорах, дополнительных сердечниках, числом витков плоских измерительных катушек и частотой питающей электрической сети (рис.2.6):

$$E1 = 4,44 * f * W_{\text{пю}} 1 * \Phi_{\mu 1} , \quad (4)$$

$$E2 = 4,44 * f * W_{\text{пю}} 2 * \Phi_{\mu 2} , \quad (5)$$

$$E3 = 4,44 * f * W_{\text{пю}} 3 * \Phi_{\mu 3} , \quad (6)$$

где : $W_{\text{пю}} 1, W_{\text{пю}} 2, W_{\text{пю}} 3$ – числа витков плоских измерительных катушек;

$W_{\text{пю}} = W_{\text{пю}} 1 = W_{\text{пю}} 2 = W_{\text{пю}} 3$ – плоские измерительные катушки выполняются с одинаковыми числами витков равными $W_{\text{пю}}$;

f – частота питающей электрической сети.

Выходные напряжения U_a , U_b и U_c преобразователя тока в напряжение определяются на основе числа витков ПИО (в данном случае на каждой катушке одна ПИО):

$$U_a = E1 ; \quad (8)$$

$$U_b = E2 ; \quad (9)$$

$$U_c = E3 . \quad (10)$$

Следовательно, магнитные потоки $\Phi_{\mu 1}$, $\Phi_{\mu 2}$ и $\Phi_{\mu 3}$, созданные токами одной фазы I_A , двух фаз: I_A и I_B или I_B и I_C и трех фаз : I_A , I_B и I_C электрической сети, в торцах магнитопровода с общим основанием 1 шириной m и высотой n , с параллельными стрижнями 2, 3, 4 и 5, причем в

воздушных зазорах между параллельными стержнями расположены токопроводы трех фаз IА, IВ и IС электрической сети позволяют получить информацию о токах электрической сети в виде напряжении U_a , U_b и U_c на выходе ПИО 9, 10 и 11, расположенных неподвижно на изоляционных пластинках 16, 17 и 18, в зазорах между дополнительными сердечниками 12, 13, 14 и 15.

Выполнение магнитопровода с одним общим основанием и с параллельными стержнями, на выемках которых расположены первичные обмотки возбуждения, а также расположения ПИО между дополнительными сердечниками позволяет уменьшить количество ПИО и привести их количество в соответствие с количеством первичных обмоток, что существенно упрощает конструкцию преобразователя и обеспечивает возможность преобразования токов одной, двух и трех фаз электрической сети и повышает тем самым функциональные возможности преобразователя.

ГЛАВА 3

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ МНОГОФАЗНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ТОКОВ В НАПРЯЖЕНИЕ

3.1. Математическая модель однородных и неоднородных магнитных цепей преобразователей МФ ЭМП

Классические методы расчета магнитных цепей трудоемки, весьма приближенны и не всегда позволяют учесть особенности данных преобразователей информации - ЭМП. Разнообразные численные методы расчета с применением ЭВМ, хотя и обеспечивают достаточную точность результатов, позволяют учесть влияние различных факторов, свойства материалов и т.д., однако осложняются большим объемом вычислений. Поэтому представляется более целесообразным совершенствовать вычислительные методы расчета, в частности, математические модели цепи преобразования [1-3].

Топологические методы анализа и расчета основаны на представлении цепей ЭМП в виде информационно-энергетической моделей – направленных связанных графов. Применение таких методов анализа связано с широким использованием ЭВМ, совершенствованием и дальнейшим развитием рассматриваемых преобразователей, улучшением их параметров, уменьшением габаритов известных преобразователей информации. Эффективное использование ЭВМ, в свою очередь, требует разработки более формализованных и экономичных алгоритмических методов расчета [4-7].

На основе магнитной цепи с поперечно и продольно распределенными параметрами ознакомились с алгоритмом - ходом построения графовой модели цепи или конструкции, так как эти цепи или конструкции являются основными элементами ЭМП.

Под магнитными цепями ЭМП с продольно распределенными параметрами будем понимать такие цепи, в которых магнитные параметры $\Pi(i, j, k)$ (или $\Pi_{\mu}(i, j, k)$, здесь μ - индекс означает магнитный характер параметра или величины) распределены в направлении, параллельном осевой линии магнитопровода. Магнитными цепями ЭМП с поперечно распределенными параметрами будем понимать такие цепи, в которых поперечные магнитные параметры $\Pi_0_{\mu}(i, j, k)$ распределены в направлении, нормальном к осевой линии магнитопровода. Под магнитными цепями ЭМП с вертикально распределенными параметрами будем понимать такие цепи, в которых магнитные параметры $\Pi 1_{\mu}(i, j, k)$ распределены в направлении, параллельном осевой линии магнитопровода.

Рассмотрим более подробно особенности расчета этих цепей или конструкции и исследуем законы распределения магнитных потоков Φ_{μ} (или I), магнитных напряжений F_{μ} (или U) в них на примере обобщенных моделей несколько вариантов в виде магнитной цепи сосредоточенными (модели 1 и 2) и с поперечно, продольно и вертикально распределенными параметрами (модели 3, 4, 5, 6, 7 и 8). Реальная физическая, в нашем случае магнитная, цепь ЭМП заменяется эквивалентной цепью (когда $i \times j$) или пространством (когда $i \times j \times k$). Параметры эквивалентной цепи или конструкции определяются на основе геометрических размеров и с учетом удельных на единицу длины распределенных параметров. Тогда сопротивления элементарных участков эквивалентной цепи или конструкции определяются из выражений:

$$\Pi_{\mu i \times j \times k} = \Pi_{\mu i \times j \times k} \times \Delta X_i,$$

$$\Pi_{0 \mu i \times j \times k} = \Pi_{\mu i \times j \times k} \times \Delta X_j,$$

$$\Pi 1_{\mu i \times j \times k} = \Pi_{\mu i \times j \times k} \times \Delta X_k,$$

где $\Delta X_i = A/N$, $\Delta X_j = B/M$, $\Delta X_k = C/L$ - элементарные участки разбиения цепи; X - длина цепи или конструкции; A - продольная длина цепи или конструкции; B - поперечная длина цепи или конструкции; C - вертикальная длина цепи или конструкции, N, M, L - число участков деления соответственно продольной, поперечной и вертикальной цепей и конструкции.

При составлении эквивалентной модели цепи или конструкции принимаются следующие условия:

1. цепи или конструкции делятся на $N \times M \times L$ элементарных участков длиной ΔX , что в общем случае зависит от условий заданной точности и устойчивости решения задачи;
2. параметры Π , Π_0 и Π_1 в пределах участка ΔX считаются равномерно распределенными. Изменения параметров Π , Π_0 и Π_1 могут происходить скачком на границе участков деления;
3. источники потоков $\Phi_{i \times j \times k}$ (или $Q_{i \times j \times k}$) - напряжений (потенциалов) - участков $F_{i \times j \times k}$ (или $I_{i \times j \times k}$ -реакции) учитываются включением в соответствующие узловые точки.

