

На правах рукописи



ДУАНЬ ЛИЮН

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ КВАЗИРЕЗОНАНСНЫХ
ТОКОГРАНИЧИВАЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ЛИНИЙ
ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ**

Специальность: 05.09.01 – Электромеханика
и электрические аппараты

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2009

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Научные руководители: член-корр. РАН, доктор технических наук,
профессор **Александров Георгий Николаевич**,
доктор технических наук,
профессор **Шакиров Мансур Акмелович**

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор **Попов Виктор Васильевич**
кандидат технических наук,
доцент **Ярмаркин Михаил Кириллович**

Ведущая организация: ОАО «Научно-исследовательский институт по передаче электроэнергии постоянным током высокого напряжения» (НИИПТ)
(г. Санкт-Петербург)

Защита состоится « 23 » октября 2009 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.11 ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая, ул., д.29, Главное здание, ауд. 325.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Автореферат разослан « 23 » сентября 2009 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета Д 212.229.11
кандидат технических наук, доцент

Попов М. Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Возрастающее потребление электроэнергии во всем мире приводит к увеличению мощности короткого замыкания (к.з.) в электрических сетях. Ток короткого замыкания в электрических сетях является одним из определяющих параметров при выборе электрических аппаратов. Чем больше значение этого тока, тем более высокую отключающую способность должны иметь выключатели, тяжелее конструкцию ошиновки, опорных изоляторов и разъединителей. Поэтому по мере развития энергосистем большое внимание уделяется ограничению токов короткого замыкания. Ограничение токов короткого замыкания является актуальной задачей и с точки зрения повышения устойчивости работы энергосистемы в целом. Общие требования к токоограничивающим устройствам (ТОУ), помимо ограничения тока к.з., также включают:

- ограничение во времени продолжительности протекания тока к.з.;
- не оказывать существенного влияния на нормальный режим работы сети;
- обеспечить в аварийном режиме условия, необходимые для действия релейной защиты сети;
- иметь стабильные характеристики при изменении схемы сети;
- в идеальном случае при к.з. сопротивление ТОУ должно быть равно $X_{нагр}$, предшествующему к.з.

Для удовлетворения перечисленных выше общих требований и условий токоограничивающее устройство должно обладать нелинейной характеристикой. Помимо использования ТОУ со сверхпроводящими элементами, требующими дорогостоящего специального криогенного оборудования, или вставок постоянного и переменного тока не промышленной частоты, также весьма высокой стоимости, в общем случае решение этой задачи возможно следующими путями:

- повышение быстродействия традиционной коммутационной аппаратуры;
- создание и использование новых сверхбыстродействующих коммутационных аппаратов, способных безынерционно, т.е. в течение первого полупериода, ограничить и отключить ток к.з.;
- использование безынерционных и инерционных ТОУ.

Наибольшее ограничение тока к.з. достигается при использовании второго пути, однако такое решение задачи в настоящее время сдерживается либо отсутствием указанных устройств с необходимыми параметрами и эксплуатационными характеристиками, либо их высокой стоимостью. При использовании синхронизирования или тиристорных выключателей (отключение тока происходит при переходе через нуль) не ограничивается ударный ток, хотя это и позволяет снизить термическое действие тока к.з. на электротехнические оборудования. В настоящее время пристальным вниманием пользуются безынерционные токоограничивающие устройства, такие как резонансные ТОУ (РТОУ) и квазирезо-

нансные (т.е. близкие к резонансным) ТОУ (КТОУ), наиболее дешевые по стоимости, некоторые из которых не содержат коммутационной аппаратуры. При этом происходит ограничение ударного тока к.з. В настоящее время известно более 100 вариантов и модификаций РТОУ, отличающиеся по составу элементов. Из них наиболее простым по конструкции является безынерционное РТОУ, разработанное Александровым Г.Н., в котором используется управляемый искровым промежутком реактор трансформаторного типа (УИПРТ). В основе лежит идея резкого изменения сопротивления РТОУ в результате пробоя искрового промежутка во вторичной обмотке УИПРТ, возникающего из-за резкого повышения напряжения на трансформаторе РТОУ при внезапном к.з. в линии. Диссертация посвящена исследованию как этого типа ТОУ, так и его модификациям с целью оптимизации конструкции этих устройств. При этом учтено, что, независимо от типа и конструкции РТОУ и КТОУ, все они при к.з. линии попадают под повышенное напряжение, на порядок превышающее их напряжение при нормальном режиме работы линии. Из сказанных следует, что рассмотренные в диссертации вопросы, связанные с разработкой КТОУ и созданием общей методики исследования переходных процессов в линиях передачи с такими ТОУ при внезапных к.з., имеют большую актуальность и значение для защиты линий электропередач и электротехнического оборудования.

Целью работы является разработка и оптимизация параметров квази-резонансных токоограничивающих устройств для защиты линий электропередач высоких классов напряжения от токов внезапного к.з. Поставленная цель достигается решением следующих основных задач:

- исследование особенностей распределения магнитного поля в УИПРТ и разработка его схем замещения;
- уточнение динамических процессов в линиях при наличии в ней КТОУ, содержащих УИПРТ, и оптимизация параметров УИПРТ;
- исследование динамических процессов в линии, содержащей *квазиферрорезонансное токоограничивающее устройство* (КФТОУ);
- создание методики проектирования и оптимизации параметров неуправляемого реактора КФТОУ; сравнение КФТОУ с КТОУ других типов.

Методы исследований. При решении поставленных задач были использованы методы теории электрических и магнитных цепей, в том числе метод переменных состояния, теория магнитоэлектрических схем замещения, математическое моделирование и имитационное моделирование.

Научная новизна:

- представлены физические особенности процессов в КТОУ с УИПРТ на всех этапах внезапного к.з. в линии, включая *этап* от момента к.з. до момента пробоя искрового промежутка и *время* после его пробоя до отключения линии силовым выключателем; разработаны схемы замещения УИПРТ, позволяющие учитывать *сверхнасыщение* (глубокое насыщение при $\mu \rightarrow \mu_0$) отдельных участков его магнитопровода при возникновении на УИПРТ *сверхнапряжений* (напряжений, на по-

рядок превышающих номинальное) при внезапных к.з. в линиях электропередач;

- разработаны устройство и схема замещения неуправляемого реактора КФТОУ, учитывающая степень глубокого насыщения его магнитопровода при сверхнапряжениях, вызванных внезапным к.з. в линии электропередач.

Достоверность полученных результатов, выводов и рекомендаций диссертационной работы обеспечивается физической и математической корректностью постановки задачи и методами их решения на основе теоретических основ электротехники и теории электрических аппаратов. Ряд научных положений и выводов подтвержден экспериментальными исследованиями на установках, созданных в ходе работы над диссертацией, послуживших основой для создания схем замещения УИПРТ и неуправляемого реактора КФТОУ.

Практическая ценность работы состоит в следующем:

- разработан метод исследования переходных процессов при внезапном к.з. в линии при наличии в ней КТОУ с УИПРТ с учетом реального порядка сложности системы;
- представлена методика оптимизации параметров УИПРТ;
- созданы реальные макеты по наблюдению явлений возникновения сверхпотоков (т.е. потоков, превышающих поток холостого хода (х.х.)) и антипотоков (т.е. потоков, имеющих направление, противоположенное потоку х.х.) в трансформаторах в режиме к.з.; представлены геометрические параметры этих макетов, что делает доступным создание их прототипов в обычной лаборатории по теории цепей в университетах; представленные результаты экспериментов ставят вопрос о создании корректных схем замещения трансформатора, учитывающих перечисленные явления в режиме к.з. одной из его обмоток;
- созданы основы общей методики проектирования и оптимизации параметров КФТОУ.

