

ФГБОУ ВО Новосибирский государственный технический университет

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе

 А. Г. Вострецов

2018 г.



ОТЧЕТ

о НИР № ТВН-1-17

**«Исследование антирезонансных свойств трансформаторов напряжения  
НАЛИ-НТЗ-10 и НАЛИ-НТЗ-35 разработки ООО «НТЗ» Волхов»**

Зав. каф. ТЭВН

к.т.н., доц.



Ю.А.Лавров

Ответственный исполнитель НИР

к.т.н., доц.



О.И. Лаптев

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>1. ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>3</b>
<b>2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СЕТИ И ИССЛЕДУЕМЫХ ТН.....</b>	<b>7</b>
2.1. Математические модели антирезонансных ТН НАЛИ-НТЗ-10 и НАЛИ-НТЦ-35.....	7
2.2. Математическая модель сети с изолированной нейтралью и схемы для испытаний ТН на стойкость к феррорезонансу.....	20
2.3. Математическая модель сети с силовым трансформатором.....	26
2.4. Расчёт ёмкостных параметров ВЛ 35 кВ.....	30
<b>3. ИССЛЕДОВАНИЕ СТОЙКОСТИ ТН НАЛИ-НТЗ-10 К ФЕРРОРЕЗОНАНСУ.....</b>	<b>33</b>
3.1. Исследование поведения ТН при моделировании перемежающейся дуги в испытательной схеме.....	33
3.2. Исследование феррорезонансных процессов при отключении ОЗЗ.....	39
3.3. Исследование феррорезонансных процессов при дуговых замыканиях и при горении перемежающейся дуги.....	44
3.4. Стойкость ТН к явлению «ложной земли».....	49
3.5. Неполнофазный режим работы силового трансформатора.....	56
<b>4. ИССЛЕДОВАНИЕ СТОЙКОСТИ ТН НАЛИ-НТЗ-35 К ФЕРРОРЕЗОНАНСУ.....</b>	<b>62</b>
4.1. Исследование феррорезонансных процессов при ОДЗ и отключении ОЗЗ.....	62
4.2. Длительное горение перемежающейся дуги.....	65
4.3. Стойкость ТН к явлению «ложной земли».....	68
4.4. Неполнофазный режим работы силового трансформатора.....	72
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>	<b>74</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....</b>	<b>77</b>

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Режим феррорезонанса является одной из основных причин повреждения электромагнитных ТН. В том числе и в сетях средних классов напряжения 6-35 кВ с изолированной нейтралью. В режиме феррорезонанса в обмотке ВН ТН возникают большие токи, приводящие к разогреву и повреждению обмотки. В некоторых ситуациях феррорезонансные явления могут привести и к ложным срабатываниям защиты от замыкания на землю.

В сетях средних классов напряжения 6-35 кВ с изолированной нейтралью широко применяются трансформаторы напряжения типов ЗНОМ, ЗНОЛ, НТМИ. Принципиальная схема ТН типа НТМИ приведена на рис. 1.1,а. Характерной особенностью перечисленных выше типов ТН является то обстоятельство, что они либо однофазного исполнения, либо в корпусе трёхфазного ТН (НТМИ) находится три отдельных магнитопровода (существуют также пятистержневые магнитопроводы). Такое исполнение необходимо для того, чтобы ТН выполнял одну из своих основных функций в сетях с изолированной нейтралью – обеспечивал измерение напряжения нулевой последовательности (эти трансформаторы часто обозначаются как ТНКИ – трансформатор напряжения для контроля изоляции). Однако такая конструкция ТН приводит к образованию нелинейного шунта намагничивания нулевой последовательности, который может войти в резонанс с ёмкостью сети. Это обстоятельство и определяет сложность борьбы с феррорезонансом в сетях с изолированной нейтралью, так как ТН в любом случае должны выполнять свои основные функции измерительного устройства.

К возникновению феррорезонанса может привести возникновение любой несимметрии сети, в результате которой в контуре нулевой последовательности появится напряжение. В сетях 6-35 кВ основной причиной этих повышений являются однофазные дуговые замыкания на землю (ОДЗ). Эти замыкания характеризуются перенапряжениями уровня  $2.3 - 2.5U_{\phi, \max}$ , возникающими уже при первом зажигании дуги. Горение дуги может сопровождаться многократными зажиганиями и погасаниями, что приводит к большим перенапряжениям. К возникновению феррорезонанса может также приводить отключение однофазного металлического замыкания на землю (ОЗЗ), отключение двухфазных коротких замыканий и прочие нарушения симметрии сети с последующим восстановлением.

Явление феррорезонанса в сетях с изолированной нейтралью достаточно хорошо изучено [1-9] и предусмотрен ряд мер для его предотвращения или демпфирования. Среди мер по предотвращению феррорезонанса в сетях 6-35 кВ следует выделить основную – включение дополнительного активного сопротивления величиной 25 Ом в рассечку обмотки ТН, соединённой в открытый треугольник. Эта мера не является абсолютно эффективной, так как зачастую требуется уменьшать величину активного сопротивления, а это не всегда допустимо по тепловой устойчивости обмоток ТН.

Другой распространённой мерой является включение дополнительных активных сопротивлений последовательно с обмотками ВН трансформаторов напряжения (возможен вариант непосредственного увеличения активного сопротивления обмоток ВН), либо включение сопротивления между нейтральной точкой соединения обмоток ВН и землей. В обоих случаях дополнительные сопротивления включаются последовательно с нелинейной индуктивностью ТН в

резонансный контур, уменьшая падение напряжения на ней при насыщении, и, соответственно, возможности для развития феррорезонанса. Применение этой меры также позволяет предотвратить феррорезонанс при правильно выбранных величинах активных сопротивлений. Но величина этих сопротивлений (включаемых в контур со стороны ВН) должна составлять десятки кОм для эффективного предотвращения феррорезонанса, что технически трудно выполнимо и отрицательно сказывается на метрологических характеристиках ТН.

Весьма эффективной мерой по предотвращению феррорезонанса является резистивное заземление нейтрали сети. Резистор в нейтрали сети входит в резонансный контур параллельно нелинейной индуктивности ТН по нулевой последовательности и, фактически, шунтирует трансформатор напряжения. Применение резистивного заземления нейтрали также позволяет снизить кратности перенапряжений на фазах сети при дуговых замыканиях и обеспечить селективную работу релейной защиты при однофазных замыканиях на землю (определение повреждённого присоединения).

Одной из наиболее эффективных мер по предотвращению феррорезонанса является применение антирезонансных ТН. Можно выделить несколько конструкций антирезонансных ТН, выпускаемых в России: ТН типа НАМИ, выпускаемые Раменским заводом электрооборудования, ТН типа НАЛИ-СЭЩ выпускаемые ЗАО "ГК "Электроцит"- ТМ Самара", трехфазные антирезонансные группы ТН типа 3хЗНОЛ Свердловского завода трансформаторов тока и рассматриваемые в настоящей НИР ТН типа НАЛИ-НТЗ производства ООО «Невский трансформаторный завод «Волхов».

Наиболее используемым в настоящее время техническим решением по обеспечению ТН антирезонансными свойствами является включение в нейтральную точку соединения обмоток ВН фаз дополнительного трансформатора, так называемого трансформатора нулевой последовательности (ТНП). При этом существует две основных концепции использования этого трансформатора.

Первая концепция была положена в основу конструкции ТН типа НАМИ Раменского завода. В этом ТН для предотвращения феррорезонанса магнитопровод ТН выполняется трёхстержневым, тем самым исключая возможность существования магнитного потока нулевой последовательности значительной величины и, следовательно, источника ЭДС в контуре нулевой последовательности. Устойчивый колебательный процесс в контуре нулевой последовательности становится невозможен. Сам ТН при такой конструкции теряет возможность выполнять измерения напряжения нулевой последовательности. Соответственно дополнительный трансформатор ТНП включённый между нейтральной точкой соединения обмоток ТН и землёй в данном случае необходим для выполнения функции контроля изоляции. Принципиальная схема ТН типа НАМИ приведена на рис. 1.1,б.

Вторая концепция применения ТНП использовалась в ТН типа НАМИТ производства предприятия «Самарский трансформатор» и в трёхфазных антирезонансных группах ТН типа НАЛИ-СЭЩ. Принцип действия этих ТН основан на использовании изобретения А.с.№1319158 СССР, МНИ НО2Н9/04 «Устройство для защиты от резонансных перенапряжений трансформатора напряжения в сети с изолированной нейтралью» //Ю.А.Степанов, А.П.Кузнецов, М.Н.Игнатьев//Открытие. Изобретения.1987.№23.

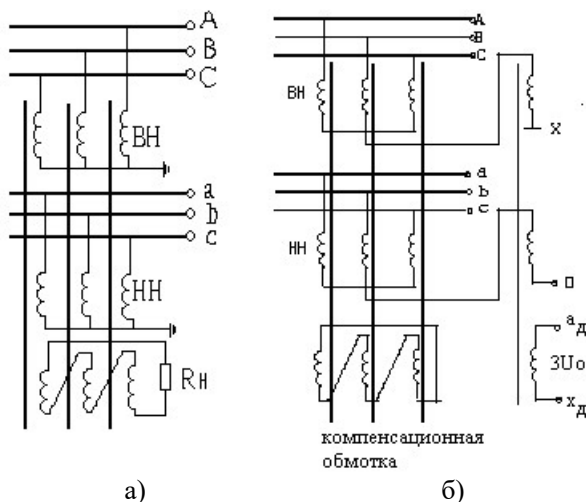


Рис. 1.1. Принципиальные схемы соединения обмоток ТН типа НТМИ (а) и НАМИ (б)

Поскольку ТН представляет собой трёхфазную группу однофазных ТН, в нём возможно существование магнитного потока нулевой последовательности (несимметрии магнитных потоков в магнитопроводах фаз) и измерение напряжения нулевой последовательности при помощи дополнительной обмотки, соединённой в разомкнутый треугольник.

ТНП в схеме таких ТН играет роль непосредственно антирезонансного устройства. Включённый напрямую в контур нулевой последовательности сети, он демпфирует возникающие в нём колебательные процессы за счёт своего большого реактивного сопротивления. В ТН типа НАМИТ и ранних версиях ТН типа НАЛИ-СЭЩ была предусмотрена специальная релейная схема, обеспечивающая размыкание вторичной обмотки ТНП в случае возникновения феррорезонанса. В нормальном режиме работы ТН вторичная обмотка была замкнута, и ТНП обладал реактивным сопротивлением  $K3$  (маленьким), чтобы не слишком влиять на метрологические характеристики ТН.

Схема соединения обмоток трёхфазной группы ТН типа НАЛИ-СЭЩ приведена на рис.1.2.

В настоящее время от практики применения релейных схем для обеспечения ТН антирезонансными свойствами стали отходить. Так поздние модификации ТН типа НАЛИ-СЭЩ не имеют таких схем, ТНП там эксплуатируется с постоянно разомкнутой вторичной обмоткой, которая используется для измерения напряжения нулевой последовательности.

Несмотря на схожесть описанных выше конструкций ТН с применением ТНП, между ними есть принципиальное отличие. В конструкции ТН типа НАМИ устойчивый феррорезонансный процесс невозможен в принципе (в резонансном контуре нет источника ЭДС), в ТН типа НАМИТ и НАЛИ-СЭЩ устойчивый феррорезонанс может иметь место в случае насыщения ТНП, эксплуатации ТНП с замкнутой вторичной обмоткой (такие случаи имели место для ТН типа НАМИТ).

ТН типа НАЛИ-НТЗ, разработанный и выпускаемый ООО «Невский трансформаторный завод «Волхов» использует первую концепцию применения ТНП (аналог ТН типа НАМИ). Магнитопровод ТН НАЛИ-НТЗ – трёхстержневой,

т.е. существование магнитного потока нулевой последовательности исключается. ТНП используется для измерения напряжения нулевой последовательности и обладает существенно сниженной рабочей индукцией.

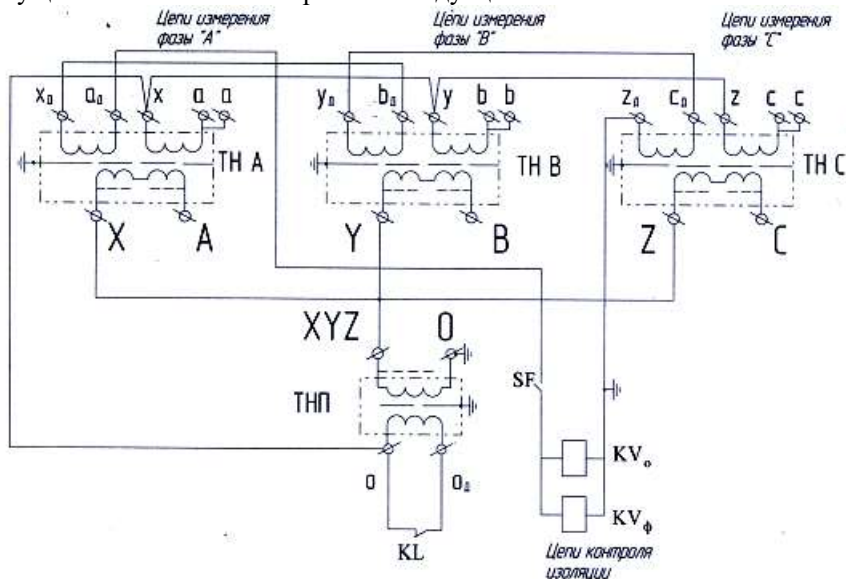


Рис.1.2. Схема соединения обмоток трёхфазной группы ТН НАЛИ-СЭЩ

Основной целью данной НИР является исследование антирезонансных свойств ТН типа НАЛИ-НТЗ-10 и НАЛИ-НТЗ-35 производства ООО «Невский трансформаторный завод «Волхов». Существенным обстоятельством является то, что на заводе была разработана испытательная схема для проверки стойкости ТН 10 кВ к горению перемежающейся дуги и имеется большое количество опытных осциллограмм. Исследование поведения ТН в испытательной схеме и сравнение расчётных и опытных осциллограмм позволит проверить достоверность математических моделей.

Для достижения поставленной цели в НИР решаются следующие задачи:

- Разработка математических моделей исследуемых ТН НАЛИ-НТЗ-10 и НАЛИ-НТЗ-35 и определение параметров трансформаторов, входящих в их состав (ТПП-10, ТНП-10, ТПП-35, ТНП-35);
- Разработка математических моделей сети с изолированной нейтралью при исследовании процессов при однофазных замыканиях на землю, при неполнофазном режиме работы силового трансформатора;
- Разработка математической модели силового трансформатора;
- Исследование процессов в ТН при приведенных выше аварийных воздействиях;
- Исследование поведения ТН типа НАЛИ-НТЗ-10 в испытательной схеме, используемой для проверки стойкости ТН к перемежающейся дуге.
- Формулировка общего заключения об антирезонансных свойствах исследуемых ТН.

### 3. ИССЛЕДОВАНИЕ СТОЙКОСТИ ТН НАЛИ-НТЗ-10 К ФЕРРОРЕЗОНАНСУ

#### 3.1 Исследование поведения ТН при моделировании перемежающейся дуги в испытательной схеме

Схема испытательной установки для моделирования горения перемежающейся дуги приведена в разделе 2, на рис.2.18. Основная идея этой установки заключается в воспроизведении однофазного замыкания на землю при помощи специального устройства. Принцип действия этого устройства описывается в [20]: «Дуговой короткозамыкатель (искровой промежуток, обдуваемый регулируемой струей воздуха). Замыкатель выполнен следующим образом: два стальных электрода, расположенных на достаточном для исключения электрического пробоя по воздуху расстоянии друг от друга, замыкаются через стальную пластину перекрывающую по размерам электроды. На один электрод подается фазное напряжение с одной из фаз испытуемого трансформатора, другой электрод надежно заземляется. Металлическая пластина приводится в движение струей воздуха направленной с вентилятора таким образом, чтобы в местах контакта пластины и электродов возникала перемежающаяся дуга. Скорость потока воздуха регулируется путем изменения оборотов двигателя вентилятора».

В протоколе испытаний ТН на стойкость к перемежающейся дуге [13] приводятся осциллограммы процесса горения перемежающейся дуги. Эти осциллограммы приведены на рис.3.1. Также производитель ТН предоставил ещё несколько осциллограмм подобных процессов, приведенные на рис.3.2 и 3.3. Важно понимать, что при таком способе моделирования горения дуги, последняя ведёт себя крайне непредсказуемо, что приводит к определённым трудностям при анализе осциллограмм. В частности, при малом расстоянии между подвижным и заземлённым электродом могут иметь место очень частые зажигания/погасания дуги, также дуга гаснет совершенно случайным образом (сразу, через 1-2 периода высокой частоты, через 1-2 периода промышленной частоты и т.д.). Поэтому, в качестве характерных опытных осциллограмм (рис.3.1-3.3) были выбраны наиболее удачные участки процесса горения дуги в испытательной установке.

На рис.3.1-3.3 фаза, на которой установлен дуговой короткозамыкатель, это фаза *a*. Из опытных осциллограмм сразу можно сделать несколько интересных наблюдений:

1. Время горения дуги – 2...4мс (дуга явно горит не по гипотезе Петерсена);
2. Среднее время между зажиганиями дуги – 10мс (полпериода промышленной частоты);
3. Несмотря на постоянные зажигания/погасания дуги ток в нейтрали ТН (в обмотке ТНП) изменяется крайне слабо.

Последнее обстоятельство представляет наибольший интерес. По результатам испытаний в протоколе [16] горение перемежающейся дуги в течение 1 часа привело к нагреву испытуемого трансформатора всего на 22,6°С. Т.е. существенного увеличения тока в обмотках ТН действительно не произошло. Целесообразно попытаться смоделировать процессы в испытательной установке для лучшего понимания работы исследуемых ТН в подобном режиме а также для проверки достоверности полученных математических моделей ТН.