На основе эквивалентной схемы распределенной цепи или конструкции преобразования строим обобщенную графовую модель распределенной цепи или конструкции ЭМП. Узлы подсоединения воздействующих величин $Q_{i \times j \times k}$ или $U_{i \times j \times k}$ через коэффициенты межцепных связей K_{QU} определяются для конкретной конструкции ЭМП.

Рассмотрим топологический метод расчета цепи ЭМП, представив ее в виде информационно- энергетической модели $F(U, I, \Pi)$, где $U = (U_{111}, U_{121} \dots U_{mnl})$ - множество вершин графа, $I = (I_{111}, I_{121} \dots I_{mnl})$ - множество дуг графа, $\Pi = (\Pi_{111}, \Pi_{121} \dots \Pi_{mnl})$ - множество параметров цепи ЭМП. Рис.2.1.Цепь ЭМП с продольно и поперечно распределенными параметрами.

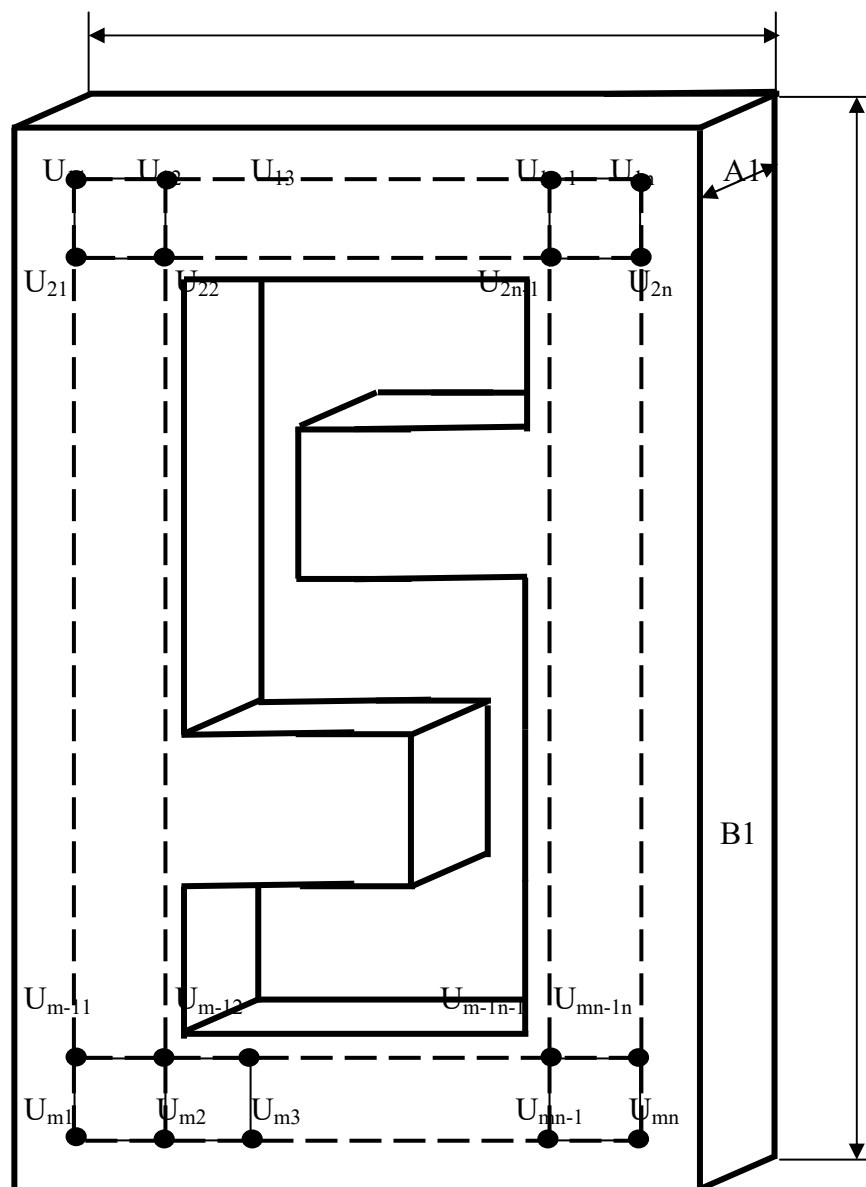


Рис.3.1.Цепь ЭМП с продольно и поперечно распределенными параметрами.

Алгоритм построения информационно- энергетической модели цепи ЭМП представим в виде следующих дискретных шагов:

1. Разобьем сложную цепь преобразования ЭМП на $i \times j \times k$ элементарных участков (с учетом воздушных зазоров, экранов, сосредоточенных участков и потоков рассеяния) по принципу постоянства реакции $I_{i \times j \times k}$, $I0_{i \times j \times k}$ и $I1_{i \times j \times k}$ на каждом участке.

2. Определим предварительное распределение реакции $I_{i \times j \times k}$, $I_{0_{i \times j \times k}}$ и $I_{i \times j \times k}$ по участкам цепи преобразования.

Например: если рассматриваемая цепь преобразования магнитная, то предварительное распределение магнитной индукции по участкам:

$$B_{\mu i \times j \times k} = \Phi_{\mu} * G_{\mu i \times j \times k} / (G_{\mu \Sigma} * \delta_{i \times j \times k})$$

где: Φ_{μ} - магнитный поток в сердечнике;

$G_{\mu i \times j \times k}$ - магнитная проводимость воздушного зазора $i \times j \times k$ -го участка магнитной цепи;

$G_{\mu \Sigma}$ - эквивалентная магнитная проводимость воздушных зазоров магнитной цепи;

$S_{i \times j \times k} = A_{i \times j \times k} \times B_{i \times j \times k}$ - поперечное сечение $i \times j \times k$ -го участка магнитопровода;

$A_{i \times j \times k}$, $B_{i \times j \times k}$ - соответственно ширина толщина $i \times j \times k$ -го участка.

Если напряжение приложенное к намагничивающей катушке U_{Δ} задано, то магнитный поток в сердечнике Φ_0 предварительно определим без учета электрического сопротивления катушки R_0 :

$$I_{\mu} = \Phi_{\mu 0} = \sqrt{2} U_{\Delta} / (\omega * W)$$

где: $\omega = 2\pi f$ - угловая частота;

f - частота сети;

$W_{\text{ов}}$ - количество витков катушки намагничивания – обмотки возбуждения.

В случае малых воздушных зазоров и заданной индукции $B_{\mu 0}$ в сердечнике:

$$B_{\mu i x j x k} = B_{\mu 0} * S_0 / S_{i x j x k}$$

При заданной намагничивающей силе катушки $F_{\mu k}$ и наличии воздушных зазоров общий предварительный поток

$$\Phi_{\mu 0} = G_{\mu \Sigma} \times F_{\mu k}$$

3. Определим комплексную проводимость каждого $i x j x k$ -го участка цепи:

$$\Pi_{i x j x k} = Y_{i x j x k} = Z_{i x j x k}^{-1} = g_{i x j x k} - j b_{i x j x k}$$

где $Z_{i x j x k} = R_{i x j x k} + j X_{i x j x k}$ - комплексное сопротивление $i x j x k$ -го участка.