Реализация результатов работы. Представлены методика и комплекс программ для расчета динамических процессов при внезапных к.з. в линиях, содержащих резонансные или квазирезонансные ТОУ. На основе созданных экспериментальных установок подготовлены лабораторные работы по наблюдению явлений возникновения сверх- и антипотоков в трансформаторах на кафедре ТОЭ СПбГПУ.

Основные положения, выносимые на защиту:

- методика и алгоритм анализа переходных процессов в сетях с квазирезонансным токоограничивающим устройством, содержащим УИПРТ;
- оптимизация конструкции УИПРТ по массогабаритным параметрам реактора;

- созданная при участии автора лабораторная база, состоящая из макетов двухобмоточных трансформаторов броневое типа для наблюдения анти- и сверхпотоков при к.з. одной из его обмоток;
- схемные модели трансформаторов при сверхнасыщенном состоянии их магнитопроводов, использованные при разработке схем замещения УИПРТ и реактора КФТОУ;
- методика оптимизации конструкции КФТОУ и алгоритм анализа переходных процессов при внезапных к.з. в линии с КФТОУ.

Апробация работы: основные результаты работы докладывались на XVI Международной научно-методической конференции «Высокие интеллектуальные технологии образования и науки», февр. 2009 г.; на XIII Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы: «Фундаментальные исследования и инновации в технических университетах», май, 2009г, а также на заседаниях кафедр «Электрические и электронные аппараты» (2008 г.), «Электрические системы и сети» (2009 г.) и «Теоретические основы электротехники» (2009 г.).

Публикации: основные положения диссертации опубликованы в 11 печатных работах, из них две статьи опубликованы в издании «Научно-технические ведомости СПбГПУ», входящем в Перечень изданий, рекомендованных ВАК для публикации научных результатов диссертационных работ.

Структура и объем работы:

диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, 5 приложений. Она содержит 165 страниц машинописного текста, 55 рисунков и 10 таблиц. Список литературы содержит 150 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность работы в аспекте современных тенденций создания и проектирования токоограничивающих устройств для защиты линий электропередач высоких классов напряжения. Определены цель и задачи диссертационной работы. Приведены её научные и практические результаты, а также сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен аналитический обзор существующих типов токоограничивающих устройств (ТОУ). Рассматриваются принципы действия, достоинства и недостатки различных ТОУ, в том числе ТОУ со сверхпроводниками, с магнитными элементами, с *резистором РТС*, с запираемыми тиристорами, с регулируемым сопротивлением, смешанные ТОУ, ТОУ трансформаторного типа и тиристорные ТОУ. Обоснована необходимость создания и совершенствования ТОУ резонансного и квазирезонансного типов, которые являются предметом исследования в диссертации.

Вторая глава посвящена исследованию *квазирезонансного токоограничивающего устройства* (КТОУ), содержащего *управляемый искровым промежуток реактор трансформаторного типа* (УИПРТ) (рис.1). Уточняются динамические процессы в линии при внезапном к.з. как на интервале от момента

к.з. до момента пробоя искрового промежутка (ИП) разрядника, так и после пробоя ИП с *идеализированным* представлением УИПРТ линейной r, L_P -ветвью. Повышенной точности расчетов удалось достичь за счет учета реальной сложности системы после пробоя ИП, равной трем (рис.1,в), а не двум (как было принято на 1-м этапе исследования КТОУ):

$$\frac{d^3 i(t)}{dt^3} + \left(\frac{1}{\tau_c} + \frac{1}{\tau_p} \right) \frac{d^2 i(t)}{dt^2} + \left(\omega_{01}^2 + \frac{1}{\tau_c \tau_p} + \omega_{02}^2 \right) \frac{di(t)}{dt} + \left(\frac{\omega_{02}^2}{\tau_c} + \frac{\omega_{01}^2}{\tau_p} \right) i(t) = \frac{1}{L_c} \left(\frac{d^2 u(t)}{dt^2} + \frac{1}{\tau_p} \frac{du(t)}{dt} + \omega_{02}^2 u(t) \right),$$

где

$$\begin{aligned} \tau_c &= \frac{L_c}{R_c}; & \omega_{01} &= \frac{1}{\sqrt{L_c C}} = \omega \sqrt{\frac{X_C}{X_{Lc}}} = \omega \sqrt{\alpha_C}; \\ \tau_p &= \frac{L_p}{r}; & \omega_{02} &= \frac{1}{\sqrt{L_p C}} = \omega \sqrt{\frac{X_C}{X_p}} = \omega \sqrt{\alpha_p}. \end{aligned} \quad (2.1)$$

Установлено, что процесс ограничения тока в линии с КТОУ носит *колеба-*

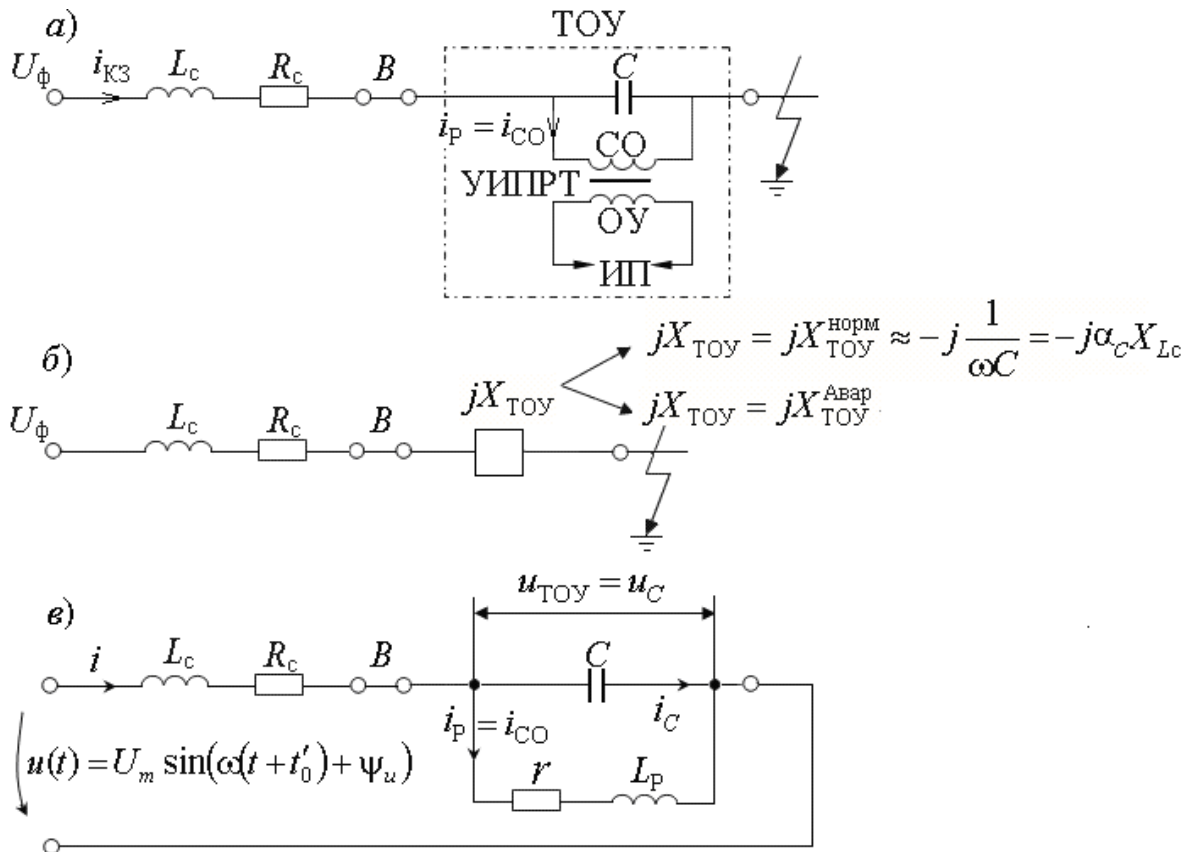


Рис.1. Однолинейная принципиальная схема линии передачи с ТОУ на основе УИПРТ (а), ее схема замещения в нормальном и аварийном режимах линии (б) и расчетная схема 3-го порядка сложности для анализа процессов после пробоя ИП (в)