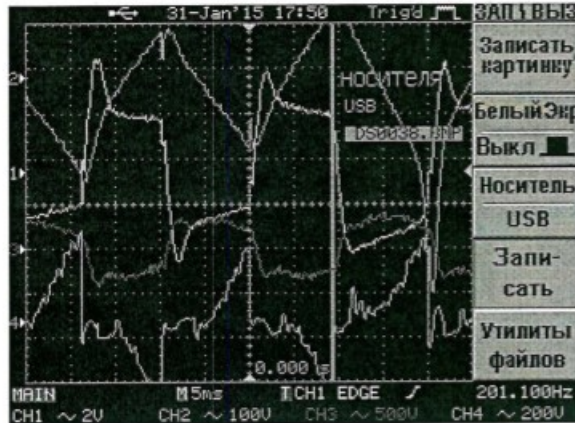


Рис.3.1. Опытные осциллограммы поведения трансформатора напряжения НАЛИ-НТЗ-10 при горении перемежающейся дуги в испытательной схеме (1 – напряжение на выводах  $a_d-x_d$ ; 2 – ток обмотке ТНП; 3 – напряжение на фазе  $b$ ; 4 – напряжение на фазе  $a$ )

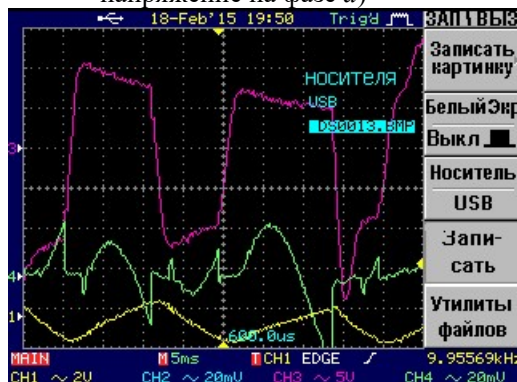


Рис.3.2. Опытные осциллограммы поведения трансформатора напряжения НАЛИ-НТЗ-10 при горении перемежающейся дуги в испытательной схеме (1 – ток в обмотке ТНП; 3 – напряжение на выводах  $a_d-x_d$ ; 4 – напряжение на фазе  $a$ )

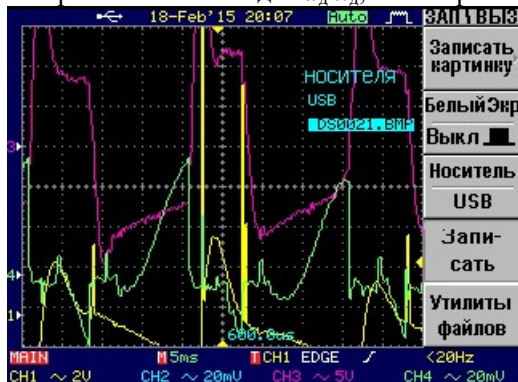


Рис.3.3. Опытные осциллограммы поведения трансформатора напряжения НАЛИ-НТЗ-10 при горении перемежающейся дуги в испытательной схеме (1 – ток в обмотке ТНП; 3 – напряжение на выводах  $a_d-x_d$ ; 4 – напряжение на фазе  $a$ )



Основные параметры математической модели испытательной установки, за исключением параметров модели ТН (описаны в разделе 2.1), приведены в табл.3.1.

Таблица 3.1

Параметры математической модели испытательной установки

$R_s$ , Ом	$L_s$ , Гн	$R_{s0}$ , кОм	$R_N$ , Ом	$C_N$ , мкФ	$C_\phi$ , мкФ	$R_d$ , Ом
60	0,143	200	50	1,4	0,1	50

В таблице 3.1:  $R_s, L_s, R_{s0}$  - параметры источника (трансформатора ТМ-100/10);  $R_N, C_N$  - параметры резистора и конденсатора в нейтрали источника;  $C_\phi$  - конденсаторы, моделирующие ёмкость фазы сети на землю;  $R_d$  - сопротивление в цепи «короткозамыкателя» (сопротивление дуги).

Для моделирования погасания дуги необходимо определить частоту собственных колебаний в испытательной схеме (рис.2.18) при замкнутой фазе. С учётом дополнительной ветви с сопротивлением и ёмкостью в нейтрали источника эта задача становится нетривиальной. Определить частоты собственных колебаний можно из решений характеристического уравнения (3.1):

$$p^4 + Ap^3 + Bp^2 + Cp + D = 0, \quad (3.1)$$

где:

$$A = \frac{2\omega_2^2}{\delta_1} + \delta_3 + \delta_4,$$

$$B = \left(1 + \frac{\delta_1}{\delta_2}\right) \cdot 2\omega_2^2 + \omega_2^2 + \delta_3\delta_4 + 4\omega_1^2,$$

$$C = 2\delta_1\omega_2^2 + \delta_3\omega_2^2 + 4\delta_4\omega_1^2,$$

$$D = 4\omega_1^2\omega_2^2,$$

$$\omega_1^2 = \frac{1}{L_s C_\phi}, \omega_2^2 = \frac{1}{L_s C_N}, \delta_1 = \frac{R_s + R_d}{L_s}, \delta_2 = \frac{1}{R_N C_N}, \delta_3 = \frac{R_s}{L_s}, \delta_4 = \frac{R_s + R_N + R_d}{L_s}.$$

Корни уравнения (3.1) приведены в табл.3.2.

Табл.3.2

Решение характеристического уравнения испытательной установки

$p_1$ , 1/мс	$p_2$ , 1/мс	$p_3$ , 1/мс	$p_4$ , 1/мс
-0,5703+16,995i	-0,5703-16,995i	-0,5467+2.12i	-0,5467-2.12i

Из корней характеристического уравнения видно, что при замыкании одной фазы на землю в испытательной установке возникает процесс, характеризующийся двумя частотами:  $f_1 = 2,7$  кГц,  $f_2 = 337$  Гц.

Горение дуги по гипотезе Петерсена означает, что дуга погаснет при первом переходе через 0 тока высокой частоты. В данном случае нецелесообразно рассматривать первую собственную частоту (2,7 кГц), т.к. полпериода здесь равны 0,2мс, а из опытных осциллограмм явно видно, что дуга горит дольше. Поэтому далее рассматривается гашение дуги через полпериода второй собственной частоты (337Гц) после зажигания, т.е. через 1,5мс.

Компьютерные осциллограммы процесса горения перемежающейся дуги в испытательной установке при гашении дуги через 1,5мс после зажигания приведены на рис.3.4.

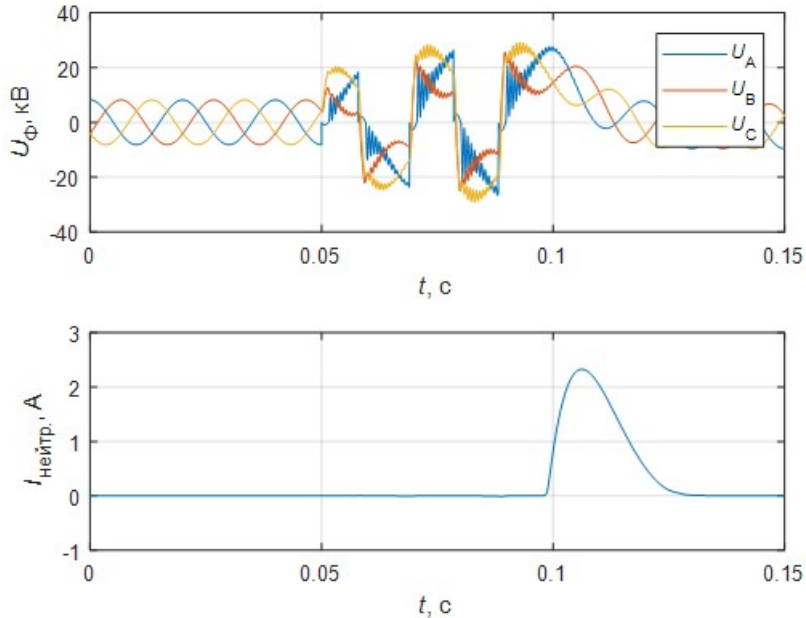


Рис.3.4. Компьютерные осциллограммы напряжения на фазах испытательной установки и тока в обмотке ТНП при моделировании погасания дуги через 1,5мс после зажигания.

Из осциллограммы напряжений на рис.3.4 видно, что возникает характерный процесс «эскалации» перенапряжений, обусловленных дугowymi замыканиями. При этом на время перемежающихся дугowych замыканий заметного увеличения тока в нейтрали ТН (в обмотке ТНП) не происходит. После погасания последней дуги спустя какое то время возникает однократный бросок тока намагничивания большой амплитуды.

Наблюдаемое достаточно просто объяснить: поскольку в трансформаторе прямой последовательности отсутствует магнитный поток нулевой последовательности, этот трансформатор не участвует в процессах, происходящих в контуре нулевой последовательности моделируемой сети с изолированной нейтралью. Трансформатор нулевой последовательности имеет очень низкую рабочую индукцию и не насыщается даже при значительном повышении напряжения на нейтрали сети (в контуре нулевой последовательности). Но это справедливо только для **переменного напряжения** на нейтрали сети. При этом переменность напряжения нейтрали может иметь любую природу: за счёт прямого подключения к нейтрали источника ЭДС (при однофазном замыкании на землю) или постоянная перезарядка нейтрали в процессе дугowych замыканий. В случае, если на нейтрали достаточно длительное время будет неизменное напряжение, то постепенно произойдёт насыщение ТНП, резкое снижение его индуктивности и разрядка ёмкости нулевой последовательности сети (напряжения на нейтрали) через ТНП со значительным увеличением тока, что и наблюдается на рис.3.4.

Целесообразно получить осциллограммы именно тех сигналов, которые приведены на опытных осциллограммах на рис.3.1-3.3, а именно: напряжение на вторичной обмотке ТНП, ток в нейтрали ТНП, напряжение на замыкаемой фазе А.

Расчётные осциллограммы этих сигналов для процесса на рис.3.4 приведены на рис.3.5.

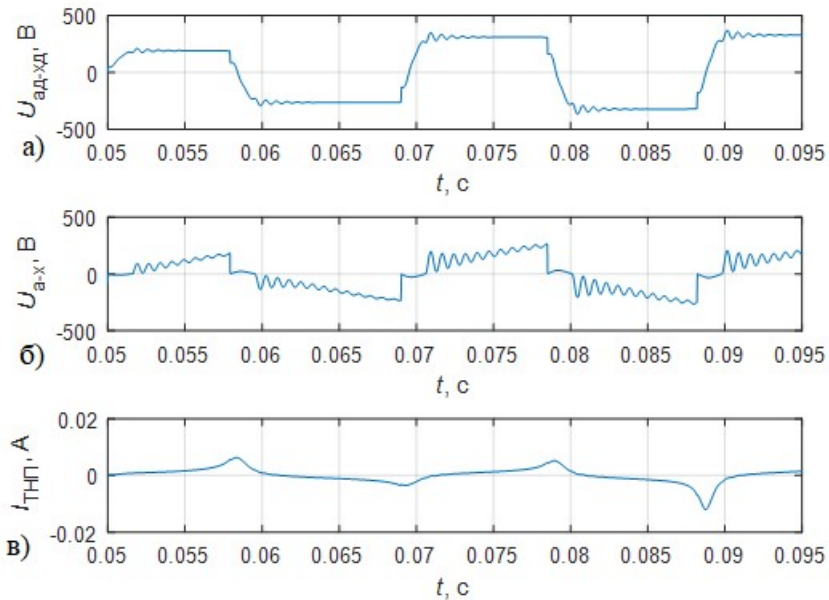


Рис.3.5 Компьютерные осциллограммы напряжения на вторичной обмотке ТНП (а), напряжения на основной вторичной обмотке ТН коммутируемой фазы (б) и ток в нейтрали ТН (в) при гашении дуги через 1,5мс.

Характер осциллограмм на рис.3.5 близок к опытным, но, тем не менее, есть ряд отличий. Основная причина отличий кроется в том, что дуга горит в течение более долгого времени. Особенно это заметно на рис.3.1, где время горения дуги после каждого зажигания составляет порядка 4мс. Поэтому было выполнено моделирование погасания дуги через два полупериода второй собственной частоты (3мс). Компьютерные осциллограммы данного процесса приведены на рис.3.6.

Осциллограммы на рис.3.6 значительно ближе к опытным, особенно к осциллограммам на рис.3.1. Замечен характерный горб в начале пологой части полуволн напряжения на вторичной обмотке ТНП (на нейтрали сети). Это объясняется тем, что ёмкость нулевой последовательности за время горения дуги успевает зарядиться и начинает разряжаться. После погасания дуги на нейтрали остаётся то напряжение, которое было на ней в момент погасания.

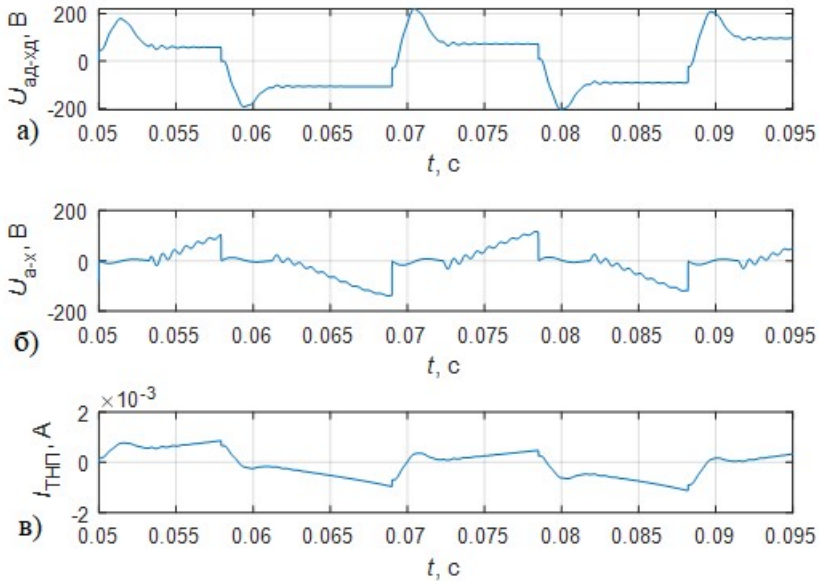


Рис.3.6 Компьютерные осциллограммы напряжения на вторичной обмотке ТНП (а), напряжения на основной вторичной обмотке ТН коммутируемой фазы (б) и ток в нейтрали ТН (в) при гашении дуги через Змс.

В целом, анализируя опытные осциллограммы на рис.3.1-3.3 и результаты компьютерного моделирования на рис.3.5-3.6 можно сделать заключение, что математические модели сети с изолированной нейтралью (в данном случае – модель испытательной установки) и исследуемых трансформаторов напряжения являются достаточно достоверными.

Очень интересным обстоятельством является поведение трансформатора при горении перемежающейся дуги, в т.ч. и после погасания последней дуги. Во время горения перемежающейся дуги (интервал между зажиганиями 10мс) ток в ТНП относительно номинального тока увеличивается несущественно. При более длительном интервале между зажиганиями дуги, в данном случае, после погасания последней дуги ТНП насыщается постоянным напряжением на нейтрали (которому просто некуда деваться) и возникает бросок тока большой амплитуды.

Таким образом, ТНП (и весь антирезонансный ТН в целом) **тем более** стоек к горению перемежающейся дуги, **чем меньше** у неё интервал между зажиганиями и погасаниями (т.е. чем более интенсивно горит дуга). Парадоксально, но большую опасность для ТН данной конструкции могут представлять одиночные зажигания и погасания дуги («клевики земли») следующие с интервалом более 10 мс. Это обстоятельство исследуется в следующих разделах НИР.

### 3.2 Исследование феррорезонансных процессов при отключении ОЗЗ

Отключение однофазных замыканий на землю – весьма распространённый процесс в сетях с изолированной нейтралью. Как правило, при возникновении ОЗЗ отключается лишь повреждённое присоединение (за исключением случаев, когда замыкание возникает на шинах питающей подстанции). При этом восстанавливается нормальный режим работы сети.

Отключение ОЗЗ является чрезвычайно опасной коммутацией с точки зрения возникновения феррорезонанса. В режиме ОЗЗ магнитопроводы двух фаз ТН насыщены, в контуре нулевой последовательности сети с ТН возникает составляющая магнитного потока нулевой последовательности. Отключение ОЗЗ может привести к выполнению условий существования устойчивого феррорезонанса в контуре нулевой последовательности.

Традиционные трансформаторы напряжения весьма подвержены повреждениям в подобных режимах. Для примера на рис.3.7 приведена компьютерная осциллограмма процесса при отключении ОЗЗ в трансформаторе типа НТМИ-10.

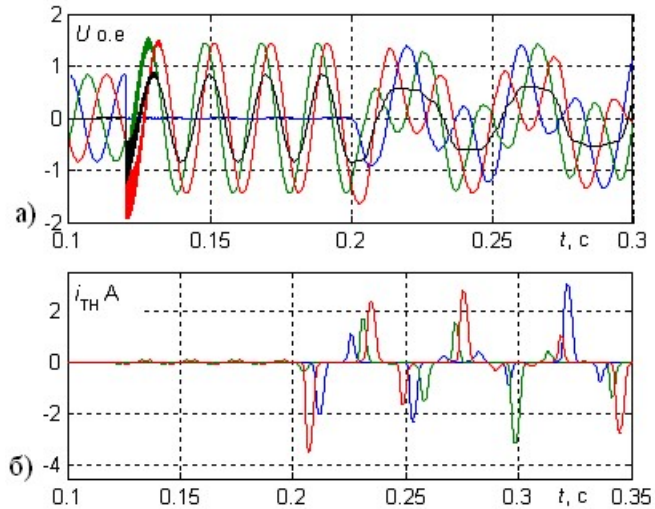


Рис.3.7. Компьютерные осциллограммы напряжений на фазах сети (а) и тока в обмотке ВН ТН типа НТМИ-10 (б) при отключении ОЗЗ

Из рис.3.7 видно, что после отключения ОЗЗ в сети возникает устойчивый режим феррорезонанса. При этом напряжение на нейтрали сети  $U_0$  колеблется с некоторой частотой, а токи в фазах ТН существенно увеличиваются. Феррорезонансный процесс существует в контуре нулевой последовательности сети, междуфазные напряжения сети при этом не изменяются. Подобный процесс иногда также называют автоколебательным процессом в контуре нулевой последовательности.