Если рассматриваемая цепь магнитная, то: $R_{\mu i x j x k} = \rho \times R l_{i x j x k} / S_{i x j x k}$ - активное магнитное сопротивление – параметр $i x j x k$ -го участка, характеризующее свойство магнитного материала намагничиваться под влиянием приложенной силы;

$X_{\mu i x j x k} = \rho \times l_{i x j x k} / S_{i x j x k}$ - реактивное магнитное сопротивление $i x j x k$ -го участка, характеризующее потери намагничивающей силы на вихревые токи и гистерезис;

$\rho \times R_{i x j x k}$, $\rho \times X_{i x j x k}$ - соответственно удельные активное и реактивное магнитные сопротивления $i x j x k$ -го участка магнитопровода определяемые в зависимости от магнитной индукции $B_{\mu i x j x k}$ и магнитной характеристики $\rho_{\mu} = f(B_{\mu})$

$l_{i x j x k}$ - средняя длина $i x j x k$ -го участка магнитопровода .

Если на $i x j x k$ -м участке магнитной системы находится электромагнитный экран, то определим полную комплексную магнитную проводимость экрана

$$Y_{\mu \varepsilon} = Z_{\mu \varepsilon}^{-1}$$

где $\Pi_{\mu} = Z_{\mu} = R_{\mu} + jX_{\mu}$.

Активное R_{μ} и реактивное X_{μ} магнитные сопротивления экрана выразим как:

$$R_{\mu} = \frac{W_{\mu}^2 \omega}{\sqrt{2}} \cdot \frac{X_{\mu s}}{R_{\mu}^2 + X_{\mu s}^2}; \quad X_{\mu} = \frac{W_{\mu}^2 \omega}{\sqrt{2}} \cdot \frac{R_{\mu}}{R_{\mu}^2 + X_{\mu s}^2};$$

где; $R_{\mu} = \rho_{\mu} l_{\mu} / S_{\mu}$ - активное электрическое сопротивление экрана;

ρ_{μ} - удельное электрическое сопротивление материала экрана;

l_{μ} - средняя длина экрана;

$S_{\mu} = A_{\mu} \times h_{\mu}$ сечение экрана;

A_{μ}, h_{μ} - его ширина, высота

w_{μ} - число витков экрана;

$X_{\mu s} = w_{\mu}^2 \omega G_{\mu s} / \sqrt{2}$ - реактивное электрическое сопротивление рассеяния экрана;

$G_{\mu s}$ - магнитная проводимость рассеяния экрана, она находится по приближенным формулам или же по картине конструкции.

Если $i \times j \times k$ - й участок магнитной системы представляет собой воздушный зазор (причем зазор мал и выпучиванием можно пренебречь), то определим его активную магнитную проводимость.

$$G_{\mu i j} = R_{\mu}^{-1} \delta_{i j \times k} = \sqrt{2} \times \mu_0 \times S_{i j \times k} / \delta_{i j \times k},$$

где: $\delta_{i j \times k}$ - длина воздушного зазора;

$\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6}$ Гц/м - магнитная постоянная.

Если $i \times j \times k$ - й участок магнитной системы представляет собой участок рассеяния, то определим магнитную проводимость рассеяния:

$$G_{\text{эс}} = g \times l_{\text{сi x j x k}}$$

где g - удельная магнитная проводимость рассеяния, получаемая по картине конструкции и аналитически по известным соотношениям.

4.Найдем комплексные проводимости узлов $Y_{\text{u i x j x k}}$ суммированием комплексных проводимостей $Y_{\text{i x j x k}}$ элементарных участков, соответствующих данным узлам.

5.Нанесем на поле графа обозначенные узловые точки с учетом их взаимного расположения.

6.Соединим каждую пару узловых точек (без учета участков рассеяния) конструкции графа между собой двумя противоположно направленными дугами согласно обозначенным узлам исходной конструкции или цепи ЭМП.

7.К каждой дуге полученных узловых подграфов припишем комплексную передачу $T_{\text{i x j x k}}$, равную отношению комплексной проводимости элементарного участка между рассматриваемыми узлами исходной системы к комплексной проводимости узла, к которому направлена дуга графа:

$$T_{\text{i x j x k}} = Y_{\text{i x j x k}} / Y_{\text{ui x j x k}}$$

8.К комплексным передачам дуг, направленных к узлам и соответствующих участкам рассеяния, прибавим комплексный коэффициент $G_{\text{s}}Z_{\text{i x j x k}}$, где $Z_{\text{i x j x k}}$ - комплексное сопротивление цепи преобразования .

9.Нанесем на поле графа точки, соответствующие заданным величинам (U - воздействие) и эти точки будем рассматривать как вершины-источники графа.

10.Соединим вершины - источники $Q_{i \times j \times k}$ дугами, направленными от источников, с вершинами графа, соответствующими комплексным материалам узлов участка, на котором находится данный источник:

11.Дугам, направленным от $U_{i \times j \times k}$ припишем комплексную передачу $T_{i \times j \times k}$, равную отношению комплексной проводимости элементарного участка к комплексной проводимости узла, соответствующего вершине графа, к которому направлена дуга;

дугам, направленным от источника $I_{i \times j \times k}$, припишем комплексную передачу:

$$T_{i \times j \times k} = \sqrt{2} / (Y_{i \times j \times k} \times \omega \times w)$$

Дугам направленным от источника $Q_{i \times j \times k}$, припишем комплексную передачу величина которой определяется на основе физико - технического эффекта используемой в конкретной конструкции ЭМП т.е. K_{QU} .

Данный алгоритм построения информационно-энергетической модели позволяет найти потенциалов - воздействия (U) на участках цепи ЭМП с ПИО.

В табл. 3.1 и 3.2 приведены обобщенные величины и параметры цепей различной природы ЭМП.

Таблица 3.1

Обобщённые величины цепей ЭМП с ПИО

Цепь	Воздействие U или потенциал	Реакция I (поток)	Заряд Q
Электрическая	$U_3 = U_{31} - U_{32} \text{ [В]}$ электрическое напряжение, разность потенциалов, э.д.с.	$I_3 = \frac{dQ_3}{dt} \text{ [А]}$ Электрический ток	$Q_3 \text{ [Кл]}$ Электрический Заряд
Магнитная	$U_\mu = F_\mu = I_3 W_{\text{ов}} = H_\mu l$ [А] Магнитодвижущая сила	$I_\mu = \frac{d\Phi_\mu}{dt}$ Производная от магнитного Потока	$Q_\mu = \Phi_\mu \text{ [Вб]}$ Магнитный Поток
Тепловая	$U_T = T_{T1} - T_{T2} \text{ [°K]}$ Разность температур	$I = \frac{dS_T}{dt}$ Производная от энтропии	$G_T = S_T \text{ [ВТ/°K]}$ Энтропия

Таблица 3.2.