тельный характер, а не апериодический, как принималось ранее. Поэтому, решение (2.1) для тока в линии после пробоя ИП имеет вид

$$i(t) = A_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} + A_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}} \sin(\omega' t + \psi') + I_m^{CTOU} \sin[\omega(t + t'_0) + \psi_i], \quad (2.2)$$

где $I_{m \text{ Авар}}^{\text{СТОУ}} = \sqrt{2}U_{\phi} / \left| R_c + jX_{Lc} + \frac{(r + jX_p) \cdot (-jX_c)}{r + jX_p - jX_c} \right|$ – амплитуда установившегося

тока к.з. в линии с КТОУ и

$$\omega' = \sqrt{\omega_{01}^2 + \omega_{02}^2} = \omega \sqrt{(\omega_{01}/\omega)^2 + (\omega_{02}/\omega)^2} = \omega \sqrt{\alpha_c + \alpha_p}, \quad (2.3)$$

$$\tau_1 \approx (\alpha_c + \alpha_p) / (\alpha_p/\tau_c + \alpha_c/\tau_p); \quad \tau_2 \approx 2(\alpha_c + \alpha_p) / (\alpha_c/\tau_c + \alpha_p/\tau_p). \quad (2.4)$$

Коэффициенты A_1 , A_2 и ψ' определяются в аналитической форме по начальным условиям $i(0)$, $u_c(0)$, $i_p(0)$, равным конечным значениям этих величин к моменту пробоя ИП.

В качестве примера рассматривается процесс внезапного к.з. в конкретной линии электропередачи с параметрами: $U_{\phi} = 127$ кВ – фазное номинальное напряжение линии; $I_{\text{ном}} = 2$ кА – номинальный ток линии; $Z_{\text{ном}} = 60,33$ Ом – номинальное сопротивление нагрузки; $X_{Lc} = 3,56$ Ом – предвключенное индуктивное сопротивление линии; амплитуда тока к.з. в линии без ТОУ $I_m^{\text{кз}} = \sqrt{2}U_{\phi} / X_{Lc} = \sqrt{2} \cdot 127 / 3,56 = 50,44$ кА. В работе представлена методика определения параметров КТОУ по заданной степени ограничения тока к.з. в линии $\beta = I_{m \text{ Авар}}^{\text{СТОУ}} / I_m^{\text{кз}}$ (например $\beta = 0,5$), включающая следующие вычисления:

требуемого сопротивления ТОУ при к.з., (при пренебрежении активного сопротивления.)

$$X_{\text{ТОУ}}^{\text{Авар}} = \frac{\sqrt{2}U_{\phi}}{I_{m \text{ Авар}}^{\text{СТОУ}}} - X_{Lc} = \frac{\sqrt{2}U_{\phi}}{\beta \cdot I_m^{\text{кз}}} - X_{Lc} = \frac{\sqrt{2}U_{\phi}}{\beta \cdot \sqrt{2}U_{\phi} / X_{Lc}} - X_{Lc} = \left(\frac{1}{\beta} - 1 \right) X_{Lc} = 3,56 \text{ Ом}; \quad (2.5)$$

аварийного напряжения на конденсаторе ТОУ

$$U_{m \text{ ТОУ}}^{\text{Авар}} = \sqrt{2}U_{\phi} - X_{Lc} \cdot \beta \cdot I_m^{\text{кз}} = \sqrt{2}U_{\phi} - X_{Lc} \cdot \beta \cdot \sqrt{2}U_{\phi} / X_{Lc} = \sqrt{2}(1 - \beta)U_{\phi} = 89,79 \text{ кВ}; \quad (2.6)$$

индуктивного сопротивления УИПРТ в аварийном режиме

$$X_{\text{СО}}^{\text{Авар}} = \frac{X_c \cdot X_{\text{ТОУ}}^{\text{Авар}}}{X_c + X_{\text{ТОУ}}^{\text{Авар}}} = \frac{\alpha_c \cdot X_{Lc} \cdot X_{Lc} \left(\frac{1}{\beta} - 1 \right)}{\alpha_c \cdot X_{Lc} + X_{Lc} \left(\frac{1}{\beta} - 1 \right)} = \frac{\alpha_c (1 - \beta)}{1 - \beta(1 - \alpha_c)} \cdot X_{Lc} = 1,78 \text{ Ом} \quad (\alpha_c = 1); \quad (2.7)$$

амплитуды тока через СО УИПРТ в установившемся режиме к.з.

$$I_{m \text{ СО}}^{\text{Авар}} = \frac{U_{m \text{ СО}}^{\text{Авар}}}{X_{\text{СО}}^{\text{Авар}}} = \frac{\sqrt{2}(1 - \beta)U_{\phi}}{\frac{\alpha_c \cdot X_{Lc}(1 - \beta)}{1 - \beta(1 - \alpha_c)}} = \frac{1 - \beta(1 - \alpha_c)}{\alpha_c} \cdot \frac{\sqrt{2}U_{\phi}}{X_{Lc}} = \frac{1 - \beta(1 - \alpha_c)}{\alpha_c} \cdot I_m^{\text{кз}} = 50,44 \text{ кА}; \quad (2.8)$$

амплитуды тока через конденсатор ТОУ в аварийном режиме

$$I_{m \text{ C}}^{\text{Авар}} = \frac{U_{m \text{ СО}}^{\text{Авар}}}{X_c} = \frac{\sqrt{2}(1 - \beta)U_{\phi}}{\alpha_c \cdot X_{Lc}} = \frac{(1 - \beta)}{\alpha_c} I_m^{\text{кз}} = 25,22 \text{ кА}. \quad (2.9)$$

Установлена связь

$$\beta = (\alpha_p - 1) / (\alpha_p + \alpha_c - 1), \quad U_{m \text{ C}}^{\text{Авар}} = U_{m \text{ C}}^{\text{Авар}} / U_{m \phi} = 1 - \beta. \quad (2.10)$$

Величины (2.6), (2.8) и (2.9) необходимы для контроля правильности расчета переходных процессов при $t \rightarrow \infty$. Динамические процессы при внезапном к.з. представлены на рис.2. Для сравнения на рис.2,б представлены те же процессы