Область существования устойчивого феррорезонанса в контуре нулевой последовательности сети 10 кВ при отключении ОЗЗ в зависимости от ёмкости сети и числа ТН типа НТМИ-10 приведена на рис.3.8.

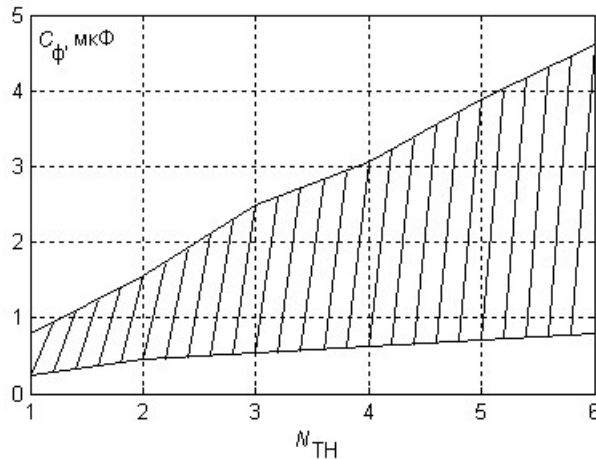


Рис.3.8. Область существования феррорезонанса при отключении ОЗЗ в сети 10 кВ с ТН типа НТМИ-10

Область существования феррорезонанса, приведенная на рис.3.8 получена непосредственным большим числом моделирований процессов в трёхфазной сети с изолированной нейтралью при варьировании ёмкости сети и количества ТН. Этот метод решения различных нелинейных задач, как правило, называют «методом грубой силы» (brute force). В данном случае для каждого конкретного количества ТН рассчитывается зависимость действующего тока в обмотке ВН ТН за определённое время после нарушения симметрии сети (время, достаточное для того, чтобы если условия устойчивого феррорезонанса не соблюдаются, колебания токов намагничивания в обмотках успели затухнуть) от ёмкости фазы сети на землю. Пример такой зависимости приведен на рис.3.9.

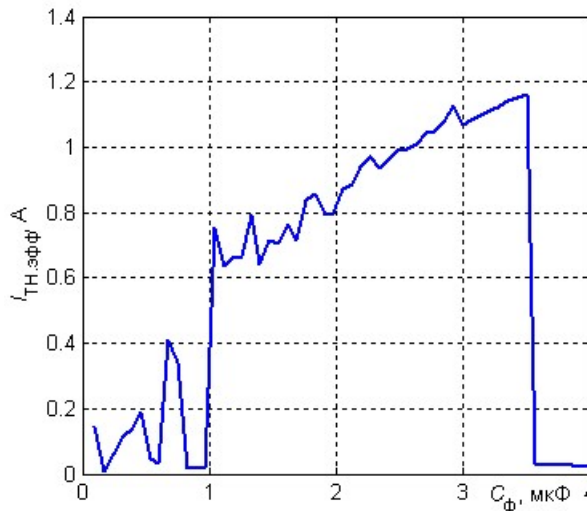


Рис.3.9. Пример расчёта области существования феррорезонанса в виде зависимости действующего значения тока в обмотке ВН ТН за определённое время после нарушения симметрии сети от ёмкости фазы сети.

Из рис.3.9 видно, что характерной областью устойчивого феррорезонанса является диапазон ёмкостей фазы на землю: 1...3,5 мкФ. При меньших значениях имеет место неустойчивый процесс со значительно меньшими токами, а при больших вообще любые процессы достаточно быстро затухают.

Целесообразно исследовать поведение ТН типа НАЛИ-НТЗ-10 в подобной ситуации (при отключении ОЗЗ), а также попробовать получить области существования феррорезонанса в виде зависимостей, аналогичных рис.3.8, 3.9.

Параметры расчётной схемы были несколько изменены, по сравнению с разделом 3.1. Во первых все расчёты целесообразно выполнять при наибольшем рабочем напряжении источника ЭДС. Также целесообразно в качестве источника ЭДС взять трансформатор большей мощности. Для выполняемых ниже расчётов в качестве источника был взят силовой трансформатор ТДН-16000/110/10. Также для расчётов используется схема сети, приведенная на рис.2.17 (без дополнительного конденсатора в нейтрали источника). Параметры математической модели приведены в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Параметры математической модели сети с изолированной нейтралью

$R_s$ , Ом	$L_s$ , Гн	$R_{s0}$ , кОм	$E$ , кВ	$C_{\phi\phi}$ , мкФ	$C_{\phi}$ , мкФ	$R_d$ , Ом
0,15	0,003	9	9,8	0	1*	10

\* - для некоторых компьютерных осциллограмм и при расчёте областей существования феррорезонанса этот параметр варьируется.

В таблице 3.1:  $R_s, L_s, R_{s0}$  - параметры источника;  $C_{\phi}$  - ёмкость фазы сети на землю;  $C_{\phi\phi}$  - междуфазная ёмкость сети (принимается равной 0);  $R_d$  - сопротивление дуги;  $E$  - ЭДС источника ( $12 \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$  кВ).

Компьютерные осциллограммы процесса при отключении ОЗЗ в сети 10 кВ с ТН типа НАЛИ-НТЗ-10 приведены на рис.3.10. Из рис.3.10 видно, что устойчивого феррорезонансного процесса при установке в сети ТН типа НАЛИ-НТЗ-10 не возникает. В целом наблюдается то же явление, которое было получено при моделировании поведения трансформатора в испытательной схеме в разделе 3.1. При ОЗЗ токи в фазах ТПП практически не изменяются, в обмотке ТНП возникает ток в единицы миллиампер. Это было показано ещё в разделе 2 (рис.2.20). После отключения ОЗЗ (в момент времени 0,15с) спустя некоторое время ТНП насыщается постоянным напряжением, оставшимся на ёмкости нулевой последовательности сети (на нейтрали), его реактивное сопротивление резко снижается, в обмотке ТНП возникает бросок тока большой амплитуды. Нейтраль сети быстро разряжается через ТНП и симметрия сети восстанавливается.

Однократный бросок тока в обмотках ТН, показанный на рис.3.10 не представляет никакой опасности для ТН, т.к. не обладает энергией, достаточной для существенного нагрева проводника обмотки ВН ТН и изоляции. Амплитуда этого броска тока определяется величиной ёмкости фазы на землю и напряжением на нейтрали в момент отключения ОЗЗ (энергией, запасённой на ёмкости нулевой последовательности) а также – от параметров ТН.

Любопытным обстоятельством является то, что процесс разряда ёмкости нулевой последовательности сети через ТНП является колебательным (в т.ч. и для процесса, приведенного на рис.3.10).

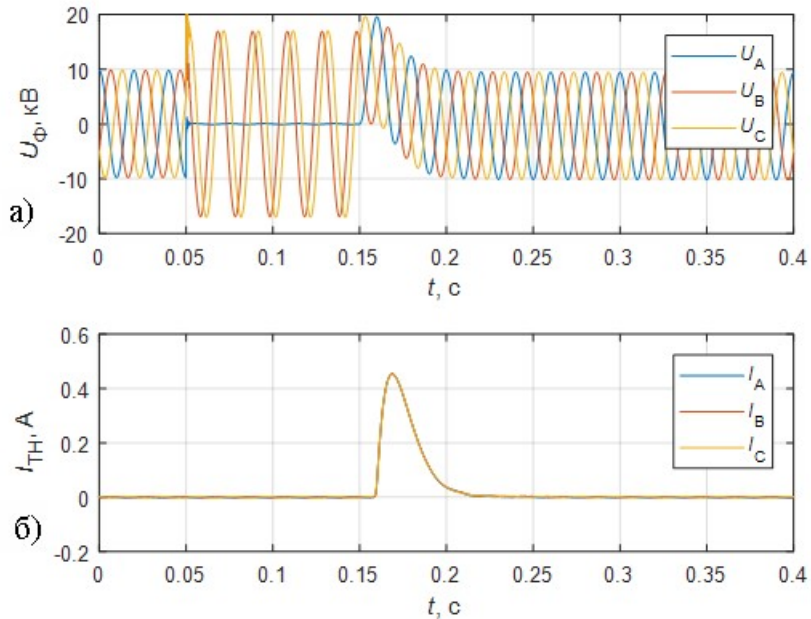


Рис.3.10. Компьютерные осциллограммы напряжений на фазах сети (а) и тока в обмотке ВН (б) ТН НАЛИ-НТЗ-10 при отключении ОЗЗ

При этом, частота этих затухающих колебаний будет непрерывно возрастать по мере уменьшения магнитного потока в магнитопроводе ТНП (увеличения его индуктивности). Более наглядно колебательный процесс разряда ёмкости можно получить, если в модели задать меньшую ёмкость фазы сети на землю (большую начальную частоту колебаний). Пример такого процесса приведен на рис.3.11.

На рис.3.12. приведена зависимость действующего тока в обмотке ВН (наибольшего из трёх фаз) в установившемся после отключения ОЗЗ режиме от ёмкости сети (в сети восемь параллельно работающих ТН типа НАЛИ-НТЗ-10). Из рис.3.12 видно, что в указанном диапазоне ёмкостей фазы сети на землю устойчивого феррорезонанса в исследуемом ТН не возникает. Выполнять расчёты для другого количества ТН в сети, или для иного диапазона ёмкостей нецелесообразно. Существование устойчивого феррорезонанса или самоподдерживающихся колебаний в контуре нулевой последовательности сети с изолированной нейтралью возможно только при наличии в этом контуре источника ЭДС. В традиционных ТН и в антирезонансных ТН некоторых типов, представляющих собой трёхфазную группу однофазных ТН, источником ЭДС является ЭДС самоиндукции потока нулевой последовательности (несимметрии магнитных потоков в магнитопроводах фаз). В ТН типа НАЛИ-НТЗ поток нулевой последовательности в ТПП отсутствует, источника ЭДС в контуре нулевой последовательности нет и любые колебательные процессы в нём будут принципиально затухающими.



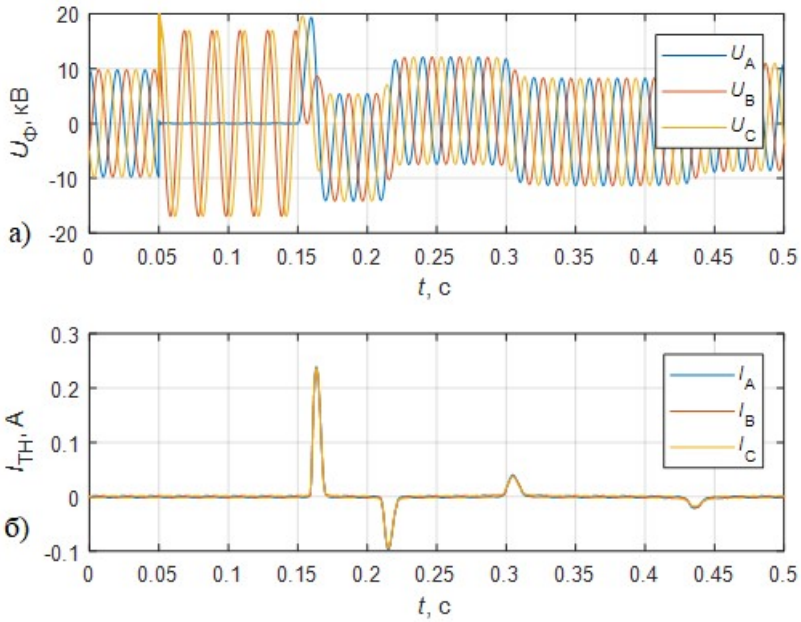


Рис.3.11. Компьютерные осциллограммы напряжений на фазах сети (а) и тока в обмотке ВН (б) ТН НАЛИ-НТЗ-10 при отключении ОЗЗ и ёмкости фазы сети, равной 0,1 мкФ.

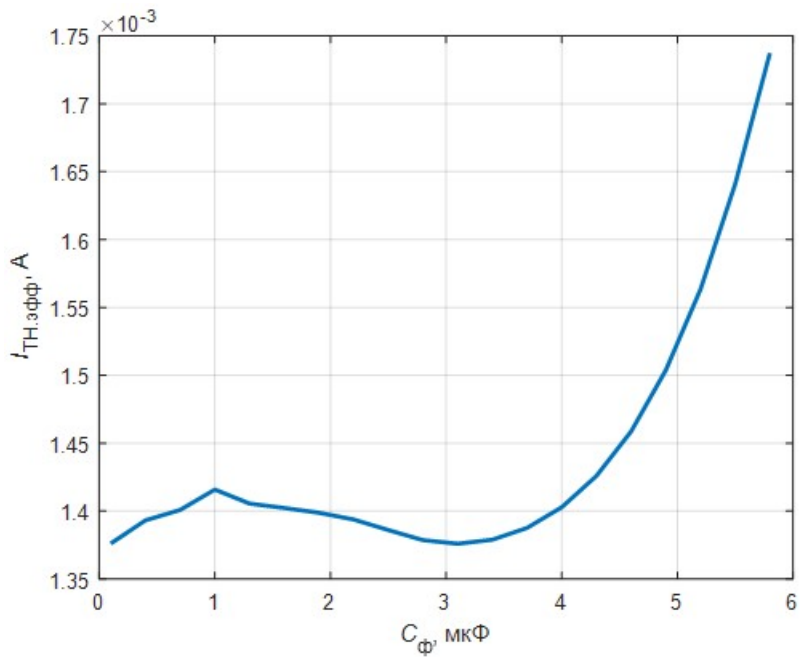


Рис.3.12. Зависимость действующего значения тока в установившемся после отключения ОЗЗ режиме от ёмкости сети (восемь ТН типа НАЛИ-НТЗ-10).

### 3.3. Исследование феррорезонансных процессов при дуговых замыканиях и при и при горении перемежающейся дуги

С т.з. возникновения устойчивого феррорезонанса однофазные дуговые замыкания являются воздействием, идентичным отключению металлических однофазных замыканий на землю. В обоих случаях после этих возмущений на ёмкости нулевой последовательности возникает напряжение, далее эта ёмкость разряжается через ТН. Процесс разряда, как правило, колебательный, причём в определённых случаях эти колебания становятся незатухающими.

На рис.3.16 приведены компьютерные осциллограммы феррорезонансного процесса в ТН типа НТМИ-10 при возникновении ОДЗ. Моделирование горения дуги осуществляется в соответствии с гипотезой Петерсена. Видно, что даже после однократного зажигания/погасания дуги возникает устойчивый феррорезонансный процесс. Несколько повторных зажигания дуги с «эскалацией» перенапряжений в соответствии с гипотезой Петерсена только увеличивают вероятность возникновения устойчивого феррорезонанса за счёт увеличения напряжения на нейтрали при повторных зажиганиях.

Поведение ТН типа НАЛИ-НТЗ-10 при горении перемежающейся дуги в принципе уже было рассмотрено в разделе 3.1. Можно получить компьютерные осциллограммы подобного процесса для сети с изолированной нейтралью с параметрами из табл. 3.3. Эти осциллограммы приведены на рис.3.17. Горение дуги моделируется в соответствии с гипотезой Петерсена. В отличие от испытательной схемы, для обычной сети с изолированной нейтралью частоту собственных колебаний при замыкании одной из фаз на землю можно получить из простого

выражения:  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{3C_\phi L_s}}$ .

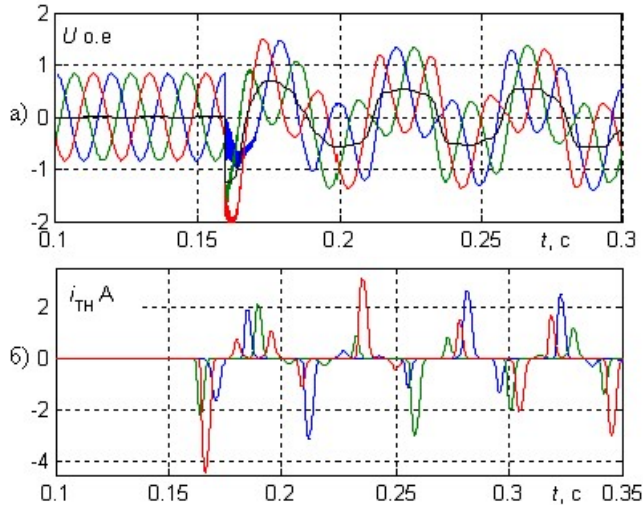


Рис.3.16. Компьютерные осциллограммы напряжений (а) на фазах сети и тока (б) в фазах ТН НТМИ-6 при ОДЗ

Для параметров расчётной схемы, приведенных в табл. 3.3 частота собственных колебаний составляет 1,68 кГц. В соответствии с гипотезой Петерсена гашение дуги моделируется через полпериода этой частоты, т.е. через 0,3мс.