Обобщённые параметры цепей ЭМП

Цепь	Сопротивление	Ёмкость	Индуктивность
Электрическая	$R_{\vartheta} = \frac{\rho_{\vartheta} l_{\vartheta}}{S_{\vartheta}} \text{ [Ом]}$ <p>ρ_{ϑ}-удельное эл. сопротивление l_{ϑ}-длина, S_{ϑ}-сечение.</p> $R_{\mu} = \frac{S_{\vartheta}}{\rho_{\vartheta} l_{\vartheta}}$	$C_{\vartheta} = \frac{\varepsilon_{\vartheta} S_{\vartheta}}{l_{\vartheta}} \text{ [Ф]}$ <p>Электрическая ёмкость</p>	$L_{\vartheta} = C_{\mu} W_{\text{ов}}^2 \text{ [Гн]}$ <p>C_{μ} -магнитная проницаемость $W_{\text{ов}}^2$-число витков</p>
Магнитная	<p>Проводимость на пути вихревых токов</p>	$C_{\mu} = \frac{\mu S_{\mu}}{l_{\mu}} \text{ [Гн]}$ <p>произведение магнитной проницаемости на отношение магнитопровода к его длине</p>	$L_{\mu} = C_{\vartheta} \text{ [Ф]}$ <p>Электрическая ёмкость</p>
Тепловая	$R_{\tau} = \frac{T_{\text{ср}} C_{\tau}}{S_{\tau}} = R_{\tau} T_{\text{ср}}$ <p>[°K²/Вт]</p> <p>Произведение теплового сопротивления на среднюю температуру</p>	$C_{\tau} = \frac{C_p S_{\tau} l_{\tau}}{T_{\text{ср}}} = \frac{C_{\tau}}{T_{\text{ср}}}$ <p>[Вт/°K²]</p> <p>Отношение тепловой ёмкости тела к средней температуре</p>	$L_{\tau} = \tau_p \frac{T_{\text{ср}} C_{\tau}}{S_{\tau}}$ <p>Тепловая индуктивность</p>

ГЛАВА 4

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ОДНО, ДВУХ И ТРЕХФАЗНЫХ ТОКОВ

4.1. Исследование статических и динамических характеристик многофазных электромагнитных преобразователей тока в напряжение

Возможности моделирования характеристик ЭМПТН с ПИО определяются в настоящей работе, которая отвечает на следующие вопросы:

- выбор рационального сочетания методов математического моделирования и исследования ЭМПТН с ПИО;
- выбор численных методов решения уравнений моделей;
- решение с помощью ЭВМ задач анализа, оптимизации в статическом и динамическом режимах;
- разработка программного и информационного обеспечения для машинного эксперимента.

В [8] приведены классификация математических моделей, применяемых в процессе исследования. Основные признаки классификации включают характер отображаемых свойств устройств или объекта, принадлежность иерархическому уровню, степень детализации описания внутри одного уровня, способ получения модели. Для построения графовой модели рассмотрим её основные элементы, аналогичные величины воздействия (U_i), реакции (I_i) и заряда (Q_i), а также параметров сопротивления (R_i), емкости (C_i) и индуктивности (L_i), имеющие место в цепях ЭМПТН с ПИО. Данная аналогия обосновывается в ряде работ [2-5], и ее основными положениями являются следующие критерии:

1. Энергетический критерий - произведение величин воздействия U и реакции I должно измеряться в единицах мощности P независимо от физической природы цепи ЭМПТН с ПИО:

$$U \times I = P;$$

2. Критерий интенсивности - величина воздействия I равна первой производной по времени от величины заряда Q цепи:

$$I = dQ/dt;$$

3. Статический критерий - величина воздействия U равна произведению величины реакции I на параметр сопротивления:

$$U = I \times R;$$

4. Динамический критерий для емкостной цепи - величина реакции цепи I равна первой производной по времени от произведения емкости цепи C на величину воздействия U :

$$I = d(C \times U)/dt;$$

в операторной форме $I(p) = C(p) \times U(p)$, где $C(p) = pC$;

5. Динамический критерий для индуктивной цепи - величина воздействия (напряжения) U равна первой производной по времени от произведения индуктивности на величину реакции:

$$U = d(L \times I)/dt;$$

в операторной форме $U(p) = L(p) \times I(p)$, где $L(p) = pL$;

Статические характеристики ЭМПТН с ПИО

Статические характеристики ЭМПТН с ПИО представляет собой зависимость между входной ($I_{\text{вх}}$) и выходной ($U_{\text{вых}}$) величинами при установившихся их значениях. Как входные, так и выходные величины у одного и того же типа ЭМПТН с ПИО могут быть различными. Наиболее часто в качестве изменяющихся параметров и величин у ЭМПТН с ПИО

используются: геометрические размеры магнитопровода, воздушного зазора, магнитная проницаемость магнитных материалов магнитопровода, геометрические размеры ПИО и др.

Основным выражением для построения статических характеристик является:

$$U_{\text{ЭВМ}} = (4.44 * f * W_{\text{ПИО}} / R_{\mu\Sigma}) * W_1 * I_{\text{ЭВМ}}$$

где: $R_{\mu 1}$, $R_{\mu 2}$, $R_{\mu 3}$ – соответственно суммарные магнитные сопротивления магнитопровода с общим основанием, двух стержней, участков дополнительного сердечника и воздушных зазоров и на пути магнитных потоков $\Phi_{\mu 1}$, $\Phi_{\mu 2}$ и $\Phi_{\mu 3}$, причем :

$$R_{\mu 1} = R_{\mu \text{ м}} + R_{\mu \text{ серд}} + R_{\mu \text{ возд}} ,$$

$$R_{\mu \text{ м}} = 2 * l_{\mu \text{ м}} / (\mu * F) ,$$

$$R_{\mu \text{ серд}} = l_{\mu \text{ серд}} / (\mu * F),$$

$$R_{\mu \text{ возд}} = (2 * \delta + \delta_1) / (\mu_0 * F),$$

где $R_{\mu \text{ м}}$ – магнитное сопротивление одного стержня магнитопровода ;

$R_{\mu \text{ серд}}$ – магнитное сопротивления участков дополнительного сердечника;

$l_{\mu \text{ м}}$ – активная длина стержней магнитопровода и по которой протекает магнитный поток Φ_{μ} ;

$R_{\mu \text{ серд}} = l_{\mu \text{ серд}} / (\mu * F)$ – магнитное сопротивление участков дополнительного сердечника;

$l_{\mu \text{ серд}}$ – активная длина участков дополнительного сердечника, по которой протекает магнитный поток Φ_{μ} ;

μ_0 – магнитная проницаемость воздуха (окружающей среды) ;

μ – магнитная проницаемость материала магнитопровода и сердечника ;

$R_{\mu \text{ возд}}$ – магнитное сопротивление воздушных зазоров между стрежнями магнитопровода, участков дополнительного сердечника и воздушного зазора между торцами участков дополнительного сердечника, причем:

$$R_{\mu \text{ возд}} \gg R_{\mu \text{ и}} \text{ и } R_{\mu \text{ возд}} \gg R_{\mu \text{ серд}} ;$$

δ – длина воздушного зазора между торцами параллельных стержней магнитопровода с общим основанием и участков дополнительного сердечника ,

δ_1 – длина воздушного зазора между торцами участков дополнительного сердечника,

$\pi = 3,14$ - константа.