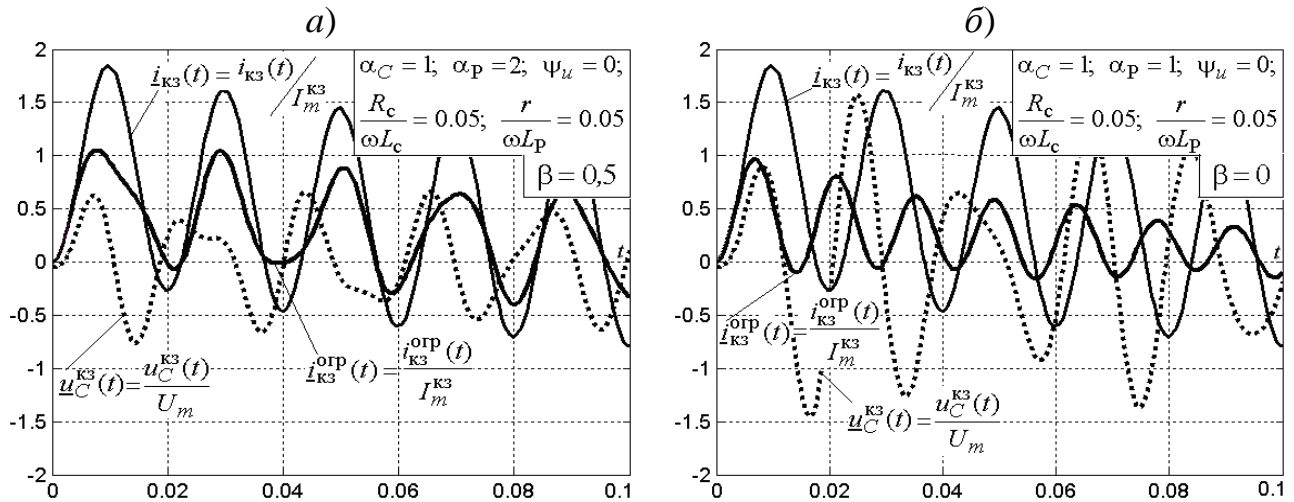


Рис. 2. Токи к.з. в линии: а – без ТОУ ($i_{кз}(t)$) и при наличии КТОУ ($i_{кз}^{огр}(t)$), а также напряжения на КТОУ ($u_C^{кз}(t)$); б – то же для ТОУ резонансного типа ($\alpha_p = 1$) (РТОУ)

в линии при $\alpha_p = 1$ (ТОУ резонансного типа). Как видно, при использовании РТОУ (рис.2,б) всплеск напряжения на ТОУ $u_C^{наиб} = u_C^{наиб} / U_m$ превышает всплеск напряжения на КТОУ (рис.2,а) почти в 2 раза, тогда как коэффициент ограничения тока в первом полупериоде ($k_i^{огр} = i_{наиб}^{огр} / i_{наиб}^{безогр}$) в обоих случаях практически одинаков (индекс *огр* от слова *ограничение*, указывает на наличие ТОУ в линии).

Все формулы (2.5) – (2.10) соответствуют установившемуся режиму к.з. линии, тогда как эффективность работы КТОУ определяется ограничением ударного тока к.з. в переходном процессе. Поэтому выбранные β , α_C и α_p по установившемуся режиму должны быть оценены на ограничение ударного тока к.з. и всплеска напряжения на конденсаторе КТОУ в переходном процессе. Результаты этих испытаний отражены в табл.2.1 и на рис.3, где пред-

Таблица 2.1

Коэффициенты ограничения тока и всплеска напряжения на КТОУ при к.з. в линии

α_C	α_p	0,8	1	1,2
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
1,8		$k_i^{огр} = 0,61; (\beta = 0,5)$ $u_C^{наиб} = 0,79; (U_{mC}^{Авар} = 0,5)$	$k_i^{огр} = 0,56; (\beta = 0,44)$ $u_C^{наиб} = 0,86; (U_{mC}^{Авар} = 0,56)$	$k_i^{огр} = 0,51; (\beta = 0,4)$ $u_C^{наиб} = 0,91; (U_{mC}^{Авар} = 0,6)$
2		$k_i^{огр} = 0,63; (\beta = 0,56)$ $u_C^{наиб} = 0,69; (U_{mC}^{Авар} = 0,44)$	$k_i^{огр} = 0,57; (\beta = 0,5)$ $u_C^{наиб} = 0,76; (U_{mC}^{Авар} = 0,5)$	$k_i^{огр} = 0,52; (\beta = 0,45)$ $u_C^{наиб} = 0,81; (U_{mC}^{Авар} = 0,55)$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

ставлены кривые коэффициентов оптимизации $k_{\text{крит}}(\alpha_C, \alpha_P)$ при принятых весовых коэффициентах $\xi_0 = 5$ и $\eta_0 = 1$; оптимальный вариант соответствует минимуму $k_{\text{крит}}$ (в нашем случае при $\alpha_C = 1$, $\alpha_P \approx 2$ и согласно (2.10) $\beta = 0,5$).

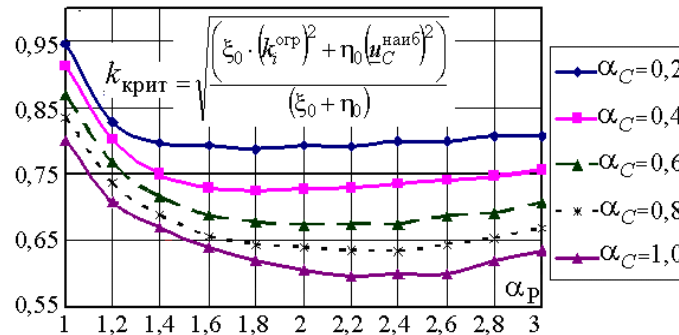


Рис. 3. Критерий оптимизации $k_{\text{крит}}(\alpha_C, \alpha_P)$

Найденная по (2.7) величина $X_{\text{СО}}^{\text{Авар}}(\alpha_C, \beta)$ определяет конструктивные параметры УИПРТ, подобно тому, как $X_{\text{кз}}$ трансформатора определяет параметры обмоток трансформатора. Поскольку стальной магнитопровод УИПРТ в режиме к.з. линии оказывается в сверхнасыщенном состоянии ($\mu \rightarrow \mu_0$), то известные идеи, положенные в основу определения $X_{\text{кз}}$, к выводу представления $X_{\text{СО}}^{\text{Авар}}$ через конструктивные параметры трансформатора не подходят. В работе эта проблема решается двумя способами. В данной главе рассматривается весьма приближенный традиционный подход, в котором обмотки толщинами a_1 и a_2 заменяются тонкими обмотками (рис.4), что необходимо для сравнения со вторым, более точным, подходом, рассматриваемым в 3-ей главе. Здесь полу-

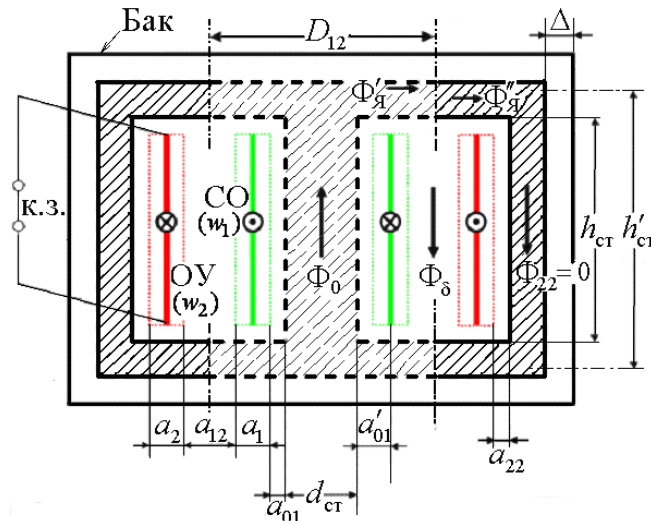


Рис. 4. Двухобмоточный трансформатор УИПРТ с эквивалентными тонкими обмотками без стержня, показанного пунктиром

чено выражение

$$X_{\text{СО}}^{\text{Авар}} = \omega \cdot \mu_0 w_1^2 / [h'_{\text{ст}}/s'_{\delta} + (h'_{\text{ст}} + D_{12})/s'_{\text{ст}}], \quad (2.11)$$

где $s'_{\text{ст}}$ и s'_{δ} – эквивалентные сечения стержня и зазора между тонкими обмотками:

$$s'_{\text{ст}} = \frac{\pi(d_{\text{ст}} + 2a'_{01})^2}{4}, \quad s'_\delta = \pi D_{12} \cdot \left(a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{2} \right).$$