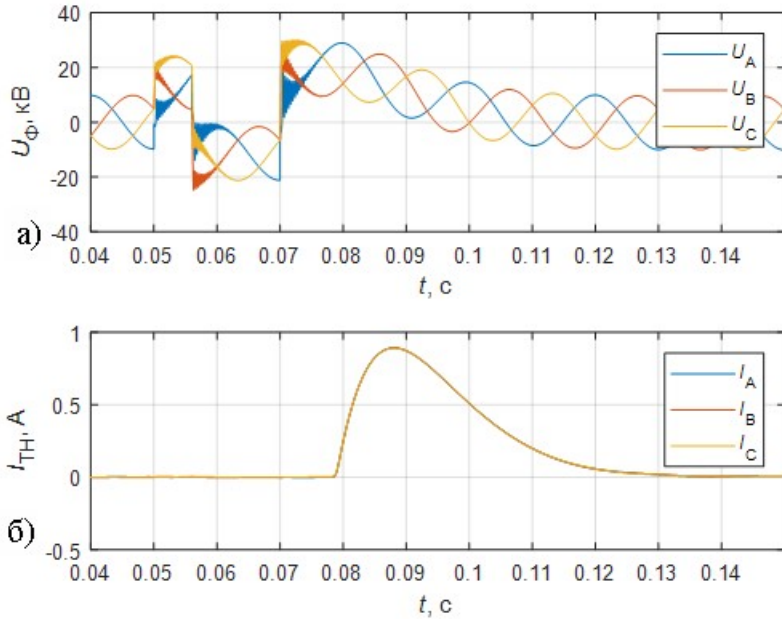


Рис.3.17. Компьютерные осциллограммы напряжений (а) на фазах сети и тока (б) в фазах ТН типа НАЛИ-НТЗ-10 при ОДЗ

Процессы при ОДЗ в модели сети с изолированной нейтралью в целом идентичны тем, которые были получены для испытательной установки в разделе 3.1. Здесь также, пока происходят дуговые замыкания (быстро изменяется напряжение на нейтрали), существенного увеличения тока в обмотке ТНП не происходит. После погасания последней дуги через некоторое время (чуть менее 10мс) происходит насыщение ТНП и бросок тока в его обмотке (или несколько затухающих бросков, см. рис. 3.10). Интересно смоделировать ситуацию, когда повторное зажигание дуги возникает в тот момент, когда ток в обмотке ТНП уже существенно увеличился. Компьютерные осциллограммы этого процесса приведены на рис.3.18.

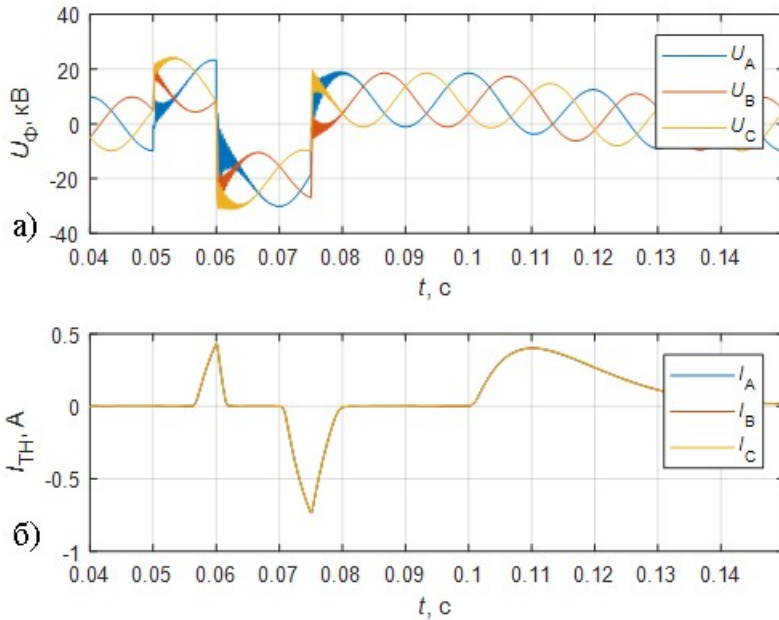


Рис.3.18. Компьютерные осциллограммы напряжений (а) на фазах сети и тока (б) в фазах ТН группы НАЛИ-НТЗ-10 при ОДЗ в сети 10 кВ

Из рис.3.18 видно, что для моделирования зажигания дуги в момент большого тока в обмотке ТНП приходится отступить от гипотезы Петерсена (повторные зажигания дуги происходят не на максимуме напряжения на повреждённой фазе). В этом режиме в обмотке ТНП (и, соответственно, ТПП) может возникнуть значительный действующий ток.

На рис.3.19 приведен пример процесса при чередовании дуговых замыканий через 30мс. За время 30мс ТНП успевает насытиться и ток в его обмотке – существенно увеличиться. В результате возникает последовательность бросков токов намагничивания со значительной амплитудой. Действующее значение тока в обмотке ТНП в процессе на рис.3.19 достигает 1,3А, что, несомненно, опасно для ТН. Разумеется, существование в реальной сети подобного режима практически невозможно. Моделирование горения дуги по гипотезе Петерсена используется для воспроизведения теоретически наиболее жёсткого режима ОДЗ, который только возможен в сети с изолированной нейтралью. В реальности дуга практически никогда не гаснет при первом переходе через 0 тока высокой частоты. За это время напряжение на нейтрали сети успевает несколько уменьшиться. Это подтверждается также результатами экспериментов, приведенных в разделе 3.1 НИР, где «короткозамыкатель» в испытательной установке достаточно хорошо воспроизводит реальные условия горения дуги. Маловероятно и то, что зажигания/погасания дуги будут происходить строго через равные интервалы времени по 30 мс. Но, очевидно, что целесообразно провести испытания ТН на стойкость к горению перемежающейся дуги в испытательной установке **при меньшей интенсивности** срабатывания «короткозамыкателя» (меньшей частоте вращения вентилятора, нагнетающего воздух на подвижный контакт), либо изменить конструкцию «короткозамыкателя» для воспроизведения режима,

аналогичного приведенному на рис.3.19 (например, подвижный контакт вращается с определённой частотой, и через равные промежутки времени приближается к неподвижному, с дальнейшим пробоем межконтактного промежутка и зажиганием дуги).

Одним из возможных решений данной проблемы может быть **увеличение активного сопротивления** обмотки ВН ТНП. К сожалению, для эффективного ограничения тока требуется весьма значительное увеличение сопротивления. На рис.3.20 приведены осциллограммы процесса при чередовании дуговых замыканий через 30мс и активном сопротивлении первичной обмотки ТНП – 50 кОм.

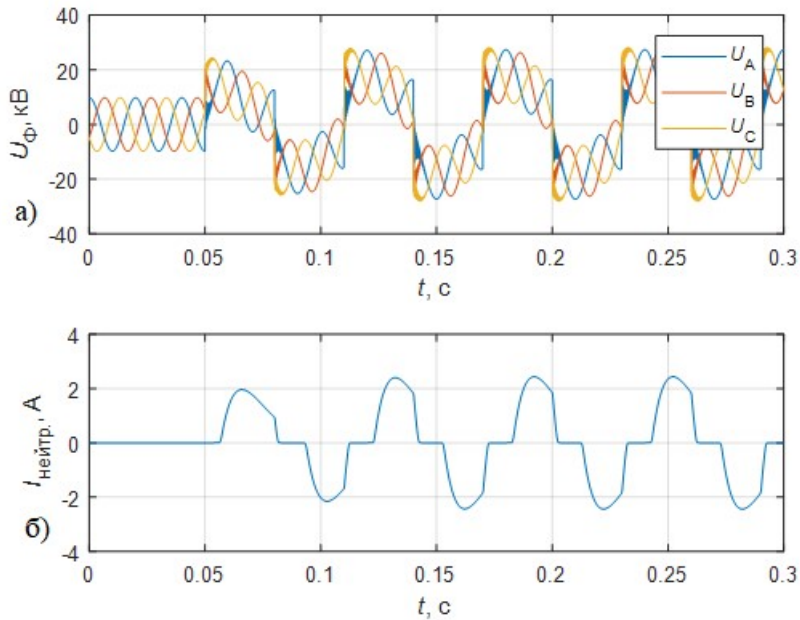


Рис.3.19. Компьютерные осциллограммы напряжений (а) на фазах сети и тока (б) в нейтрали ТН типа НАЛИ-НТЗ-10 при ОДЗ с частотой зажигания/погасания дуги – через каждые 30мс.

При сопротивлении обмотки ВН ТНП 50 кОм действующее значение тока в нейтрали при зажигании/погасании дуги каждые 30мс существенно уменьшается, до 0,3А. Увеличив активное сопротивление обмотки ВН ТНП до 100 кОм можно добиться уменьшения действующего тока в обмотке ВН ТНП до 0,1А. Однако такие величины сопротивлений обмотки негативно скажутся на метрологических характеристиках ТН, возможность их применения требует дополнительного обоснования.

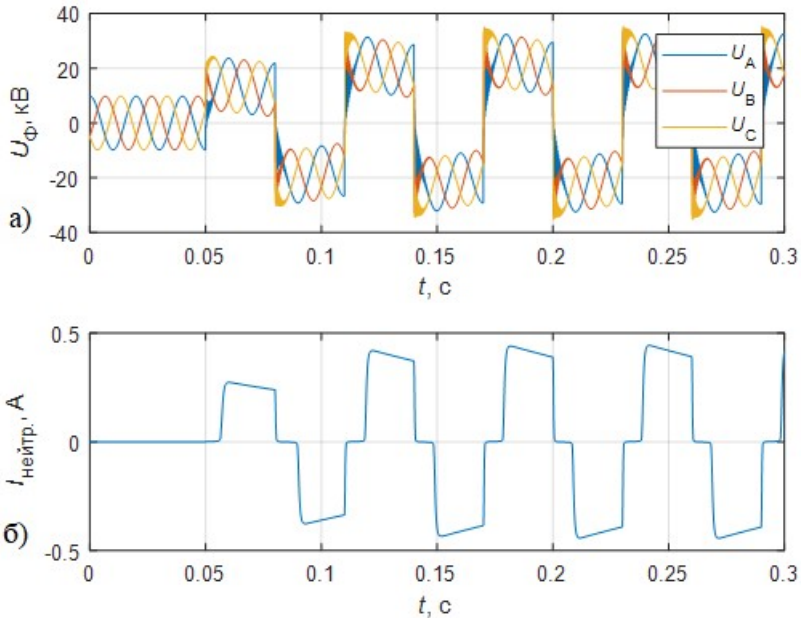


Рис.3.20. Компьютерные осциллограммы напряжений (а) на фазах сети и тока (б) в нейтрали ТН типа НАЛИ-НТЗ-10 при ОДЗ с частотой зажигания/погасания дуги – через каждые 30мс и с активным сопротивлением обмотки ВН ТНП 50 кОм.

Из рис.3.20 также видно, как изменится характер процесса при увеличении активного сопротивления обмотки ВН ТНП. Напряжение в контуре нулевой последовательности (на нейтрали) будет уменьшаться (разряжаться) значительно медленнее, поскольку в рассматриваемой модели сети другого пути разряда ёмкости нулевой последовательности, кроме как через ТН, нет.

Процессы при ОДЗ, когда дуга горит не по гипотезе Петерсена, в целом были уже рассмотрены в разделе 3.1 НИР (для испытательной установке). В отличие от процессов на рис.3.17-3.19 они характеризуются меньшими перенапряжениями и повышением напряжения на нейтрали. Компьютерная осциллограмма процесса при ОДЗ в сети с ТН типа НАЛИ-НТЗ-10 при гашении дуги через 2мс приведена на рис.3.21.

Из рис.3.21 видно, что в этом режиме также, пока горит перемежающаяся дуга (каждые 10мс), не происходит насыщения ТНП и заметного увеличения тока в его первичной обмотке. Бросок тока намагничивания происходит спустя некоторое время после погасания последней дуги.

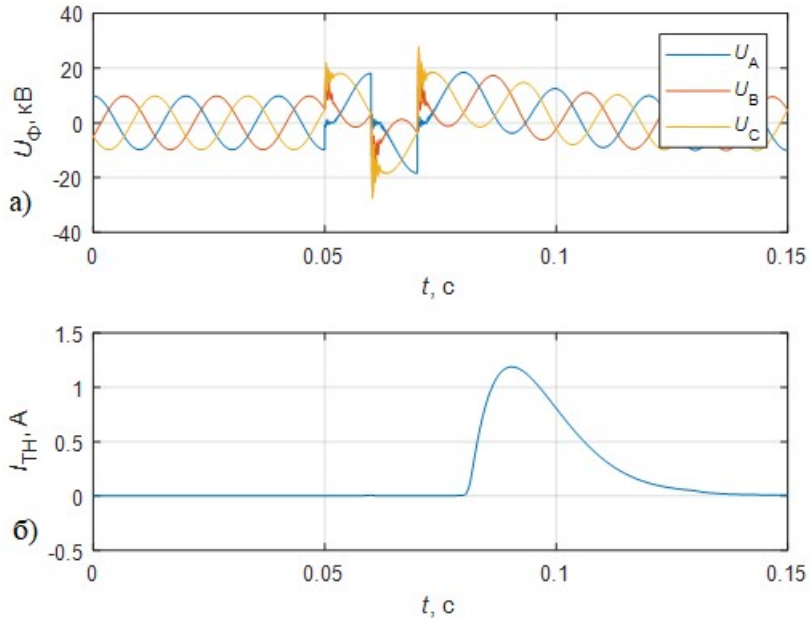


Рис.3.21. Компьютерные осциллограммы напряжений (а) на фазах сети и тока (б) в нейтрали ТН типа НАЛИ-НТЗ-10 при ОДЗ с частотой зажигания дуги – через каждые 10мс и погасании дуги через 2мс после зажигания.

### 3.4. Стойкость ТН к явлению «ложной земли»

При определённой ёмкости сети в ТН для контроля изоляции может возникнуть явление «ложной земли» [15,21]. Это явление резонансного характера, когда ток намагничивания ТН начинает компенсироваться ёмкостным током фазы сети. Поскольку ток намагничивания ТН в нормальном режиме работы очень мал (единицы миллиампер), то явление «ложной земли» возможно только в сетях с малой ёмкостью фазы на землю. При возникновении этого режима на одной фазе напряжение понижается, а на двух других – повышается. В результате создаётся ложное впечатление о существовании замыкания на землю. Обычно в таком режиме ТН не повреждается.

Явление «ложной земли» как уже было сказано выше, возникает только в сетях с очень маленькой ёмкостью фазы на землю. На практике – это обычно сети генераторного напряжения электрических станций. Суммарная ёмкость на землю экранированного токопровода и установленного оборудования при отключенном генераторе весьма мала. В [15] рассматривается случай в эксплуатации, когда ложная земля в сети генераторного напряжения не позволяла включить блок 220/15.75 кВ электрической станции. Схема блока приведена на рис.3.22. При включении выключателя 220 кВ при отключённом генераторном выключателе, срабатывало реле земляной защиты, включённое в рассечку обмотки ТН типа ЗНОЛ-15, соединённой в открытый треугольник. Феррорезонанс в ТН приводил к появлению на дополнительной обмотке напряжения нулевой последовательности, во много раз превышающего уставку 15 В реле земляной защиты.

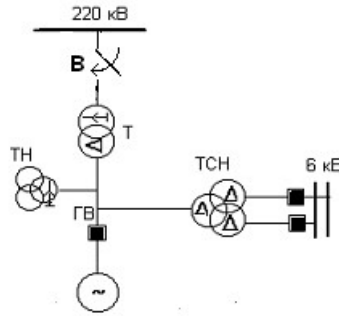


Рис.3.22. Схема блока электрической станции, в котором было зафиксировано явление «ложной земли»

Помимо малой ёмкости фазы на землю, для возникновения явления «ложной земли» необходимо ещё одно обязательное условие – несимметрия. В идеально симметричной схеме даже при полной компенсации тока намагничивания ТН ёмкостным током фазы не произойдёт искажения напряжений. Несимметрией может быть, например, некоторое отличие величин ёмкостей фаз на землю, или различие кривых намагничивания магнитопроводов разных фаз ТН. Пример приведен на рис.3.23. Для расчёта была взята индуктивность холостого хода ТН, равная  $10^4$  Гн.

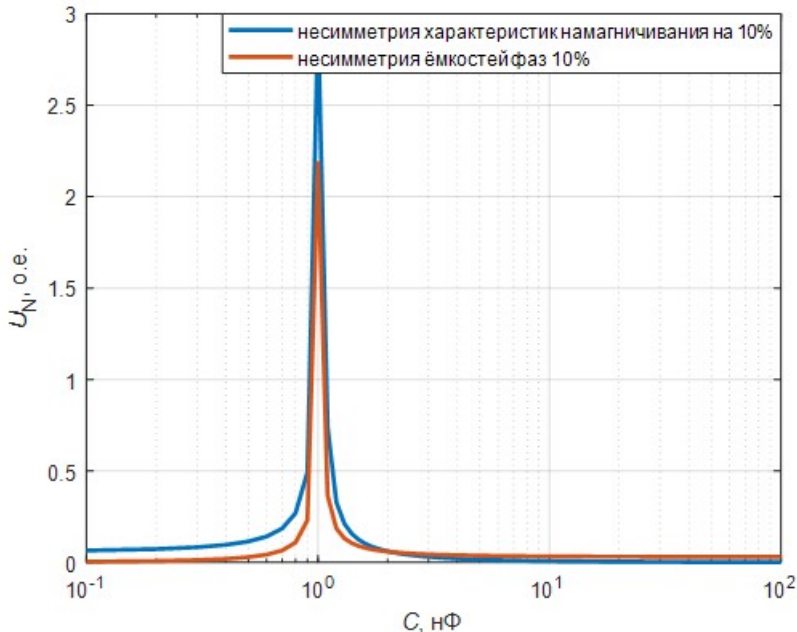


Рис.3.23. Зависимость напряжения на нейтрали от ёмкости фазы на землю при различных видах несимметрии.

В обоих случаях несимметрии, приведенных на рис.3.23 область резонанса очень узкая и находится в районе 1нФ. В реальной сети выполнение подобных условий весьма маловероятно. Значительно больший интерес представляет



«ложная земля», обусловленная несимметрией токов утечки через изоляцию фаз. Схема модели сети с изолированной нейтралью для расчёта этого явления приведена на рис.3.24.

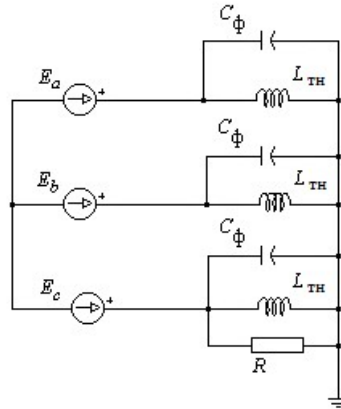


Рис.3.24. Схема для расчёта напряжения на нейтрали при несимметрии токов утечки через изоляцию фаз.