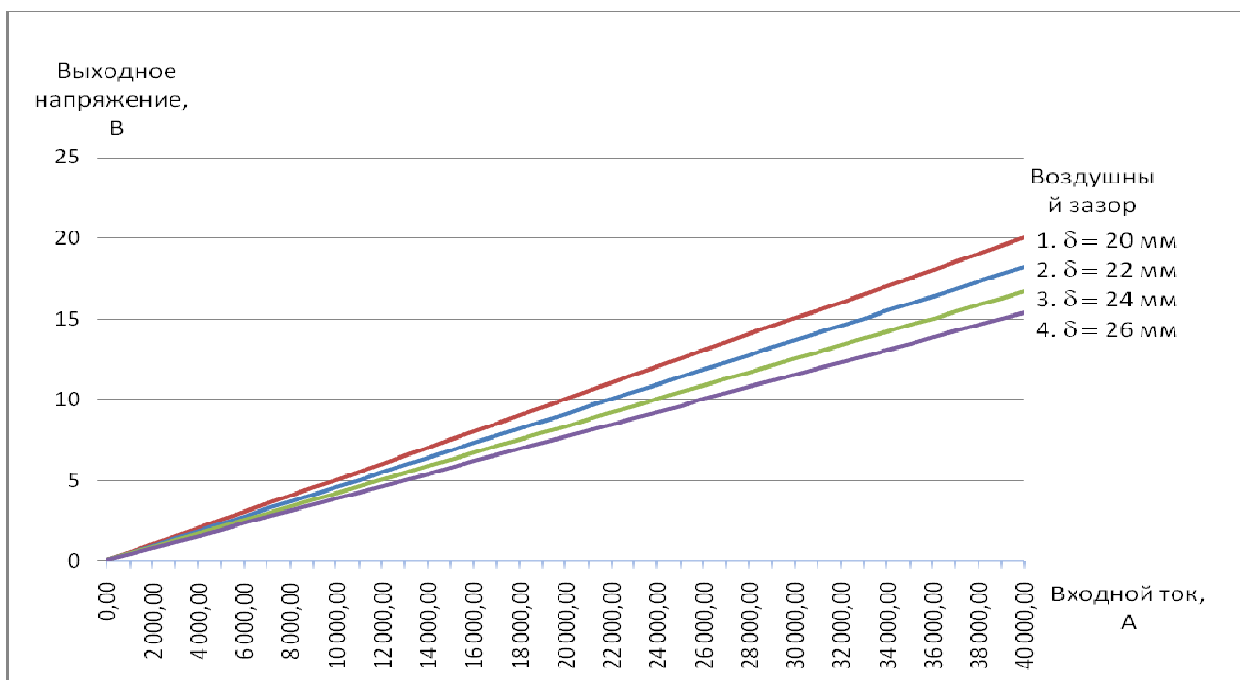


Рис . Статические характеристики ЭМПТН с ПИО при различных значениях воздушного зазора

Динамические характеристики ЭМПТН с ПИО

Динамические характеристики ЭМПТН с ПИО являются одной из основных их характеристик и определяют зависимость выходного сигнала $U_{\text{вых}}$ от изменяющихся во времени величин и параметров входного сигнала $I_{\text{вх}}$, внешних влияющих величин, параметров нагрузки и других воздействий.

В данной работе аналитическим путём определены динамические характеристики ЭМПТН с ПИО. Аналитический метод базируется на информационно-энергетической модели, описывающей работу ЭМПТН с ПИО в динамическом режиме измерения с учётом всего комплекса физических процессов, происходящих в преобразователе, а также условий работы.

Динамические свойства ЭМПТН с ПИО определяются структурной схемой, связывающей выходной сигнал с входным, но и характером продольных, поперечных и вертикально распределённых параметров Π , Π_0 и Π_1 . Ясно, что непостоянство параметров ЭМПТН с ПИО в процессе эксплуатации, характер изменения этих параметров - это основные моменты, которые коренным образом могут изменить его динамические свойства, хотя структура оператора преобразования r входного сигнала может оставаться одной и той же.

Исследование динамических характеристик ЭМПТН с ПИО с учётом взаимодействия цепей различной физической природы затруднено в связи с возникающими трудностями получения дифференциальных уравнений. Однако, применяя вышеописанную графовую модель можно легко составить аналитическое выражение для расчёта динамической характеристики ПЭЭА с ПИО.

Математическую модель динамической характеристики ЭМПТН с ПИО, можно получить на основе графа принципа преобразования. Рассмотрим процесс включения синусоидальные трехфазные электрические нагрузки с токами i_A , i_B , i_C , на выходе каждой ПИО ЭМПТН индицируется напряжение

$u_{\text{эвых}}(t)$. Индуктивность первичной обмотки – обмотки возбуждения ЭМПТН с ПИО $L = W_I * \Phi_{\mu} / i$. Отсюда ток одной фазы $i_3 = W_I * \Phi_{\mu} / L$.

Для исследования динамической характеристики ЭМПТН с ПИО электрические токи первичных обмоток представляем на основе соответствующих магнитных потоков $\Phi_{\mu A}$, $\Phi_{\mu B}$, $\Phi_{\mu C}$:

$$d\Phi_{\mu A} / dt + R_I * \Phi_{\mu A} * L_I = (U_{mA} / W_I) * \sin (\omega * t + \psi_I)$$

$$d\Phi_{\mu B} / dt + R_{II} * \Phi_{\mu B} * L_{II} = (U_{mB} / W_{II}) * (\sin (\omega * t + \psi_{II} + 120^0))$$

$$d\Phi_{\mu C} / dt + R_{III} * \Phi_{\mu C} * L_{III} = (U_{mC} / W_{III}) * (\sin (\omega * t + \psi_{III} - 120^0)).$$

Решим эти уравнения при условии постоянства параметров: электрических сопротивлении R_I , R_{II} , R_{III} и индуктивностей L_I , L_{II} и L_{III} при $t = 0$, где $\Phi_{\mu \text{ост}}$ – остаточный магнитный поток и $\omega = 2 * \pi * f$ – угловая частота.