Параметры УИПРТ ($a_1, a_2, a_{12}, d_{\text{ст}}, w_1$) определяются совместным решением системы уравнений:

$$a_2 = a_1, \quad a_1 = \frac{w_1 \cdot s_{\text{пров}} \cdot k_{\text{из1}}}{h_{\text{об}} \cdot k_{\text{зап}}}, \quad D_{12} = d_{\text{ст}} + 2a_{01} + 2a_1 + a_{12}, \quad (2.12)$$

$$d_{\text{ст}} = 0.535 \sqrt{\frac{U_{\text{ТОУ}}^{\text{норм}}}{fw_1 B_m^{\text{xx}} K_3}}, \quad h'_{\text{ст}} = h_{\text{ст}} + \frac{d_{\text{ст}}}{4} + \frac{\Delta}{2}, \quad s'_{\text{ст}} = \frac{\pi(d_{\text{ст}} + 2a'_{01})^2}{4}, \quad (2.13)$$

$$s'_\delta = \pi D_{12} \cdot \left(a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{2} \right), \quad G'_{\text{акт}} = \rho_{\text{Cu}} \cdot V_{\text{Cu}} + \rho_{\text{Fe}} \cdot V_{\text{Fe}} \cdot k_{\text{в}}, \quad (2.14)$$

где $k_{\text{в}}$ – весовой коэффициент, $X_{\text{СО}}^{\text{Авар}} = 1,78$ Ом. Эта нелинейная система из 9 уравнений содержит 10 неизвестных ($a_1, a_2, a_{12}, D_{12}, h'_{\text{ст}}, s'_{\text{ст}}, s'_\delta, d_{\text{ст}}, w_1, G'_{\text{акт}}$), что позволяет, задавшись величиной a_{12} , построить кривую $G'_{\text{акт}} = f(a_{12})$ и определить оптимальное значение a_{12} по минимуму этой кривой. Далее определяются остальные величины (см. третью колонку табл.2.2, соответствующую рис.4).

Таблица 2.2

Конструктивные параметры трансформатора УИПРТ

№	Параметры конструкции УИПРТ	Приближенные по рис. 4	Уточненные по рис. 6
1	Ширина зазора между СО и ОУ	$a_{12} = 0,025$ м	$a_{12} = 0.035$ м
2	Число витков	$w_1 = w_2 = 120$	$w_1 = w_2 = 92$
3	Диаметр стержня	$d_{\text{ст}} = 0,467$ м	$d_{\text{ст}} = 0.532$ м
4	Толщины обмоток СО и ОУ	$a_1 = a_2 = 0,575$ м	$a_1 = a_2 = 0.443$ м
5	Средний диаметр между обмотками	$D_{12} = 1,721$ м	$D_{12} = 1.574$ м
6	Высота стержня	$h_{\text{ст}} = 0,68$ м	$h_{\text{ст}} = 0.68$ м
7	Расход активных материалов	$G'_{\text{акт}}^{\text{УИПРТ}} = 24,263$ т	$G'_{\text{акт}}^{\text{УИПРТ}} = 18.795$ т

В отличие от второй главы, где УИПРТ представлен *идеализированной моделью* в виде r, L_P -ветви, в **третьей главе** УИПРТ представляется *схемой замещения при сверхвысоких напряжениях*, возникающих на нем в результате внезапного к.з. в линии. Поясняется непригодность известной Т-образной схемы замещения трансформатора для анализа его в *сверхнасыщенном состоянии*. Необходимость новой схемы замещения подтверждается экспериментальными исследованиями магнитного поля трансформатора при к.з. на созданных при участии автора на каф.ТОЭ четырех трансформаторов с измерительными витками на стержне и ярмах. Одна из таких установок иллюстрируется на рис.5. Экспериментально подтверждены следующие положения:

1. Возникновение при **к.з. внешней** обмотки *антипотока* в боковом ярме, т.е. магнитного потока $\Phi_{\text{Б}}^{\text{КЗвнеш}}$, имеющего направление, противоположное потоку Φ_0 , создаваемого внутренней обмоткой, при одинаковом напряжении в обоих опытах, и *сверхпотока* в стержне, т.е. магнитного потока $\Phi_{\text{ст}}^{\text{КЗвнеш}}$, превышающего поток х.х. Φ_0 . Второй случай для двухстержневого трансформатора иллюстрируется осциллограммами на рис.5,б.

2. Возникновение при **к.з. внутренней** обмотки *антипотока* в стержне, т.е. магнитного потока $\Phi_{\text{ст}}^{\text{КЗвнутр}}$, имеющего направление, противоположное потоку х.х. Φ_0 , создаваемого внешней обмоткой, при одинаковом напряжении в обоих опытах, и *сверхпотока* в боковом ярме, т.е. магнитного потока $\Phi_{\text{Б}}^{\text{КЗвнутр}}$, превышающего поток х.х. Φ_0 .

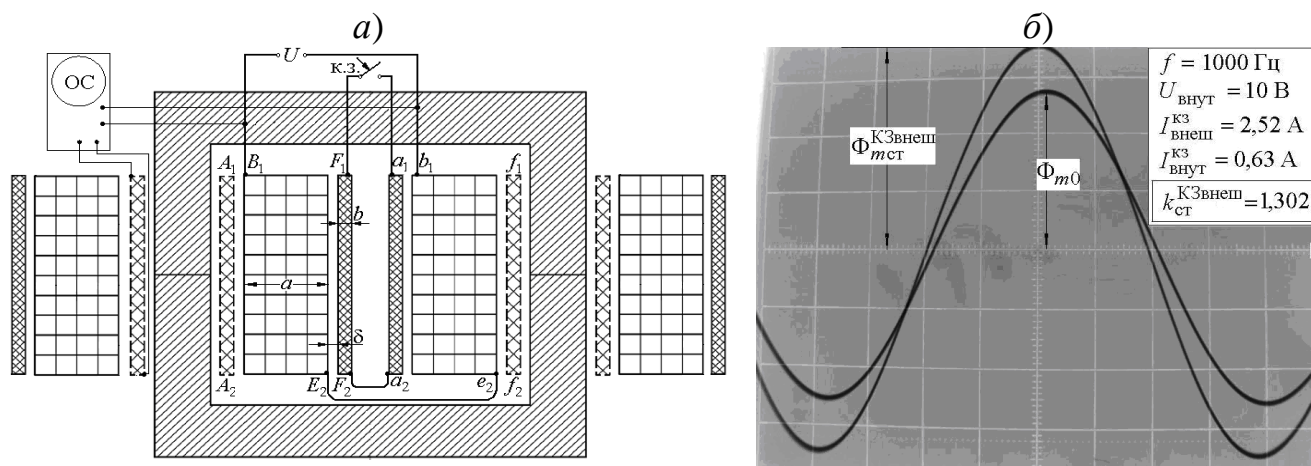


Рис.5. Наблюдение *сверхпотока* в стержне двухстержневого трансформатора

На основе Т-образной схемы замещения невозможно объяснить ни один из приведенных выше эффектов. Новая схема замещения, учитывающая эти явления, представлена на рис.6. Она названа *сверхнасыщенной 2Т-образной* схемой замещения трансформатора

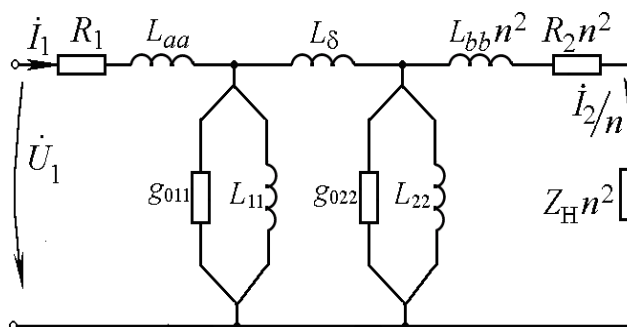


Рис.6. *Сверхнасыщенная 2Т-образная* схема замещения трансформатора

мой замещения, поскольку в ней учитывается, что трансформатор КТОУ попадает под сверхвысокое напряжение, превышающее на порядок номинальное. Эта схема получена из нелинейной 2Т-образной схемы замещения, разработанной на кафедре ТОЭ для установившихся режимов, при этом принято $\mu_{Fe} \rightarrow \mu_0$. В этом случае все элементы 2Т-схемы замещения становится линейными (см.