Определить напряжение на нейтрали схемы на рис.3.23 можно из выражений (3.2):

$$\begin{aligned}
 Z_1 &= \frac{j\omega L_{ТН}}{1 - \omega^2 L_{ТН} C_\phi}, \\
 Z_2 &= \frac{Z_1 R}{Z_1 + R}, \\
 U_N &= \left| \frac{-3Z_1}{2 \cdot (2Z_2 + Z_1)} + \frac{1}{2} \right|.
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

В схеме на рис.3.24 и в уравнениях (3.2):  $C_\phi$  - ёмкость фазы сети на землю;  $L_{ТН}$  - индуктивность холостого хода ТН;  $R$  - активное сопротивление, моделирующее утечку через изоляцию одной из фаз;  $Z_1$  - эквивалентное сопротивление фаз без утечки;  $Z_2$  - эквивалентное сопротивление фазы с утечкой через изоляцию;  $\omega$  - угловая частота приложенного напряжения.

Определить индуктивность холостого хода исследуемого ТН типа НАЛИ-НТЗ-10 можно из осциллограммы тока в первичной обмотке в зависимости от потокосцепления. Такая осциллограмма приведена на рис.3.25.

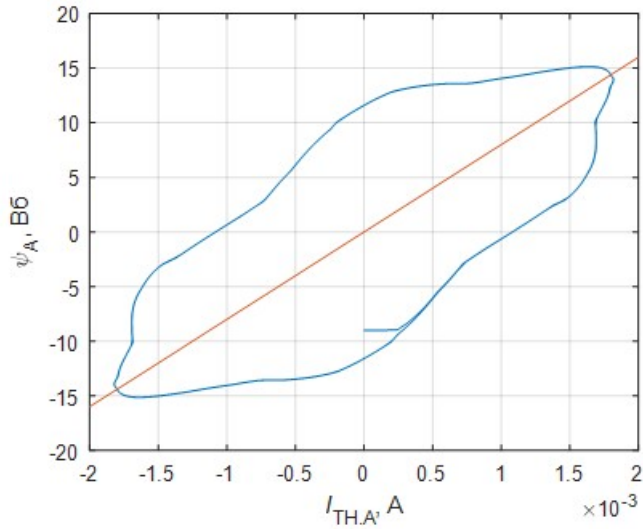


Рис.3.25. Зависимость тока в обмотке одной из фаз ТПП от потокосцепления.

Зависимость на рис.3.25 имеет вид петли гистерезиса, поскольку в модели ТН учитываются активные потери в магнитопроводе. Индуктивность холостого хода можно определить из наклона средней линии петли гистерезиса (также приведена на рис.3.25). В данном случае индуктивность холостого хода ТПП-10 равна 8 кГн.

Из выражений (3.2) видно, что при постоянной индуктивности холостого хода ТН напряжение на нейтрали зависит от двух параметров – ёмкости фазы сети на землю и активного сопротивления, моделирующего утечку в одной из фаз. Целесообразно рассчитать эту зависимость для следующих диапазонов значений:  $C_\phi = 0,1 \dots 100 \text{ нФ}$ ,  $R = 1 \dots 1000 \text{ МОм}$ . Результат расчёта приведен на рис.3.26.

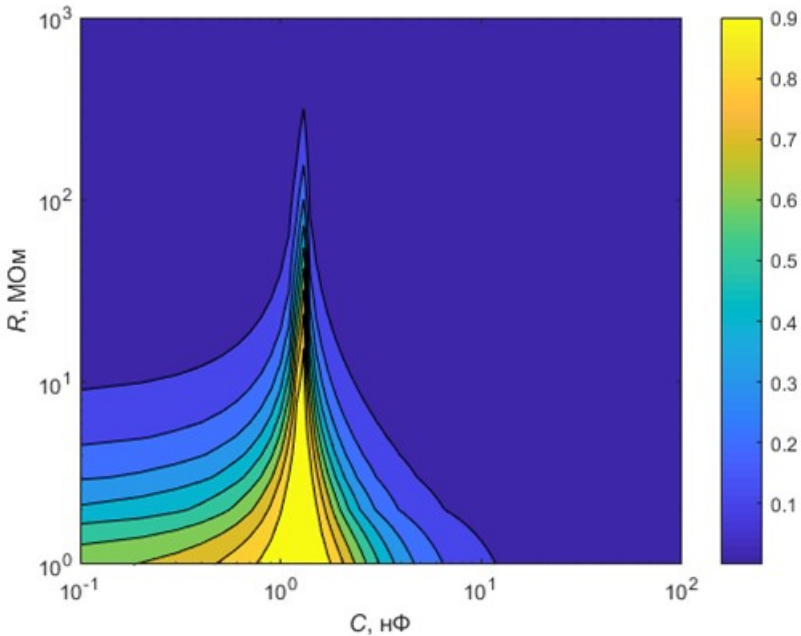


Рис.3.26. Зависимость напряжения на нейтрали от ёмкости фазы сети на землю и от сопротивления утечки в одной из фаз.

Из рис.3.26 видно, что область существования «ложной земли» при данном виде несимметрии существенно больше, и при сопротивлении утечки менее 10МОм достигает диапазона 0,1...5нФ. При больших сопротивлениях возможно возникновение «ложной земли» в узком диапазоне около 1,3 нФ, но зато там «ложная земля» возможна при сопротивлениях утечки до 100МОм.

Моделирование процесса «ложной земли» в ТН типа НАЛИ-НТЗ-10 выполняется для параметров расчётной схемы, приведенных в табл.3.3, за исключением ёмкости фазы сети на землю, которая принимается равной 1,3 нФ. В одну из фаз включается сопротивление утечки, равное 5МОм.

Компьютерная осциллограмма процесса приведена на рис.3.27. Из рис.3.27 видно, что происходит искажение симметрии фазных напряжений, при этом на дополнительной обмотке ТНП появляется значительное напряжение (действующее значение – 25В). Напряжение превышает уставку защиты от замыканий на землю (15В), соответственно такой режим будет воспринят релейной защитой как замыкание (которого на самом деле нет).

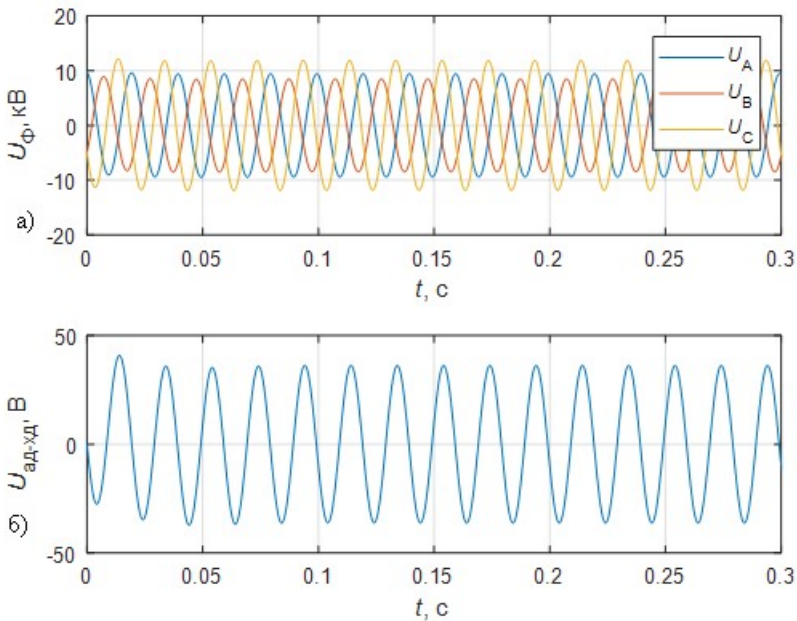


Рис.3.27. Компьютерные осциллограммы напряжений на фазах сети (а) и напряжения на дополнительной обмотке ТН типа НАЛИ-НТЗ-10 (б) при возникновении явления «ложной земли» (ёмкость фазы 1,3нФ, сопротивление утечки 5МОм)

При меньшем сопротивлении утечки возникает ещё более сильное искажение фазных напряжений. Пример процесса при сопротивлении утечки 1МОм приведен на рис.3.28. Из рис.3.28 видно, что напряжение на вторичной обмотке ТНП в данном случае превышает по амплитуде 120В (действующее значение – более 85В).

На рис.3.29 приводится зависимость напряжения на вторичной обмотке ТНП от ёмкости фазы сети и от сопротивления утечки в изоляции одной из фаз на полной модели сети с ТН типа НАЛИ-НТЗ. В целом область существования ложной земли существенно отличается от расчётов, приведенных на рис.3.25 для упрощённой схемы. Это можно объяснить нелинейностью характеристики намагничивания ТН а также – активными потерями в магнитопроводе ТН (в каждой из фаз есть активная составляющая тока, сопоставимая во величине с током утечки). Но в целом закономерность сохраняется: явление «ложной земли» возникает при ёмкостях порядка единиц нФ и при сопротивлении утечки в одной фазе 1-10МОм. При этом на рис.3.29 также наблюдается резонансная частота (0,06нФ).

Стандартное решение проблемы ложной земли – включение дополнительного сопротивления во вторичную обмотку ТН, соединённую в разомкнутый треугольник. Это увеличивает активную составляющую тока в фазах ТН и снижает несимметрию, вызванную компенсацией реактивной составляющей тока (тока намагничивания) ёмкостным током фаз. В случае с ТН типа НАЛИ-НТЗ-10 дополнительное сопротивление (нагрузку) можно включить во вторичную обмотку ТНП.

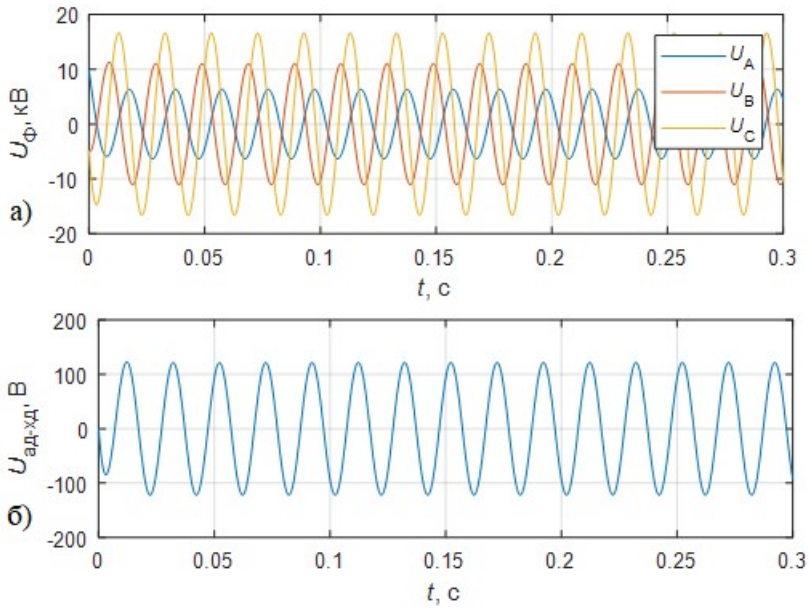


Рис.3.28. Компьютерные осциллограммы напряжений на фазах сети (а) и напряжения на дополнительной обмотке ТН типа НАЛИ-НТЗ-10 (б) при возникновении явления «ложной земли» (ёмкость фазы  $1,3нФ$ , сопротивление утечки  $1МОм$ )

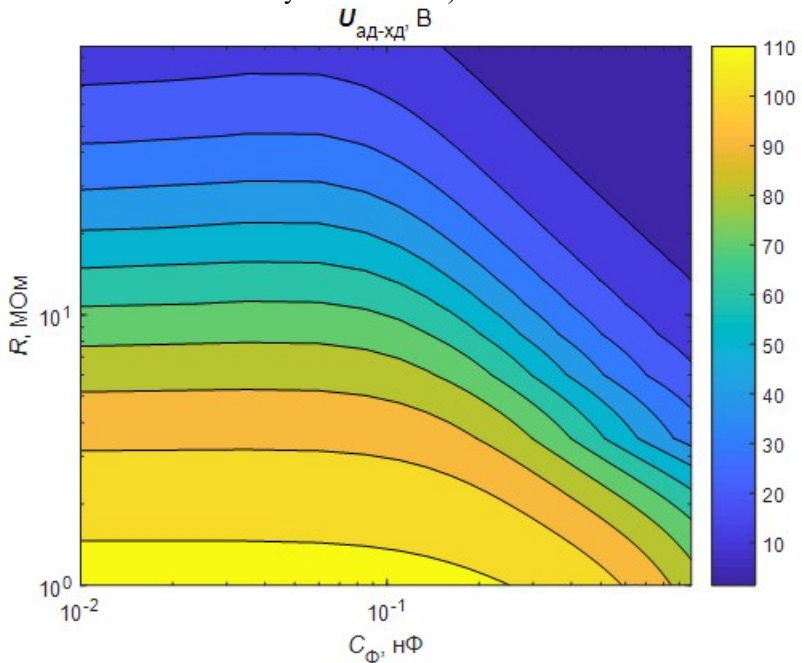


Рис.3.29. Зависимость напряжения на вторичной обмотке ТНП от ёмкости фазы сети и сопротивления утечки в одной из фаз.

На рис.3.30 приведены компьютерные осциллограммы явления «ложной земли» при включении во вторичную обмотку ТНП сопротивления величиной 250 Ом.

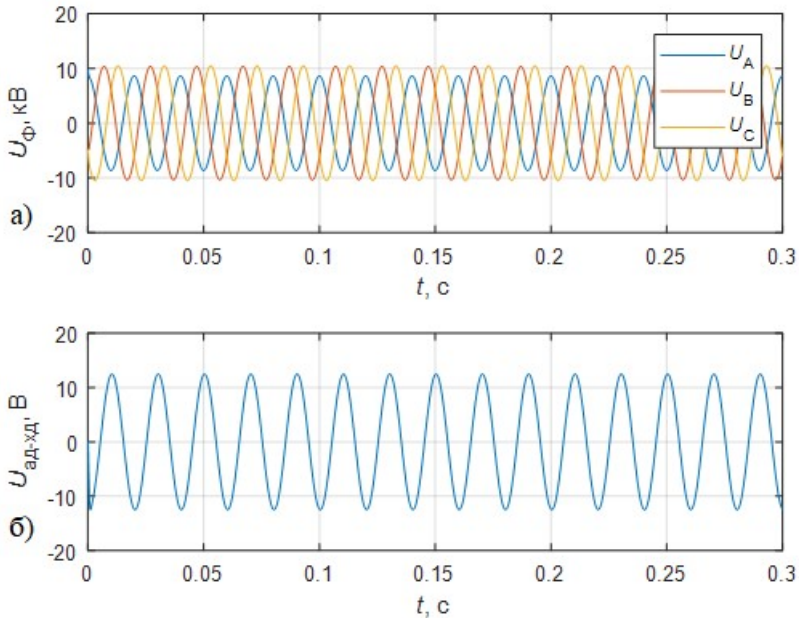


Рис.3.30. Компьютерные осциллограммы напряжений на фазах сети (а) и напряжения на дополнительной обмотке ТН типа НАЛИ-НТЗ-10 (б) при возникновении явления «ложной земли» (ёмкость фазы 1,3нФ, сопротивление утечки 1МОм), и включении сопротивления 250 Ом во вторичную обмотку ТНП

### 3.5 Неполнофазный режим работы силового трансформатора

В сетях 110 кВ с глухозаземлённой нейтралью достаточно распространены случаи повреждения ТН, связанные с возникновением неполнофазного режима работы силового трансформатора с изолированной нейтралью [22]. К возникновению неполнофазного режима могут приводить отказы в срабатывании полюсов выключателей, либо обрывы шлейфов на опорах ВЛ.

В сетях с изолированной нейтралью 6-35 кВ также возможно существование такого режима. О повреждениях трансформаторов в таких режимах говорится в [3,22]. При этом в сетях с изолированной нейтралью вероятность повреждения ТН из-за феррорезонанса силового трансформатора существенно выше.

К возникновению неполнофазных режимов работы силового трансформатора в этих сетях могут приводить помимо отказов выключателей также однополюсные срабатывания силовых предохранителей и обрыв одной из фаз с замыканием на землю со стороны источника. Схема подобного режима приведена на рис.3.31.

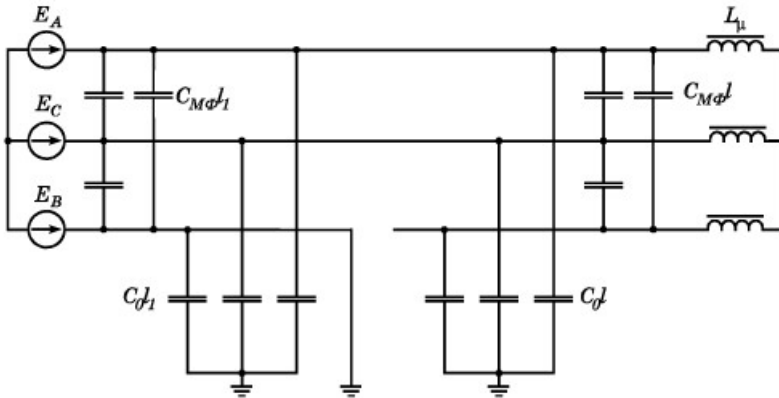


Рис.3.31. Схема феррорезонанса при обрыве и замыкании одной из фаз со стороны источника.

В [3] отмечается, что в резонанс с ёмкостью сети могут входить силовые трансформаторы 6-35 кВ мощностью 630-1000 кВА. При этом на повреждённой фазе могут возникать перенапряжения до  $3.8 U_{\phi, \max}$ . Длительное существование подобного режима представляет опасность для ТН на повреждённой фазе. Силовой трансформатор, как правило, в таком режиме не повреждается.