Решение системы уравнений относительно потоков имеет вид:

$$\begin{aligned} \Phi_{\mu A} &= \Phi_{\mu \text{пр}A} + \Phi_{\mu \text{св}A} = \\ &= - \Phi_{\mu A} * \cos (\omega * t + \psi_I) + (\Phi_{\mu mA} * \cos (\psi_I) \pm \Phi_{\mu \text{ост}A}) * e^{-(R_I * t / L_I)}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Phi_{\mu B} &= \Phi_{\mu \text{пр}B} + \Phi_{\mu \text{св}B} = \\ &= - \Phi_{\mu B} * \cos (\omega * t + \psi_{II}) + (\Phi_{\mu mB} * \cos (\psi_{II}) \pm \Phi_{\mu \text{ост}B}) * e^{-(R_{II} * t / L_{II})}, \end{aligned}$$

$$\Phi_{\mu C} = \Phi_{\mu пр C} + \Phi_{\mu св C} =$$

$$= - \Phi_{\mu C} * \cos (\omega * t + \psi_{III}) + (\Phi_{\mu м C} * \cos (\psi_{III}) \pm \Phi_{\mu ост C}) * e^{-(R_{III} * t / L_{III})}.$$

При $R_I = R_{II} = R_{III} = 0$ максимальные значения магнитных потоков равны:

$$\Phi_{\mu макс A} = U_{mA} / (W_I * \omega),$$

$$\Phi_{\mu макс B} = U_{mB} / (W_{II} * \omega),$$

$$\Phi_{\mu макс C} = U_{mC} / (W_{III} * \omega).$$

Выражения для определения магнитных потоков можно записать:

$$\Phi_{\mu A} = \Phi_{\mu макс A} * [\cos \psi_I * e^{-(R_I * t / L_I)} - \cos (\omega * t + \psi_I)] \pm \Phi_{\mu ост A} * e^{-(R_I * t / L_I)},$$

$$\Phi_{\mu B} = \Phi_{\mu макс B} * [\cos \psi_{II} * e^{-(R_{II} * t / L_{II})} - \cos (\omega * t + \psi_{II})] \pm \Phi_{\mu ост B} * e^{-(R_{II} * t / L_{II})},$$

$$\Phi_{\mu C} = \Phi_{\mu макс C} * [\cos \psi_{III} * e^{-(R_{III} * t / L_{III})} - \cos (\omega * t + \psi_{III})] \pm \Phi_{\mu ост C} * e^{-(R_{III} * t / L_{III})}.$$

При условиях: $\psi_I = \psi_{II} = \psi_{III} = \pi / 2$ и $\Phi_{\mu ост A} = \Phi_{\mu ост B} = \Phi_{\mu ост C} = \Phi_{\mu макс} = 0$ согласно выведенной системы уравнений магнитные потоки при включении преобразуемых токов не будут отличаться от установившегося:

$$\Phi_{\mu A} = \Phi_{\mu макс A} * \sin (\omega * t),$$

$$\Phi_{\mu B} = \Phi_{\mu макс B} * \sin (\omega * t + 120^0),$$

$$\Phi_{\mu C} = \Phi_{\mu \max C} * \sin (\omega * t - 120^0).$$

Наибольшие броски магнитных потоков, значительно превышающие амплитудные значения установившихся потоков, наблюдаются при условиях включения ЭМПТН с ПИО, когда $\psi_I = \psi_{II} = \psi_{III} = 0$ и $\Phi_{\mu \text{ост}A}$, $\Phi_{\mu \text{ост}B}$, $\Phi_{\mu \text{ост}C}$ противоположны по знаку мгновенным значениям потоков установившихся состоянии $\Phi_{\mu \text{пр}A}$, $\Phi_{\mu \text{пр}B}$, $\Phi_{\mu \text{пр}C}$.

Тогда:

$$\Phi_{\mu A} = \Phi_{\mu \max A} * [e^{-(R_I * t / L_I)} - \cos (\omega * t)] \pm \Phi_{\mu \text{ост}A} * e^{-(R_I * t / L_I)},$$

$$\Phi_{\mu B} = \Phi_{\mu \max B} * [e^{-(R_{II} * t / L_{II})} - \cos (\omega * t + 120^0)] \pm \Phi_{\mu \text{ост}B} * e^{-(R_{II} * t / L_{II})},$$

$$\Phi_{\mu C} = \Phi_{\mu \max C} * [e^{-(R_{III} * t / L_{III})} - \cos (\omega * t - 120^0)] \pm \Phi_{\mu \text{ост}C} * e^{-(R_{III} * t / L_{III})}.$$

Эти превышения мгновенных значений магнитных потоков в переходном режиме включения электрических нагрузок, токи которых протекают через первичные обмотки ЭМПТН с ПИО и приводят к появлению бросков намагничивающие токи, которые может во многих раз превысить нормальные токи протекающие через токопроводы – первичные обмотки ЭМПТН с ПИО. Связь между магнитными потоками и токами определяется кривой намагничивания стали магнитопровода, т.е. зависимостью индукции В от напряженности поля Н. По закону полного тока связь между токами в токопроводах – первичных обмотках ЭМПТН с ПИО и напряженностью Н имеют вид: $i = H * l_{\mu} / W_I$, где l_{μ} – длина средней линии магнитопровода, W_I – число витков первичной обмотки ЭМПТН с ПИО токопровода одной фазы трехфазной электрической сети.

Наличие активного сопротивления приводит к затуханию высокочастотных колебаний и кривая тока принимает установившийся синусоидальный характер с опережающим сдвигом φ по фазам по

отношению к напряжению u . Если бы трехфазные электрические цепи были без индуктивности ($L_A = L_B = L_C = 0$), то наблюдалась бы большой начальный бросок тока, начиная с которого ток постепенно приближался бы к установившемуся синусоидальному значению.

Для трехфазной электрической сети источника реактивной мощности – косинусной конденсаторной установки (ККУ) мощностью $Q_{н\ ККУ} = 50$ кВАр, токами $I_{\text{эвх}A} = I_{\text{эвх}B} = I_{\text{эвх}C} = 76$ А, $L_A = L_B = L_C = 10^{-3}$ Гн, $C_A = C_B = C_C = 10^{-7}$ Ф, напряжением $U_{\text{эвх}A} = U_{\text{эвх}B} = U_{\text{эвх}C} = 380$ В, полными сопротивлениями $Z_{\text{э}A} = Z_{\text{э}B} = Z_{\text{э}C} = 0,289$ Ом, магнитные потоки $\Phi_{\mu\text{макс}A} = \Phi_{\mu\text{макс}B} = \Phi_{\mu\text{макс}C} = U_{\text{макс}} / (W_I * \omega) = 380 / (1 * 2 * 3,14 * 50) = 0,70637$ Вб.. созданные токопроводами-первичными обмотками ЭМПТН с ПИО на основе вышеприведенных формул, описывающие динамические режимы изменяются по времени в магнитной системе графиками, представленной на рис. 4.2.