табл.3.1, где $\alpha_M = R_{ст}^M / R_a^M$, $\beta_M = R_B^M / R_b^M$, $\xi_{ст1} = (2 + \alpha_M) / [2(1 + \alpha_M)]$; R_a^M и R_b^M – магнитные сопротивления пространства, занятого внутренней и внешней обмоткой, $R_{ст}^M$ и R_B^M – магнитные сопротивления стержня и бокового ярма при $\mu_{Fe} = \mu_0$). Расчетная схема замещения линии с КТОУ после внезапного к.з.

Таблица 3.1

Параметры сверхнасыщенной 2Т-образной схемы замещения УИПРТ

Пара метр	Продольные ветви при $\mu_{Fe} \rightarrow \mu_0$	Пара метр	Поперечные ветви при $\mu_{Fe} \rightarrow \mu_0$	Пара метр	Поперечные ветви при $\mu_{Fe} \rightarrow \mu_0$
L_{aa}	$w_1^2 \frac{(4 + 2a / D_a + \alpha_M)}{12R_a^M (1 + \alpha_M)}$	L_{11}	$\frac{w_1^2 (1 + \alpha_M) \xi_{ст1}^2}{\alpha_M R_a^M}$	g_{011}	$\frac{g_{01}}{(1 + \alpha_M) \xi_{ст1}^2}$
L_{bb}	$w_2^2 \frac{(4 - 2b / D_b + \beta_M)}{12R_b^M (1 + \beta_M)}$	L_{22}	$\frac{w_1^2 (1 + \beta_M) \xi_{ст1}^2}{\beta_M R_b^M}$	g_{022}	$\frac{g_{02}}{(1 + \beta_M) \xi_{ст1}^2}$
L_δ	$\frac{w_1^2 (2 + \alpha_M)^2}{R_\delta^M 4(1 + \alpha_M)^2}$				

приведена на рис.7,а, причем УИПРТ представлено 2Т-схемой замещения, как на рис.6, без проводимости g_{011} и g_{022} ввиду их незначительного влияния на переходные процессы в линии. Уравнение состояния схемы (рис.7,а):

$$dx(t)/dt = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x}(t) + \mathbf{B} \cdot u(t), \quad \text{где } \mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} i_{aa} & i_\delta & i_{bb} & i_{кз}^{орп} & u_c \end{bmatrix}^T \quad (3.1)$$

имеет 5-й порядок сложности из-за наличия двух L - сечений (узлов). Поэтому входящие в (3.1) матрицы принимают вид (Δ_{ij} – алгебраические дополнения \mathbf{A}_1):

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{-R_1 \Delta_{11}}{L_{aa} \det \mathbf{A}_1} & \frac{-\Delta_{31} (R_2 n^2 + Z_H n^2)}{L_{aa} \det \mathbf{A}_1} & & & \\ \frac{R_1 \Delta_{12}}{L_\delta \det \mathbf{A}_1} & \frac{\Delta_{32} (R_2 n^2 + Z_H n^2)}{L_\delta \det \mathbf{A}_1} & & & \\ \frac{-R_1 \Delta_{13}}{L_{bb} \det \mathbf{A}_1} & \frac{-\Delta_{33} (R_2 n^2 + Z_H n^2)}{L_{bb} \det \mathbf{A}_1} & & & \\ & & & -\frac{R_c}{L_c} & -\frac{1}{L_c} \\ -\frac{1}{C} & & & \frac{1}{C} & \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta_{11}}{L_{aa} \det \mathbf{A}_1} \\ \frac{-\Delta_{12}}{L_\delta \det \mathbf{A}_1} \\ \frac{\Delta_{13}}{L_{bb} \det \mathbf{A}_1} \\ \frac{1}{L_c} \\ \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} 1 + \frac{L_{11}}{L_{aa}} & -\frac{L_{11}}{L_\delta} & 0 \\ -\frac{L_{11}}{L_{aa}} & 1 + \frac{L_{11}}{L_\delta} + \frac{L_{22}}{L_\delta} & -\frac{L_{22}}{L_{bb}} \\ 0 & -\frac{L_{22}}{L_\delta} & 1 + \frac{L_{22}}{L_{bb}} \end{bmatrix}.$$

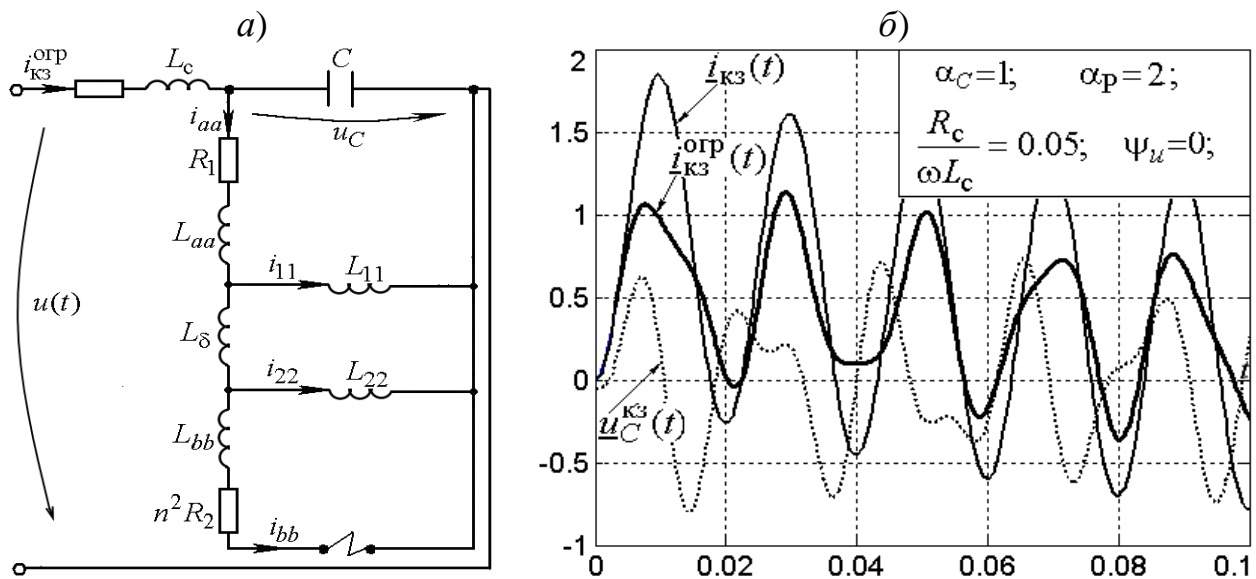


Рис.7. Схема замещения линии (а) и переходный процесс (б) после внезапного к.з.