На рис.3.32 приведен результат расчёта процесса при обрыве фазы в схеме на рис.2.22. Силовой трансформатор – ТМ-1000/10, трансформатор напряжения – НТМИ-10. Длина оборванного участка ВЛ 10 кВ – 5 км.

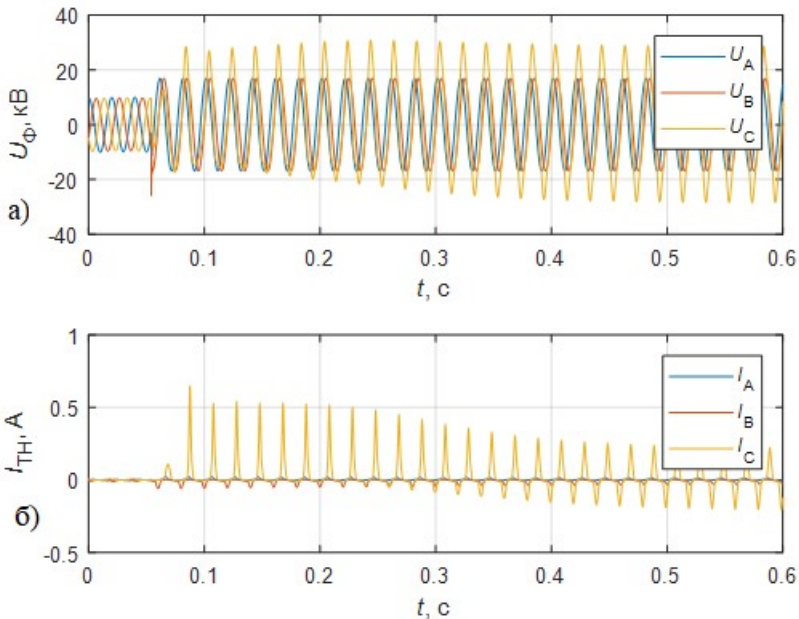


Рис.3.32. Компьютерные осциллограммы напряжений на фазах (а) и токов в обмотках ВН (б) ТН типа НТМИ-10 при феррорезонансном процессе, обусловленном неполнофазным режимом работы силового трансформатора.

Из рис.3.32 видно, что феррорезонансный процесс в силовом трансформаторе приводит к возникновению перенапряжений на повреждённой фазе, кратностью до  $2.9 U_{\phi, \max}$ . При этом в обмотке ВН ТН на повреждённой фазе протекает ток, действующее значение которого достигает 200мА. Этот ток может представлять опасность для ТН.

На рис.3.33 приведен аналогичный расчёт при установке в сети ТН типа НАЛИ-НТЗ-10.

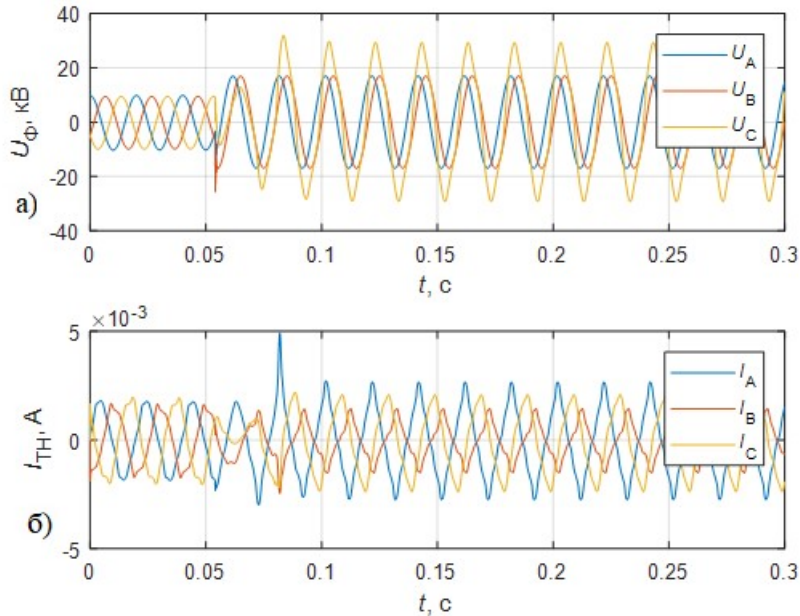


Рис.3.33. Компьютерные осциллограммы напряжений на фазах (а) и токов в обмотках ВН (б) ТН типа НАЛИ-НТЗ-10 при феррорезонансном процессе, обусловленном неполнофазным режимом работы силового трансформатора

Из рис. 3.33 видно, что в рассмотренном режиме существенных токи в обмотках ВН ТПП-10 увеличиваются незначительно. Это можно объяснить тем, что значительная часть падения напряжения, приложенная к ТН на повреждённой фазе приходится на ТНП, обладающий пониженной индукцией и большим реактивным сопротивлением. Компьютерная осциллограмма напряжения на вторичной обмотке ТНП и тока в его обмотке ВН приведена на рис.3.34.

Из рис.3.34 видно, что напряжение на вторичной обмотке ТНП в этом режиме превышает 300В (более 200В действующее значение). Ток в обмотке ВН ТНП также не превышает 2мА по амплитуде. Стойкость ТН к данному режиму подтверждается не только приведенными выше расчётами, но и результатами эксперимента, приведенными в [23].

Испытательная схема для проверки устойчивости трансформатора в режиме «опрокидывания фазы» приведена на рис.3.35.



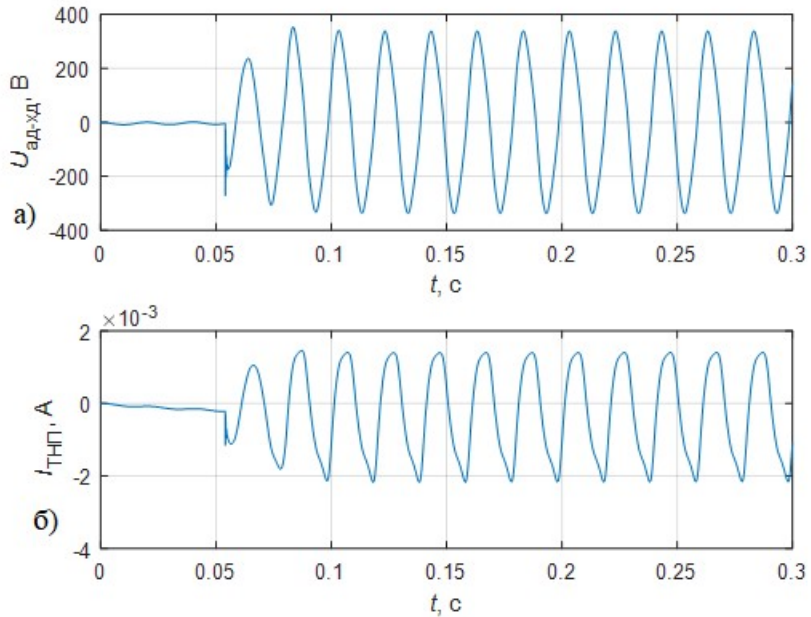


Рис.3.34. Компьютерная осциллограмма напряжения на вторичной обмотке ТНП-10 (а) и тока в его обмотке ВН (б) при феррорезонансе, обусловленном неполнофазным режимом работы силового трансформатора.

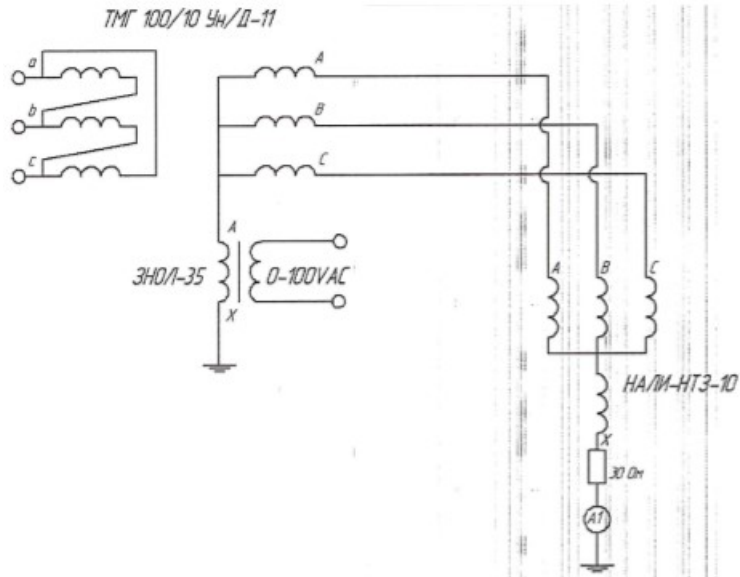


Рис.3.35. Испытательная схема проверки трансформатора на стойкость к режиму «опрокидывания фазы».

В нейтраль источника напряжения (повышающего трансформатора) включается дополнительный трансформатор. Путём регулировки напряжения на трансформаторе в нейтрали, общие напряжения на фазах установки доводятся до

такого уровня, чтобы на вторичной обмотке испытуемого трансформатора установилось напряжение 300В.

Опытные осциллограммы процесса в испытательной схеме на рис.3.35 приведены на 3.36 и 3.37.

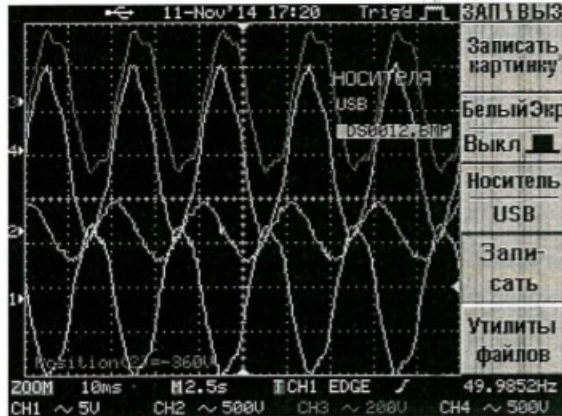


Рис.3.36. Опытная осциллограмма процесса в ТН типа НАЛИ-НТЗ-10 в режиме «опрокинутой фазы» (1 – напряжение на вторичной обмотке ТНП; 2 – ток в обмотке ВН ТНП; 3 – напряжение на выводе *a* вторичной обмотки ТН; 4 – напряжение на выводе *b* вторичной обмотки ТН)

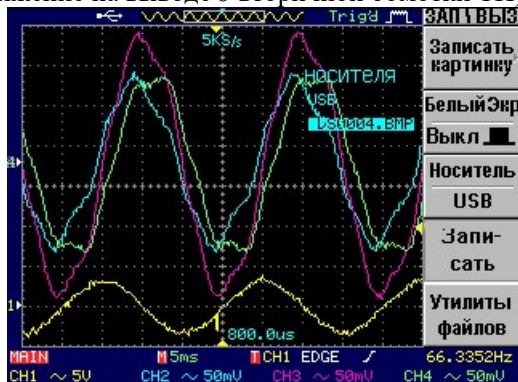


Рис.3.37. Опытная осциллограмма процесса в ТН типа НАЛИ-НТЗ-10 в режиме «опрокинутой фазы» (1 – ток в обмотке ВН ТНП; 2,3,4 – напряжения на выводах основной вторичной обмотки ТН)

Компьютерные осциллограммы, воспроизводящие режим в схеме на рис.3.35 приведены на рис.3.38. Расчёты также подтверждают отсутствие существенного увеличения тока в обмотке ВН ТНП.

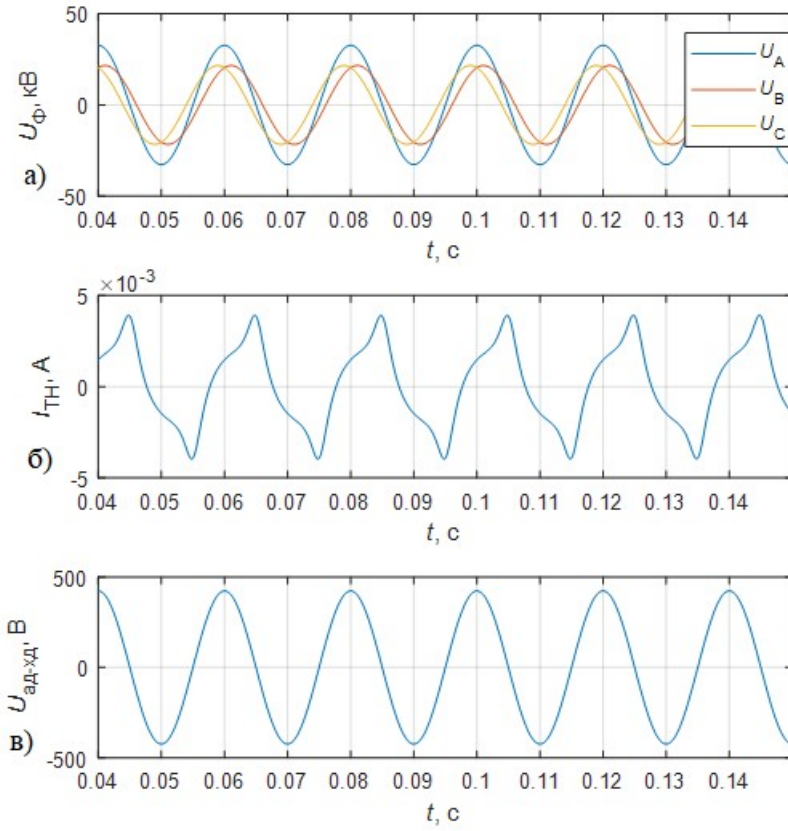


Рис.3.38. Компьютерные осциллограммы напряжений на фазах (а), тока в первичной обмотке ТНП (б) и напряжения на вторичной обмотке ТНП (в) в режиме «опрокидывания фазы»

## 4. ИССЛЕДОВАНИЕ СТОЙКОСТИ ТН НАЛИ-НТЗ-35 К ФЕРРОРЕЗОНАНСУ

### 4.1 Исследование феррорезонансных процессов при отключении ОЗЗ

В этом разделе НИР исследуются процессы в сети с ТН типа НАЛИ-НТЗ-35 при аналогичных воздействиях (ОДЗ, отключения ОЗЗ и т.д.), для которых исследовались процессы в сети с ТН типа НАЛИ-НТЗ-10.

Параметры математической модели сети 35 кВ приведены в табл. 4.1. В качестве источника ЭДС был взят силовой трансформатор ТДТН-16000/110/35. Параметры модели трансформатора напряжения были взяты из раздела 2.1 НИР.

Таблица 4.1

Параметры математической модели сети с изолированной нейтралью

$R_s$ , Ом	$L_s$ , Гн	$R_{s0}$ , кОм	$E$ , кВ	$C_{\phi\phi}$ , мкФ	$C_\phi$ , мкФ	$R_d$ , Ом
1,73	0,034	104	33,1	0	0,2*	10

\* - для некоторых компьютерных осциллограмм и при расчёте областей существования феррорезонанса этот параметр варьируется.

В таблице 4.1:  $R_s, L_s, R_{s0}$  - параметры источника;  $C_\phi$  - ёмкость фазы сети на землю;  $C_{\phi\phi}$  - междуфазная ёмкость сети (принимается равной 0);  $R_d$  - сопротивление дуги;  $E$  - ЭДС источника ( $40,5 \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$  кВ).

Целесообразно выполнить моделирование работы ТН при симметричном режиме работы сети и при однофазном замыкании на землю (как это было сделано для ТН типа НАЛИ-НТЗ-10 в разделе 2 НИР), чтобы удостовериться в правильной работе математических моделей.

На рис.4.1 приведены расчётные осциллограммы токов в фазах обмотки ВН и потокосцеплений в кольцах магнитопровода (нумерация потокосцеплений в соответствии с рис.2.8). Компьютерная осциллограмма процесса при однофазном замыкании на землю приведена на рис.4.2.

Из осциллограмм на рис.4.1-4.2 видно, что ТН типа НАЛИ-НТЗ-35 ведёт себя аналогично НАЛИ-НТЗ-10. Амплитуды токов намагничивания ТПП и ТНП несколько меньше, чем у ТН 10 кВ, что объясняется большим номинальным напряжением при незначительном увеличении габаритов магнитных систем.

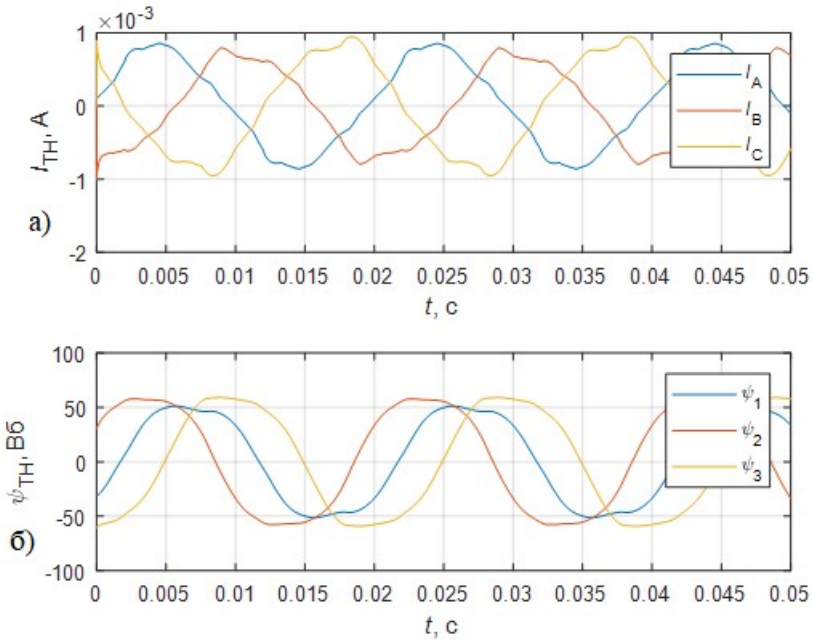


Рис.4.1. Компьютерные осциллограммы токов в фазах (а) и потокосцеплений в кольцах магнитопровода (б) ТН типа НАЛИ-НТЗ-35 в симметричном режиме сети.