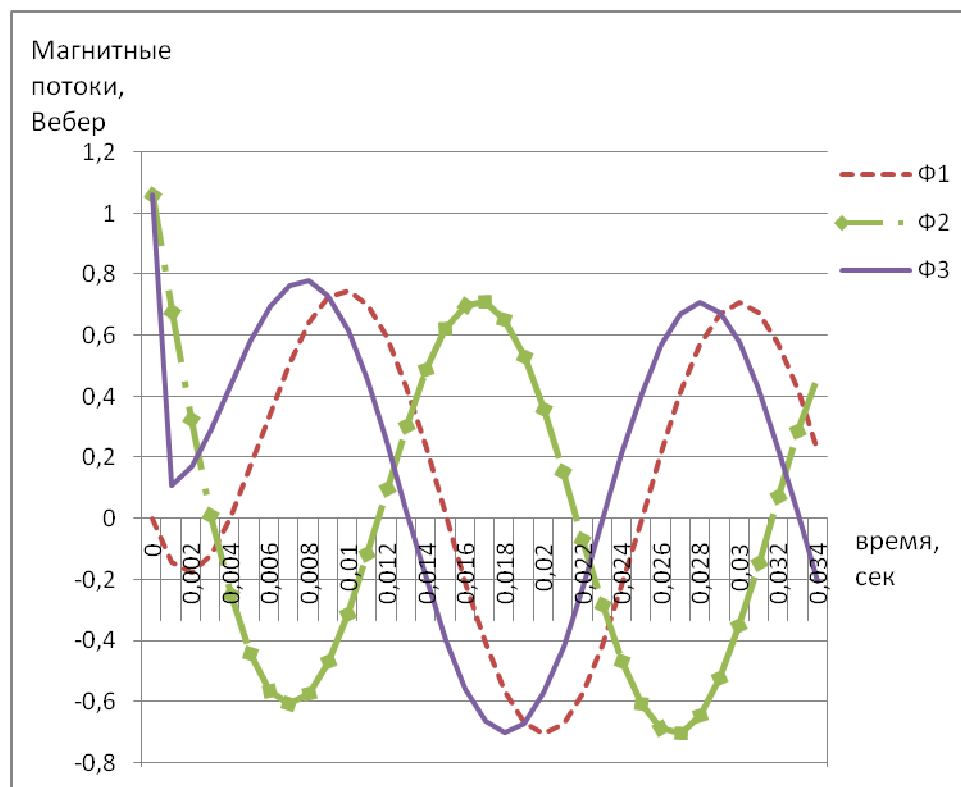


Рис. 4.2. Изменение магнитных потоков в магнитной системе ЭМПТН с ПИО при протекании токов по первичным обмоткам - токопроводам трехфазной электрической сети ККУ мощностью 50 кВАр

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Изучение вопросов преобразования больших переменных токов в электроэнергетических системах и устройствах, в частности в системах управления устройствами электроснабжения показал, что одним из причин их низкой эффективности являются неудовлетворительные технические характеристики используемых измерительных преобразователей, в частности преобразователей больших переменных токов. Установлено, что для повышения эффективности работы систем управления и контроля необходимо повысить точность и стабильность характеристик преобразования при динамических режимах работы, обеспечить регулирование диапазона преобразования измерительных преобразователей.

2. Сравнительный анализ основных характеристик существующих измерительных преобразователей токов показал, что наиболее полно требованиям систем управления и контроля отвечает ЭМП на основе ПИО. Предложена классификация способов изготовления ПИО. Установлено, что в существующих ЭМП на основе ПИО расширение функциональных возможностей осуществляется в основном регулированием количества витков первичной и вторичной обмоток.

3. Показана целесообразность совместного применения энергоинформационного и морфологического методов поискового проектирования при разработки новых ЭМП на основе ПИО. Установлено, что морфологический синтез ЭМП на основе ПИО по структурной схеме позволяет разработать новые ЭМП с требуемыми характеристиками без привлечения из автоматизированного банка данных дополнительных физико-технических эффектов, а составление морфологических матриц для каждого физико-технического эффекта параметрической структурной схемы ЭМП позволяет резко увеличить количество синтезируемых вариантов ЭМП и в конечном итоге выбрать их конструкции с требуемыми характеристиками.

4. Анализ работы разработанных ЭМП на основе ПИО показал, что наиболее полно требованиям систем управления и контроля отвечает ЭМП, функциональные возможности в котором расширена на основе ПИО и регулирования воздушного зазора между торцами магнитопровода. Показано, что они имеют расширенные функциональные возможности, унифицированные выходные сигналы, линейные статические характеристики, универсальность применения и относительно высокую точность преобразования во всех режимах работы.

6. Разработаны математические модели ЭМП на основе ПИО. Установлено, что известный принцип выбора расчетных параметров спрямленной характеристики намагничивания не всегда дает желаемую точность расчета электромагнитных и конструктивных параметров ЭМП.

7. Получены общее и частное аналитические решения уравнения Пуассона для потенциала электрического поля ЭМП. Выполнен расчет распределения приложенного напряжения и потенциала электрического поля вдоль поверхности изолятора разработанного ЭМП. Получено выражение и составлена таблица для расчета геометрических размеров изолятора ЭМП с учетом электрической прочности материала изолятора и коэффициента запаса прочности.

8. Анализ составляющих вторичного тока в динамическом режиме работы ЭМП на основе ПИО показал, что первый член представляет собой принужденную синусоидальную составляющую, второй член – свободная апериодическая составляющая, компенсирующие периодическую составляющего вторичного тока.

9. Выявлено, что основными источниками возможных погрешностей ЭМП на основе ПИО являются несовершенство метода, неточность изготовления и сборки, нестабильность характеристик материала сердечника, частоты тока и параметров нагрузки, а также неблагоприятные внешние условия. На основе анализа полученных аналитических выражений токовой и угловой погрешности установлено, что на точность преобразования

наибольшее влияние оказывает нестабильность нагрузки и колебания частоты первичного тока. При этом максимальная приведенная погрешность не превышает $\pm 0,5\%$.

10. Применение разработанного ЭМП на основе ПИО в системах управления устройствами электроснабжения приводит к повышению точности управления.

1. Абакумов А.А. Преобразователи магнитных полей для систем управления.: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. –Уфа: УАИ, 1991. -19 с.
2. Азимов Р.К. Принципы построения и проектирования первичных преобразователей с распределенными параметрами для систем контроля и управления: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. – Ташкент: ТГТУ, 1993. - 32 с.
3. Аксенов Ю.П., Голебеv А.В., Завидей В.И. Предприятие «ДИАКС». Контроль технического состояния трансформаторов тока ТФРМ на рабочем напряжении // Энергетик. – М., 2004. - № 3. – С. 29-30.
4. Алексеев В.А. Новые решения в технике измерения тока и напряжения на СВН // Энергохозяйство за рубежом. – 1992. - №5. – С. 17-20.
5. Алиев И.И., Калганова С.К. Электротехнические материалы и изделия. Справочник. – М.: РадиоСофт, 2005. – 352 с.
6. Амеличев В.В., Галушков А.И., Цаплыгин Ю.А. Оптимизация режима работы интегрального магниточувствительного элемента на основе эффекта Холла // Измерительная техника. - 1994. - №4. – С. 37-41.
7. Амиров С.Ф. Электромагнитные датчики параметров движения для систем управления гидромелиоративными объектами: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. – Астрахань: АГТУ, 1997. – 32 с.
8. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники // Электрические цепи. – М.: Гардарики, 2006. – 701 с.
9. Болотин О.А., Портной Г.Я., Даниленко А.П. Разработка эффективных датчиков больших токов // Приборы и системы управления. – М., 1992. –№4. –С. 31-32.
10. Болотин О.А., Портной Г.Я., Портных О.А., Тихонов В.И. Датчик измерения тока на основе магниточувствительной ГИС // Приборы и системы управления. – М., 1992. – №2. –С. 27-28.
11. Бордаев В.В., Гуртовцев А.Л., Чижонков В.И. Испытание, выбор и применение низковольтных однофазных измерительных трансформаторов тока // Электрические станции. – 2004. – №4. – С. 37-45.