Результаты интегрирования уравнения состояния (3.1) методом трапеций (рис.7,б) практически совпадают с графиками переходного процесса в линии с идеализированным ТОУ (рис.2,а). Это дает основание при выборе и оптимизации параметров УИПРТ по уравнениям (2.11) – (2.14) вставлять в правую часть (2.11) выражение для сопротивления к.з. сверхнасыщенного трансформатора, найденного по 2Г-схеме (рис.6,а):

$$X_{\text{КЗ}}^{2\text{Г}\delta/c} = \omega \left[L_{aa} + L_{11} \left(\frac{L_{22}L_{bb}}{L_{22} + L_{bb}} + L_{\delta} \right) \right] / \left(L_{11} + \frac{L_{22}L_{bb}}{L_{22} + L_{bb}} + L_{\delta} \right). \quad (3.2)$$

Уточненные конструктивные параметры УИПРТ приведены в четвертой колонке табл.3.1. Приведенная 2Г-схема позволяет проследить за изменениями магнитных потоков в отдельных частях магнитопровода и окна трансформатора в ходе переходных процессов, а также в установившихся режимах (рис.8).

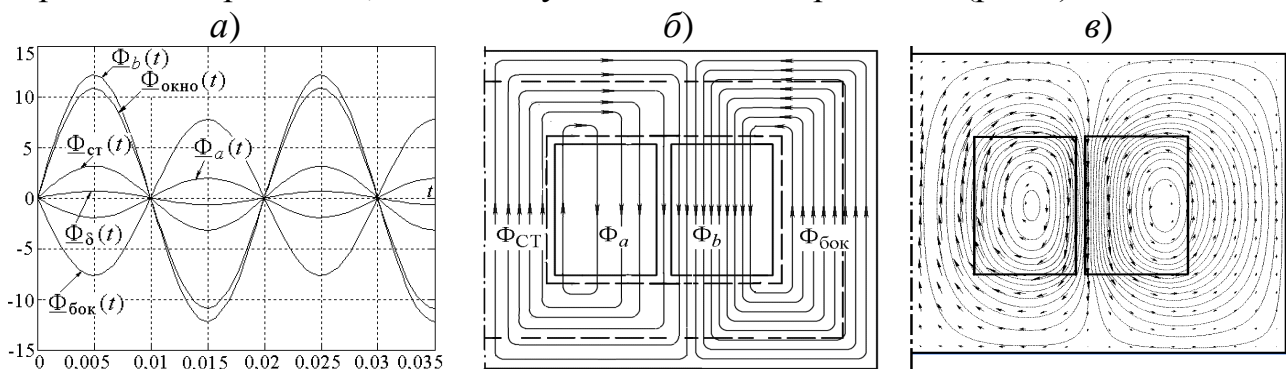


Рис.8. Установившиеся при к.з. внешней обмотки магнитные потоки в стержне, боковом ярме, между обмотками и в пределах обмоток броневых трансформатора УИПРТ, отнесенные к потоку х.х. Φ_0 (а); их приближенная мгновенная картина распределения (б); решение краевой задачи для плоскомеридианного поля трансформатора по методу конечных элементов (в)

Рис.8 иллюстрирует вытеснение магнитного потока из стержня трансформатора в область занятой внутренней обмотки, а также противопоток, воз-

никающий в боковых ярмах при к.з. внешней обмотки трансформатора, что в целом, является дополнительным подтверждением достоверности и корректности 2Т-образной схемы замещения и возможности ее применение для исследования переходного процесса при сверхвысоких напряжениях.

Если в ходе расчета установившегося или переходного процессов в какой-либо момент времени максимальное значение μ_{Fe} в боковом ярме окажется существенно больше μ_0 , то получаемые результаты рассматриваются как сомнительные. В этом случае следует воспользоваться полусверхнасыщенной схемой замещения (рис. 9), в которой параметры линейных элементов рассчиты-

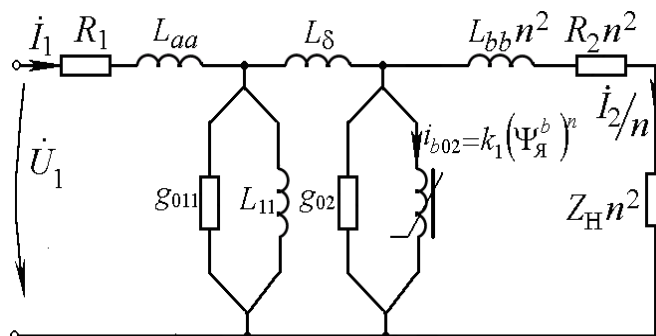


Рис.9. Полусверхнасыщенная 2Т-образная схема замещения трансформатора

ваются по формулам табл.3.1; переменные Ψ_y^b – потокосцепление потока Φ_y^b со вторичной обмоткой; k_1 – коэффициент, который определяется по данным опыта х.х. трансформатора; n – степень параболы, аппроксимирующей кривую намагничивания стали трансформатора.

В четвертой главе рассматривается *квазиферрорезонансное токоограничивающее устройство* (КФТОУ) на основе неуправляемого реактора с ферромагнитным стержнем. Идея создания КФТОУ возникла благодаря особому свойству сверхнасыщенного трансформатора, состоящего в том, что его входные сопротивления при х.х. и к.з. вторичной обмотки оказываются соизмеримыми (мало отличается друг от друга). Поэтому отпадает необходимость в использовании вторичной обмотки и искрового промежутка, как в УИПРТ. Принципиальная схема линии с КФТОУ изображена на рис.10. В нормальном режи-

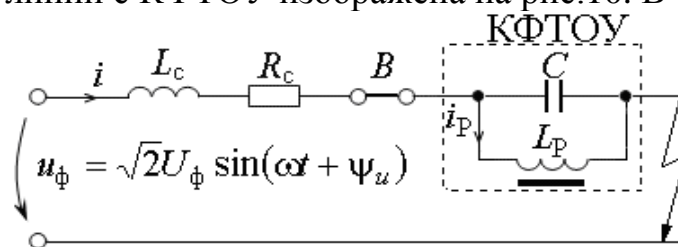
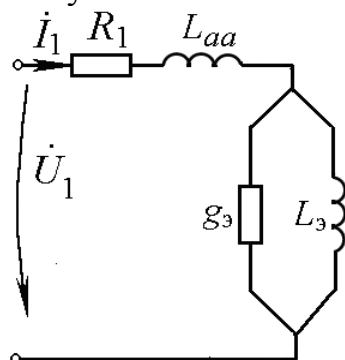


Рис.10. Однолинейная схема линии передачи с квазиферрорезонансным токоограничивающим устройством (КФТОУ)

ме падение напряжения на ТОУ составляет 5% от фазного напряжения линии, магнитопровод реактора не насыщен ($\mu \gg \mu_0$), входное сопротивление реакто-

ра велико и ток через реактор практически не протекает. При к.з. линии ток через конденсатор резко возрастает, увеличивается и напряжение на КФТОУ, вследствие чего магнитопровод реактора сильно насыщается и индуктивное сопротивление реактора резко падает. Подбирая соответствующие значения индуктивного сопротивления реактора в сверхнасыщенном состоянии можно добиться любых показателей ограничения тока β при заданном α_C . Формулы для определения параметров схемы замещения сверхнасыщенного реактора (рис.11) получены на основе 2Т-схемы (рис.6):



$$L_3 = \frac{w_1^2 \xi_{ст1}^2}{R_a^M} \left/ \left(\frac{\alpha_M}{1 + \alpha_M} + \beta'_M \right) \right., \quad g_3 = \frac{g_{01}}{\xi_{ст1}^2} \left(\frac{1}{1 + \alpha_M} + 1 \right), \quad \beta'_M = R_B^M / R_a^M.$$

Рис. 11. Сверхнасыщенная схема замещения реактора при $\mu_{Fe} \rightarrow \mu_0$

Коэффициент β'_M необходимо определять с учетом того, что в сопротивлении R_B^M должно учитываться не только магнитное сопротивление бокового ярма, но и соприкасающееся с ним практически все пространство между обмоткой и баком. По этой схеме находим, что при $g_3 \ll \omega L_3$ индуктивное сопротивление реактора в сверхнасыщенном состоянии $X_{нас}^P \cong \omega(L_{aa} + L_3)$. Эта величина играет решающую роль при определении и оптимизации конструкции реактора.