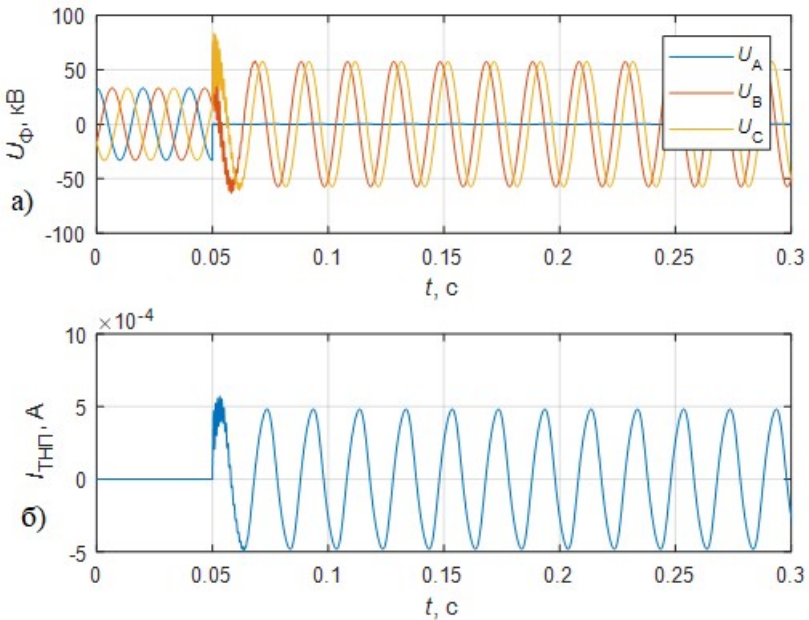


Рис.4.2. Компьютерные осциллограммы напряжений на фазах сети (а) и тока в обмотке ТНП (б) ТН типа НАЛИ-НТЗ-35 при однофазном замыкании на землю.

Компьютерные осциллограммы процесса при отключении ОЗЗ в сети 35 кВ с ТН типа НАЛИ-НТЗ-35 приведены на рис.4.3. Из рис.4.3 видно, что устойчивого феррорезонансного процесса, как и в случае с использованием ТН типа НАЛИ-НТЗ-10, не возникает. Как и в случае с ТН 10 кВ, процесс разряда напряжения нулевой последовательности через ТНП носит колебательный характер.

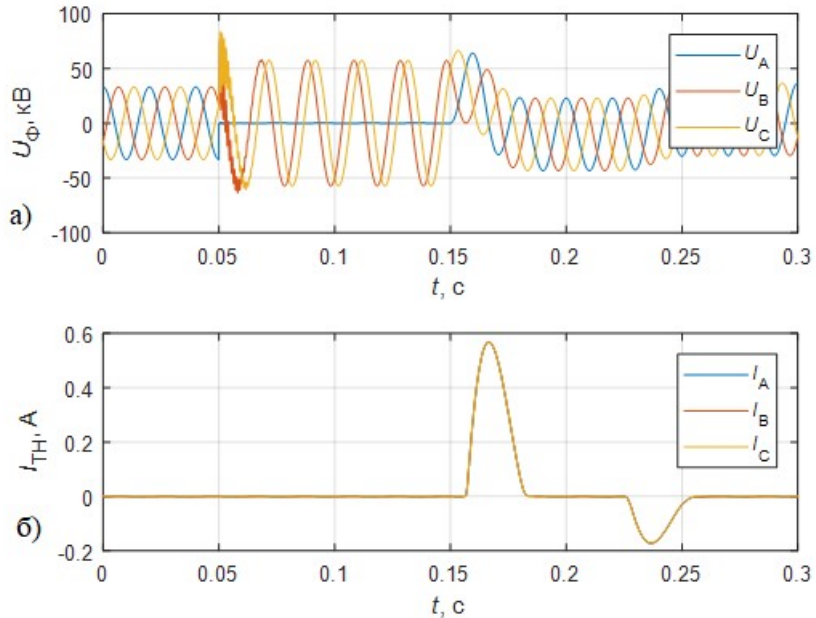


Рис.4.3. Компьютерные осциллограммы напряжений на фазах сети (а) и тока в обмотке ВН (б) ТН НАЛИ-НТЗ-35 при отключении ОЗЗ

На рис.4.4. приведена зависимость действующего тока в обмотке ВН (наибольшего из трёх фаз) в установившемся после отключения ОЗЗ режиме от ёмкости сети (в сети восемь параллельно работающих ТН типа НАЛИ-НТЗ-35). Из рис.4.4 видно, что, как и в случае с ТН типа НАЛИ-НТЗ-10, действующий ток не превышает нескольких миллиампер, что говорит о том, что устойчивого феррорезонанса не возникает.

Конструкция ТН типа НАЛИ-НТЗ-35 аналогична НАЛИ-НТЗ-10, соответственно причина отсутствия устойчивого феррорезонанса в этом ТН объясняется также: в контуре нулевой последовательности нет источника ЭДС и все процессы в контуре нулевой последовательности после восстановления симметрии сети носят принципиально затухающий характер.

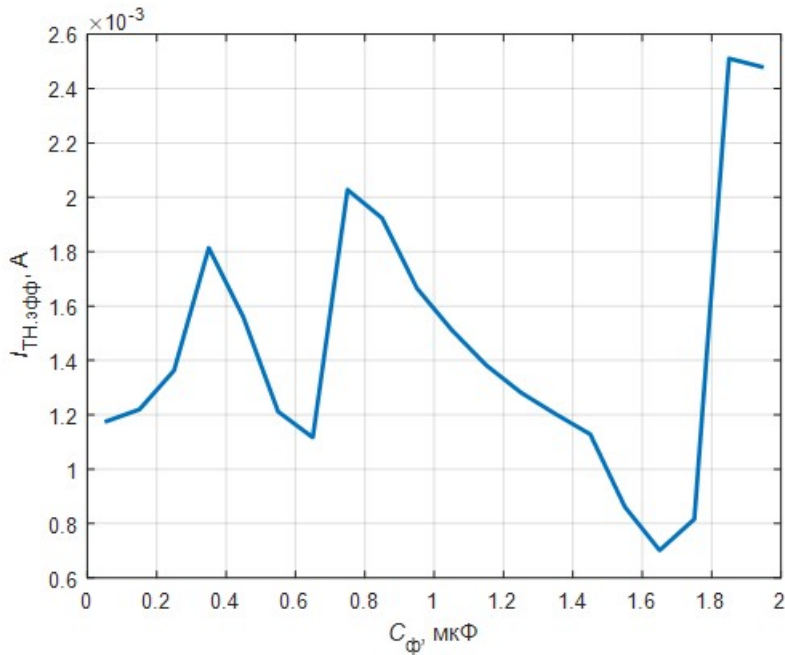


Рис.4.4. Зависимость действующего значения тока в установившемся после отключения ОЗЗ режиме от ёмкости сети (восемь ТН типа НАЛИ-НТЗ-35).

#### 4.2. Исследование феррорезонансных процессов при дуговых замыканиях и при горении перемежающейся дуги

Компьютерные осциллограммы процесса при ОДЗ в сети с ТН типа НАЛИ-НТЗ-35 приведены на рис.4.5. Моделируется три зажигания/погасания дуги в соответствии с гипотезой Петерсена. Из рис.4.5 видно, что процессы в рассматриваемом расчётном случае существенно отличаются от аналогичных процессов в сети 10 кВ с ТН типа НАЛИ-НТЗ-10.

Основная причина этого – более быстрое насыщение магнитопровода ТНП-35, и, соответственно, появление броска тока намагничивания до повторного зажигания дуги (в процессе на рис.4.5 повторные зажигания моделируются с интервалом 10мс). Это можно объяснить несколько большей рабочей индукцией ТНП-35 по сравнению с ТНП-10 (по данным табл.2.1 – 0,8Тл и 0,56Тл у ТНП-35 и ТНП-10 соответственно, а также тем, что при горении дуги по гипотезе Петерсена на нейтрали возникает значительно большее напряжение.

Можно сделать заключение, что горение перемежающейся дуги по гипотезе Петерсена может представлять опасность для ТН типа НАЛИ-НТЗ-35. В разделе 3 НИР уже отмечалось, что в действительности возникновение данного режима в реальной сети маловероятно.

Если смоделировать погасание дуги через 1мс после зажигания, то процесс в сети с ТН типа НАЛИ-НТЗ-35 будет в целом соответствовать процессам в испытательной схеме для НАЛИ-НТЗ-10. Компьютерные осциллограммы этого расчётного случая приведены на рис.4.6.

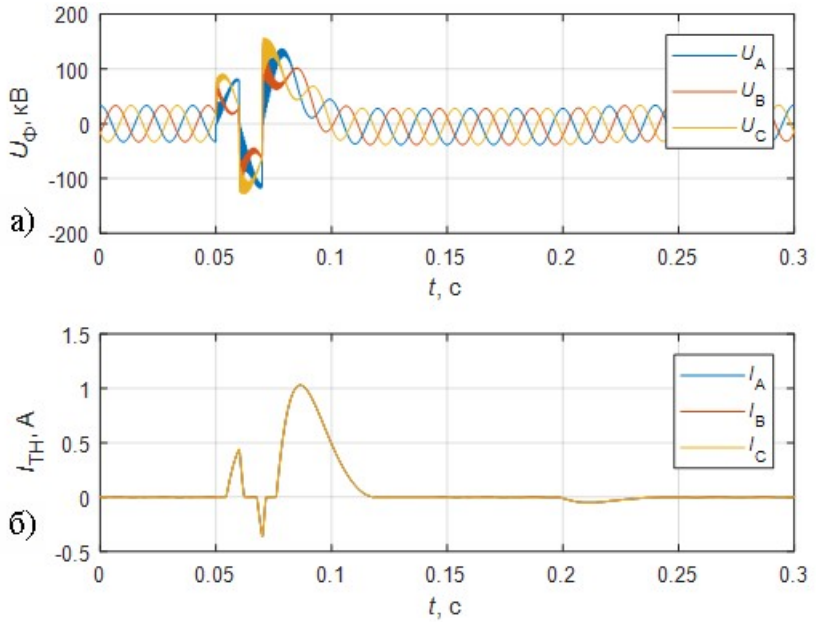


Рис.4.5. Компьютерные осциллограммы напряжений (а) на фазах сети и тока (б) в фазах ТН типа НАЛИ-НТЗ-35 при ОДЗ

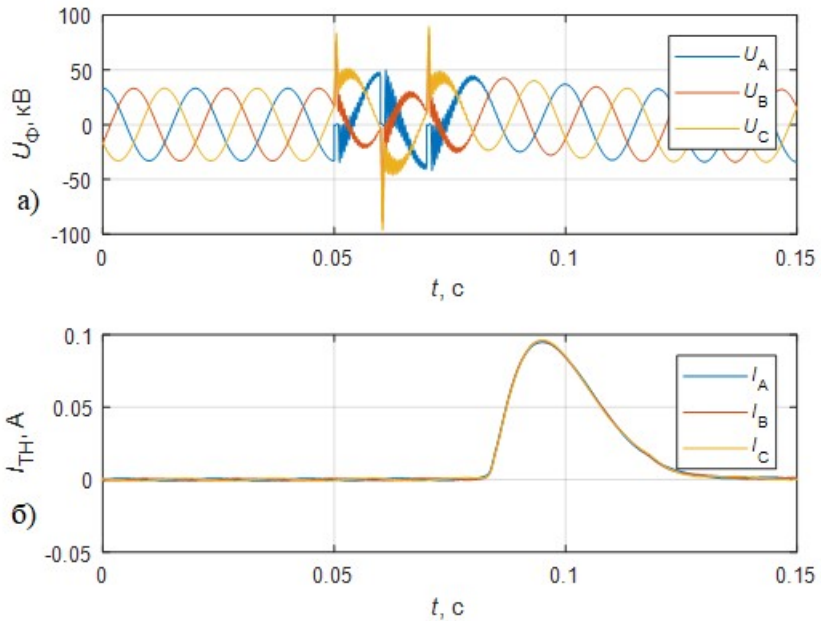


Рис.4.6. Компьютерные осциллограммы напряжений (а) на фазах сети и тока (б) в фазах ТН типа НАЛИ-НТЗ-35 при ОДЗ и гашении дуги через 1мс после зажигания



На рис.4.7 приведен пример процесса при чередовании дуговых замыканий через 30мс.

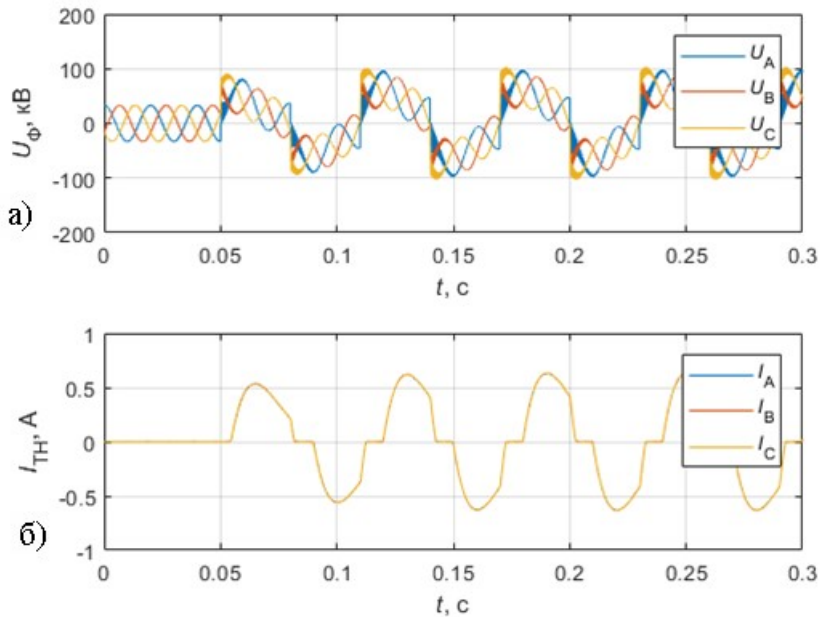


Рис.4.7. Компьютерные осциллограммы напряжений (а) на фазах сети и тока (б) в нейтрали ТН типа НАЛИ-НТЗ-35 при ОДЗ с частотой зажигания/погасания дуги – через каждые 30мс.

Из рис.4.7 видно, что возникает процесс, аналогичный процессу в сети с ТН типа НАЛИ-НТЗ-10. В обмотке ТНП-35 возникает ток, действующее значение которого достигает 1,1А.

Аналогично случаю с ТН НАЛИ-НТЗ-10, для ограничения действующего тока в этом режиме можно предложить увеличение активного сопротивления первичной обмотки ТНП. В случае с ТНП 35 кВ для эффективного ограничения тока также требуется весьма значительное увеличение сопротивления, и ещё более существенное, чем для ТНП 10 кВ. При увеличении активного сопротивления до 50 кА, действующее значение тока в обмотке ТНП в режиме, приведенном на рис.4.7 снизится всего до 0,7А. Чтобы снизить действующий ток до 0,1А потребуются увеличение сопротивления первичной обмотки ТНП до 750 кОм.

Компьютерные осциллограммы процесса при возникновении ОДЗ каждые 30мс и сопротивлении первичной обмотки ТНП 750 кОм приведены на рис.4.8.

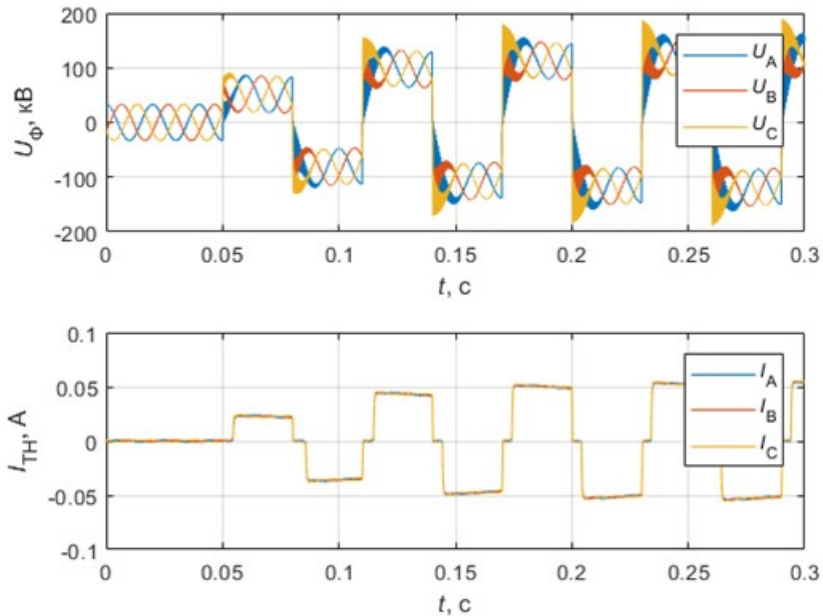


Рис.4.8. Компьютерные осциллограммы напряжений (а) на фазах сети и тока (б) в нейтрали ТН типа НАЛИ-НТЗ-35 при ОДЗ с частотой зажигания/погасания дуги – через каждые 30мс и с активным сопротивлением обмотки ВН ТНП 750 кОм.

#### 4.3. Стойкость ТН к явлению «ложной земли»

Аналогично расчётам в разделе 3 НИР, для исследования стойкости ТН типа НАЛИ-НТЗ-35 к явлению «ложной земли», сначала можно сделать предварительную оценку области существования «ложной земли» в упрощённой схеме (рис.3.24). Определить индуктивность холостого хода исследуемого ТН типа НАЛИ-НТЗ-35 как и в случае с НАЛИ-НТЗ-10 можно из осциллограммы тока в первичной обмотке в зависимости от потокоцепления. Такая осциллограмма приведена на рис.4.9.

Из рис.4.9 видно, что индуктивность холостого хода ТПП-35 приблизительно равна 60 кГн. Результат расчёта смещения нейтрали в упрощённой схеме (рис.3.24), по выражениям (3.2) для диапазонов:  $C_{\phi} = 0,01 \dots 10 \text{ нФ}$ ,  $R = 1 \dots 10000 \text{ МОм}$  приведен на рис.4.10.