12. Патент РУз. №04185. Устройство для преобразования несимметричности трехфазного тока в напряжение / Амиров С.Ф., Азимов Р.К., Сиддиков И.Х., Хакимов М.Х., Хушбоков Б.Х., Саттаров Х.А. // Расмий ахборотнома. – 2010. – №6.

13. Решение о выдаче основного Патента РУз. №IAP 2008 0342. Преобразователь тока в напряжение / Амиров С.Ф., Азимов Р.К., Сиддиков И.Х., Хакимов М.Х., Хушбоков Б.Х., Назаров Ф.Д., Рустамов Д.Ш. //

14. Сиддиков И.Х., Назаров Ф.Д., Сиддиков О.И. Анализ принципов построения преобразователей несимметричности трехфазного тока в напряжение (тезисы)// Республиканская конференция с участием зарубежных представителей «Опыт внедрения энергосберегающих технологии». Жиззах, ЖизПИ, 2009 г.

15. Техническое творчество: теория, методология, практика. Энциклопедический словарь-справочник /Под. ред. Половинкина А.И., Попова В.В. – М.: НПО «Информ-система», 1995. – 408 с.

16. Сиддиков И.Х., Хакимов М.Х., Назаров Ф.Д, Даминов Х. Исследование преобразователя тока в напряжение с плоскими измерительными обмотками и применение.(тезисы доклада)// Республиканская конференция с участием зарубежных представителей «Опыт внедрения энергосберегающих технологии». Жиззах,ЖизПИ, 2009 г.

17. Ураксеев М.А., Марченко Д.А. Магнитооптические датчики тока и магнитного поля на эффекте Фарадея // Приборы и системы управления. – М., 1999. –№ 12. – С. 33—36.

18. Ураксеев М. А., Марченко Д. А., Марченко Р. А. Магнитооптические эффекты и датчики на их основе // Датчики и системы. – 2001.– №1. – С. 60-63.

19. Фигурнов Е.П. Релейная защита сетей тягового электроснабжения. – М.: Маршрут, 2006. – 272 с.

20. Сиддиков И.Х., Назаров Ф.Д, Маматкулов А. Принцип построения преобразователя тока в напряжение (статья) // ТашГТУ, Журнал «Техника маскани» N2 – Ташкент, 2010 г.

21. Хисамова Л.И. Преобразователи тока с расширенными функциональными возможностями. (статья)// ТашГТУ Журнал «Энерго ресурсосбережения» N3-4 – Ташкент, 2010 г.

22. Сиддиков И.Х., Назаров Ф.Д., Анарбоев М., Хонтураев И. Принципы построения преобразователей тока с расширенными функциональными возможностями. (тезисы доклада)// Республиканская конференция с участием зарубежных представителей «Опыт внедрения энергосберегающих технологии» Тошкент, ТошДТУ Апрель 2010 г. –С. 80–82.

23. Шабад М.А. Трансформаторы тока в схемах релейной защиты . (Библиотечка электротехника, приложение к журналу «Энергетик»; Вып. 1). –М.: НТФ «Энергопрогресс», 1998. – 64 с.

24. Шмурьев В.Я. Цифровые защиты. (Библиотечка электротехника, приложение к журналу «Энергетик», вып. 2). – М.: НТС «Энергопрогресс», 1999. – 5 с.

25. Шуляк В.Г. Расчет измерительных органов релейной защиты энергосистемы. Учебное пособие. – М.: МЭИ, 1991. – 135 с.

26. Черненко В.А. Исследование установившихся и переходных режимов работы одноступенчатых трансформаторов тока: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Киев, 2002. – 28 с.

27. Черников Г.Б., Евликов А.А. Трансформаторы тока в схемах вентильных преобразователей. – М.: Энергия, 2007. – 136 с.

28. Чернин А.Б. Токи намагничивания трансформаторов тока. – Электрические станции.– 2003.– № 3. – С. 24 – 27.

29. Эткинд Л.Л. О межгосударственной стандартизация измерительных трансформаторов, соответствии и противоречии ведомственных и нормативно–технических документов межгосударственным и государственным стандартам // Электро. – 2003. – №1. – С. 47-49.

30. Юсупбеков Н.Р., Игамбердиев Х.З., Маликов А.В. Основы автоматизации технологических процессов: Учебное пособие для высшего и среднего специального образования. В 2-х ч. – Т.: ТГТУ, 2007. Ч.1. – 152 с.
31. Юсупбеков Н.Р., Игамбердиев Х.З., Маликов А.В. Основы автоматизации технологических процессов: Учебное пособие для высшего и среднего специального образования. В 2-х ч. – Т.: ТГТУ, 2007. Ч.2. – 115 с.
32. An optical current comparator / Chu D.C.B., Ning Y.N., Jakson D.A. // Meas. Sci. and Technol.- 1993.-4.– №11.
33. International standard 60044-1©IEC: 1996 “Instrument transformers – Part 1: Current transformers”.
34. Kazakov M.K. Using the current law in discrete form for measuring high direct currents // Electrical Technology. – 1997.- № 3. (Elsevier Science Ltd, Great Britain).
35. Material “megamorphs “in magnetic field // Mach .Des. -1994.-66.- №15.
36. Optical current transducers for power systems: A review [\ \ IEEE](#) Trans Power. Deliv. -1994.-9.–№4.
37. Schaumburg H.. Werkstoffe und Bauelemente der Elektrotechnik. Sensoren. B.G. Teubner. Stuttgart, 1992.– 517с.
38. Schaumburg H.. Werkstoffe und Bauelemente der Elektrotechnik. Sensorenwendungen. B.G. Teubner. Stuttgart, 1995.– 524с.
39. Transformator de intensidad para metrolgia // Garsia Eduardo. Mundo electron. -1990.-№203.(Исп).
40. Zykin F.A., Kazakov M.K. Development of precision measuring transducers of high direct currents //Тез.науч. -техн. сем. «Проблемы энергетики и пути их решения». –Барселона(Испания),1997.
41. www.matlab.com.