Алгоритм оптимизации параметров реактора подобен алгоритму определения параметров УИПРТ. По найденным параметрам определяется расход активных материалов $G'_{акт}^P$ и общий объем бака $V_{бак}^P$ реактора. Сравнение этих результатов с расходом активных материалов и объемом бака УИПРТ показало, что $V_{бак}^P / V_{бак}^{УИПРТ} = 0,49$, $G'_{акт}^P / G'_{акт}^{УИПРТ} = 0,45$. Таким образом, и по габаритам и по расходу активных материалов КФТОУ выгоднее КТОУ, содержащего УИПРТ, при том, что процесс ограничения тока в линии в результате внезапного к.з. практически одинаков (рис.7).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрены два вида ТОУ, ограничивающие токи к.з. линии за счет возникновения явления резонанса тока или режима, близкого к резонансу. Первый вид ТОУ представляет собой емкость, включенную параллельно управляемому искровым промежутком реактору трансформаторного типа (УИПРТ), а второй – емкость, включенную параллельно неуправляемому реактору с ферромагнитным сердечником. На основе теоретических и экспериментальных исследований в диссертации получены следующие результаты:

1. Установлено, что динамические процессы при внезапном коротком замыкании (к.з.) в линиях передач с резонансными токоограничивающими устройствами (РТОУ) и квазирезонансными токоограничивающими устройствами (КТОУ), в которых используется управляемый искровым промежутком реактор трансформаторного типа, носят колебательный харак-

тер; получены характеристики этих процессов в аналитической форме; обоснована целесообразность применения КТОУ.

2. Созданы оригинальные макеты по наблюдению сверхпотоков (т.е. потоков, превышающих поток х.х.) и антипотоков (т.е. потоков, имеющих направление, противоположенное потоку х.х.) в магнитопроводе трансформаторов в режиме к.з.
3. Разработаны сверхнасыщенные 2Т-образные схемы замещения УИПРТ, находящегося при сверхвысоких напряжениях с учетом особенностей распределения магнитных потоков при к.з., отмеченных в п.2.
4. Разработаны методика проектирования и оптимизации параметров УИПРТ на основе его 2Т-образных схем замещения.
5. Предложено квазиферрорезонансное токоограничивающее устройство (КФТОУ), более простое, более дешевое по стоимости и более надежное по сравнению с существующими РТОУ и КТОУ.
6. Разработана схемная модель сверхнасыщенного реактора КФТОУ для исследования токоограничения в линии при внезапном к.з.
7. Созданы основы общей методики расчета динамических процессов в линиях передач с КФТОУ при внезапном к.з. в линиях.
8. Разработана методика проектирования и оптимизации неуправляемого реактора КФТОУ.

Основные результаты диссертации публикации в следующих работах

в изданиях, рекомендованных Перечнем ВАК:

1. Дуань Лиюн. Влияние параметров резонансного токоограничивающего устройства на условия ограничения токов короткого замыкания в электрических сетях [Текст] / Г.Н. Александров, Дуань Лиюн, Цзин Хайин // Научно-технические ведомости СПбГПУ, 2008. – № 2. – С.127–132. – Автор 60%.
2. Дуань Лиюн. Антипотоки и сверхпотоки в двухобмоточном трансформаторе в режимах короткого замыкания [Текст] / М.А. Шакиров, В.В. Андрущук, Дуань Лиюн // Научно-технические ведомости СПбГПУ, 2009. – № 2. – С.42–47. – Автор 60%.

В других изданиях:

3. Дуань Лиюн. Квазирезонансное токоограничивающее устройство [Текст] / М.А. Шакиров, Дуань Лиюн // XVI Международная научно-методическая конференция «Высокие интеллектуальные технологии образования и науки», 13–14 февр.2009 г.,СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. – 2009. – С.382–384. – Автор 60%.
4. Дуань Лиюн. Динамический процесс в линии в интервале между моментами к.з. линии и пробоя разрядника КТОУ [Текст] /Дуань Лиюн // XVI Международная научно-методическая конференция «Высокие интеллектуальные технологии образования и науки», 13–14 февр.2009 г.,СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. – 2009. – С.373–376.

5. Дуань Лиюн. Динамические процессы в линии передачи после срабатывания разрядника КТОУ в результате к.з. в линии [Текст] / Дуань Лиюн // XVI Международная научно-методическая конференция «Высокие интеллектуальные технологии образования и науки», 13–14 февр.2009 г.,СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. – 2009. – С.376–378.
6. Дуань Лиюн. Оценка габаритов конденсатора для токоограничителя квазирезонансного типа [Текст] / М.А. Шакиров, Дуань Лиюн // XVI Международная научно-методическая конференция «Высокие интеллектуальные технологии образования и науки», 13–14 февр.2009 г.,СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. – 2009. – С.378–379. – Автор 60%.
7. Дуань Лиюн. Феррорезонансное токоограничивающее устройство [Текст] / М.А. Шакиров, Дуань Лиюн // XVI Международная научно-методическая конференция «Высокие интеллектуальные технологии образования и науки», 13–14 февр.2009 г.,СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. – 2009. – С.384–387. – Автор 60%.
8. Дуань Лиюн. Наблюдение аномальных потоков в магнитопроводах трансформаторов при коротких замыканиях [Текст] /М.А. Шакиров, В.В. Андрущук, Дуань Лиюн // XIII Всероссийская конференция по проблемам науки и высшей школы «Фундаментальные исследования и инновации в технических университетах», 18–19 мая 2009 г.,СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. – 2009. – С.243–245. – Автор 60%.
9. Дуань Лиюн. Сверхвозбужденная 2Т-образная схема замещения трансформатора [Текст] /М.А. Шакиров, Дуань Лиюн // XIII Всероссийская конференция по проблемам науки и высшей школы «Фундаментальные исследования и инновации в технических университетах», 18–19 мая 2009 г.,СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. – 2009. – С.245–247. – Автор 60%.
10. Дуань Лиюн. Распределение магнитных потоков в сверхвозбужденном трансформаторе при коротком замыкании [Текст] / Дуань Лиюн // XIII Всероссийская конференция по проблемам науки и высшей школы «Фундаментальные исследования и инновации в технических университетах», 18–19 мая 2009 г.,СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. – 2009. – С.125–126.
11. Дуань Лиюн. Картина магнитного поля в сверхвозбужденном броневом трансформаторе при коротком замыкании [Текст] / М.А.Шакиров, Ю.В. Варламов, Дуань Лиюн // XIII Всероссийская конференция по проблемам науки и высшей школы «Фундаментальные исследования и инновации в технических университетах», 18–19 мая 2009 г.,СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. – 2009. – С.127–128. – Автор 60%.
12. Дуань Лиюн. Об эффективности применения УШРТ для уменьшения потери мощности на линиях электропередачи [Текст] / Ле Тхань Бак, Дуань Лиюн, Цзин Хайин, Лам Тхань Хоанг, Г.Н. Александров // XXXV Неделя науки СПбГПУ: Материалы Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов 20–25 ноября 2006 г. Ч.II-СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. – 2007. – С.38–39. – Автор 20%.