Из рис.4.10 видно, что область существования «ложной земли» имеет место в диапазоне ёмкостей фазы на землю от 0,01 до 3,4 нФ, при сопротивлении утечки в одной из фаз до 100...500 МОм. Характерная резонансная частота наблюдается при ёмкости фазы сети на землю 0,02 нФ.

Моделирование процесса «ложной земли» в ТН типа НАЛИ-НТЗ-35 выполняется для параметров расчётной схемы, приведенных в табл.4.1, за исключением ёмкости фазы сети на землю, которая принимается равной 0,1 нФ. В одну из фаз включается сопротивление утечки, равное 10 МОм. Компьютерная осциллограмма процесса приведена на рис.4.11.

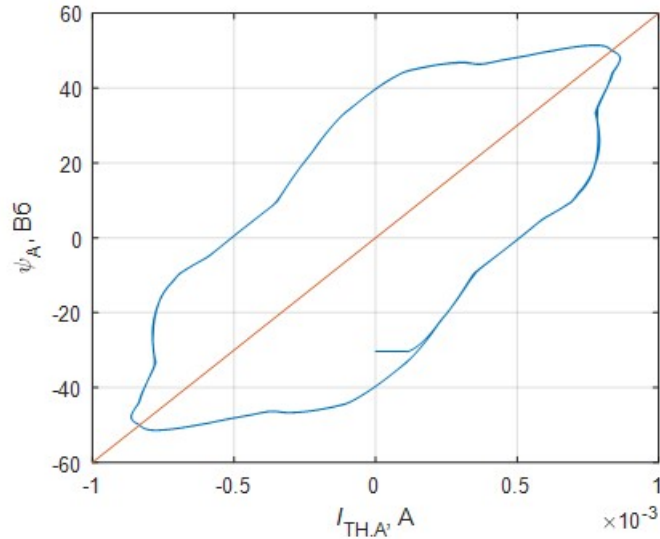


Рис.4.9. Зависимость тока в обмотке одной из фаз ТПП от потокоцепления.

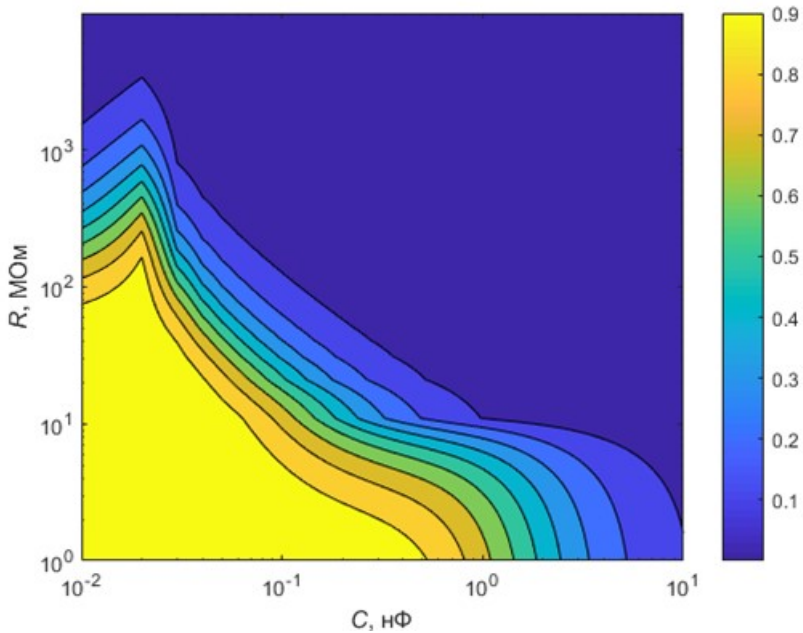


Рис.4.10. Зависимость напряжения на нейтрали от ёмкости фазы сети на землю и от сопротивления утечки в одной из фаз для ТПП-35.

Из рис.4.11 видно, что происходит искажение симметрии фазных напряжений, при этом на дополнительной обмотке ТНП появляется значительное напряжение (действующее значение – 90В). Напряжение превышает уставку защиты от замыканий на землю (15В), соответственно такой режим будет воспринят релейной защитой как замыкание (которого на самом деле нет).

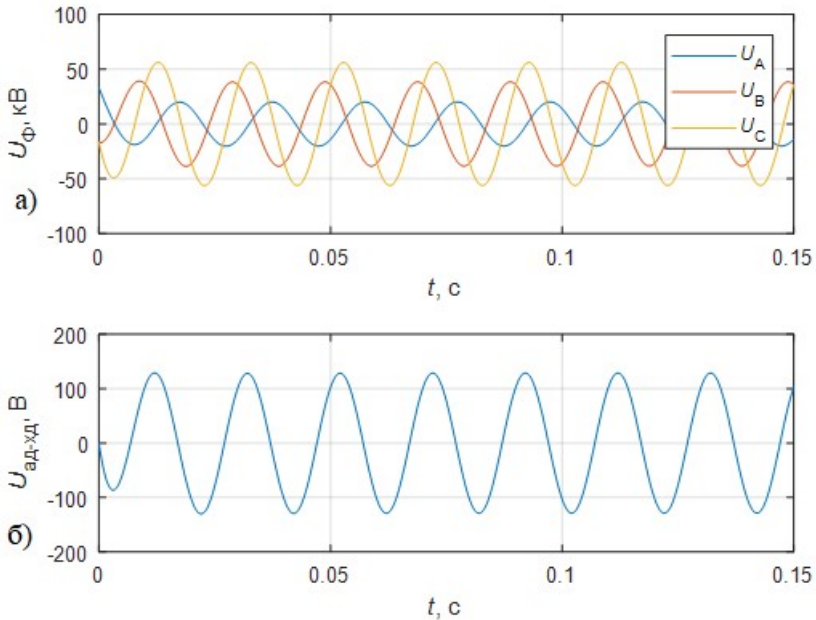


Рис.4.11. Компьютерные осциллограммы напряжений на фазах сети (а) и напряжения на дополнительной обмотке ТН типа НАЛИ-НТЗ-35 (б) при возникновении явления «ложной земли» (ёмкость фазы 0,1нФ, сопротивление утечки 10МОм)

На рис. 4.12 приводится зависимость напряжения на вторичной обмотке ТНП от ёмкости фазы сети и от сопротивления утечки в изоляции одной из фаз на полной модели сети с ТН типа НАЛИ-НТЗ-35. Область существования «ложной земли», полученная в полной модели сети достаточно хорошо согласуется с областью на рис.4.10, полученной при помощи упрощённой схемы.

Стандартное решение проблемы ложной земли – включение дополнительного сопротивления во вторичную обмотку ТН, соединённую в разомкнутый треугольник. Это увеличивает активную составляющую тока в фазах ТН и снижает несимметрию, вызванную компенсацией реактивной составляющей тока (тока намагничивания) ёмкостным током фаз. В случае с ТН типа НАЛИ-НТЗ-35 дополнительное сопротивление (нагрузку) можно включить во вторичную обмотку ТНП.

На рис.4.13 приведены компьютерные осциллограммы явления «ложной земли» при включении во вторичную обмотку ТНП сопротивления величиной 250м.

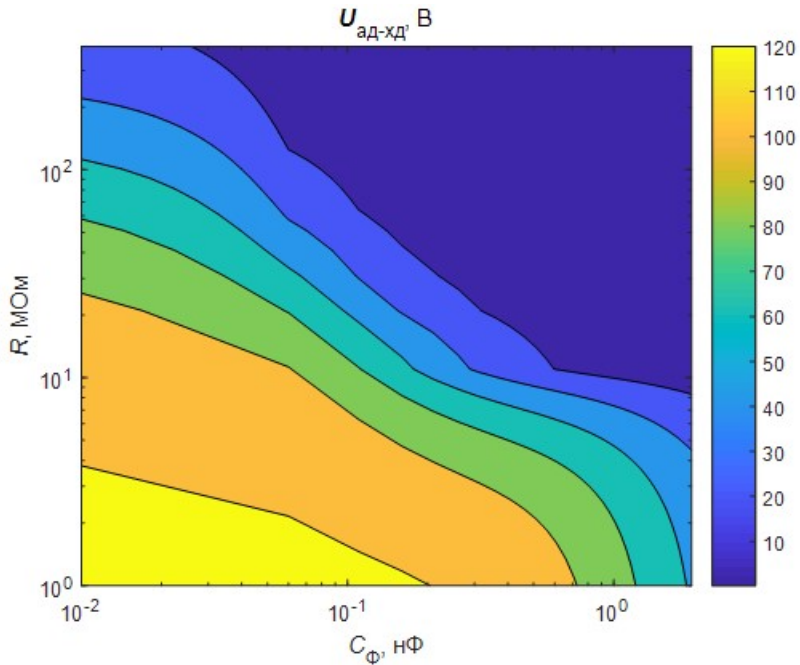


Рис.4.12. Зависимость напряжения на вторичной обмотке ТНП-35 от ёмкости фазы сети и сопротивления утечки в одной из фаз.

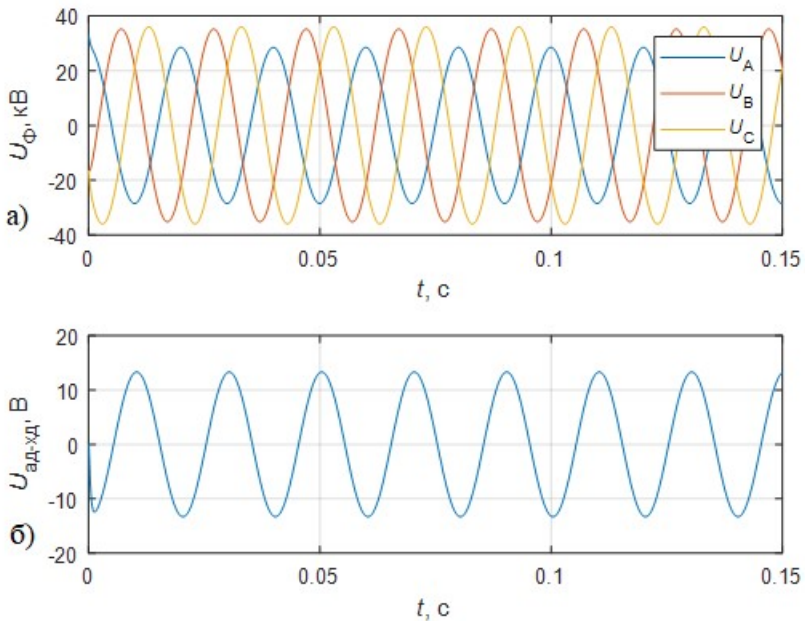


Рис.4.13. Компьютерные осциллограммы напряжений на фазах сети (а) и напряжения на дополнительной обмотке ТН типа НАЛИ-НТЗ-35 (б) при возникновении явления «ложной земли» (ёмкость фазы 0,1нФ, сопротивление утечки 10МОм), и включения сопротивления 250ом во вторичную обмотку ТНП

#### 4.4 Неполнофазный режим работы силового трансформатора

На рис.4.14 приведен результат расчёта процесса при обрыве фазы в схеме на рис.2.22. Силовой трансформатор – ТМ-1600/35, трансформатор напряжения – трёхфазная группа ЗНОМ-35. Длина ВЛ 35 кВ – 10 км, длина оборванного участка фазы – 2 км.

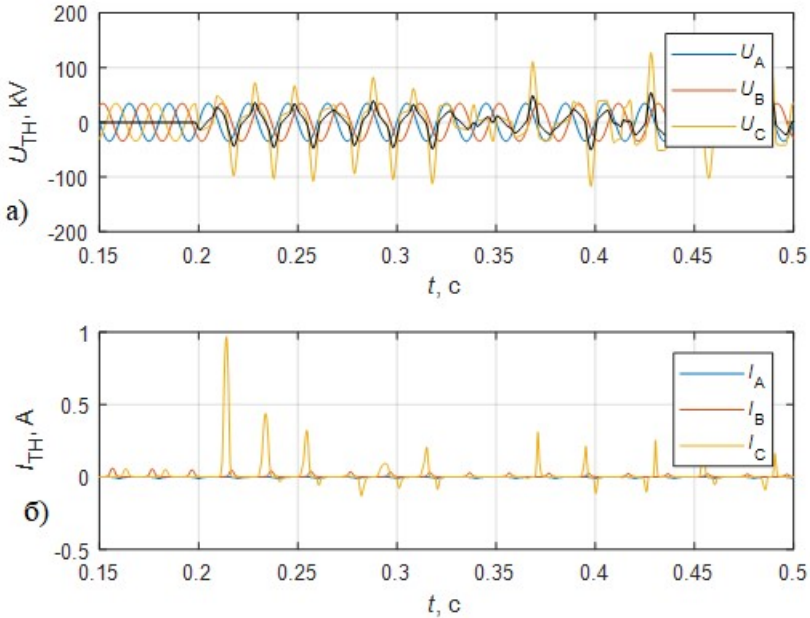


Рис.4.14. Компьютерные осциллограммы напряжений на фазах (а) и токов в обмотках ВН (б) трёхфазной группы ТН типа ЗНОЛ-35 при феррорезонансном процессе в сети 35 кВ обусловленном неполнофазным режимом работы силового трансформатора.

Из рис.4.14 видно, что феррорезонансный процесс в силовом трансформаторе приводит к возникновению перенапряжений, кратностью до  $3.8U_{\phi, \max}$ . При этом в обмотке ВН ТН на повреждённой фазе протекает ток, действующее значение которого достигает 110мА. Этот ток может представлять опасность для ТН.

На рис.4.15 приведен аналогичный расчёт при установке в сети ТН типа НАЛИ-НТЗ-35.

Из рис.4.15 видно, что в рассмотренном режиме существенных токов в обмотках ВН трансформаторов НОЛ-НТЗ-35, входящих в антирезонансный ТН НАЛИ, не возникает. Это можно объяснить тем, что значительная часть падения напряжения, приложенная к ТН на повреждённой фазе приходится на ТНП, обладающей пониженной индукцией и большим реактивным сопротивлением. Компьютерная осциллограмма напряжения на ТНП и тока в его первичной обмотке приведена на рис.4.16.

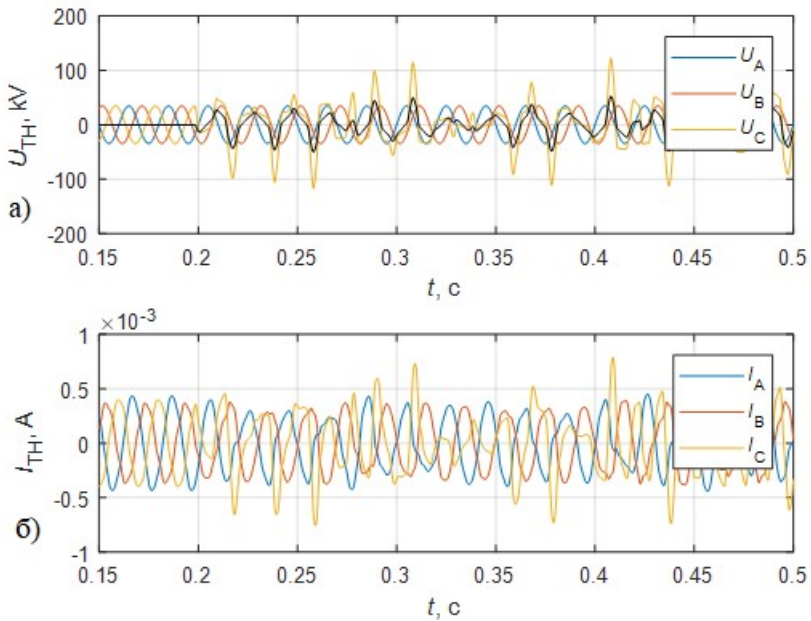


Рис.4.15. Компьютерные осциллограммы напряжений на фазах (а) и токов в обмотках ВН (б) ТН типа НАЛИ-НТЗ-35 при феррорезонансном процессе в сети 35 кВ обусловленном неполнофазным режимом работы силового трансформатора.

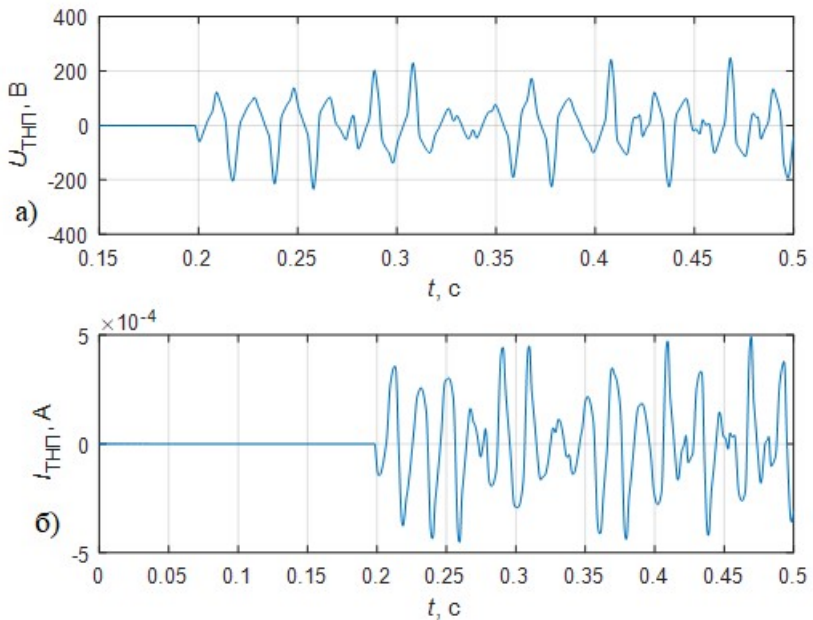


Рис.4.16. Компьютерная осциллограмма напряжения на вторичной обмотке ТНП-35 (а) и тока в его первичной обмотке (б) при феррорезонансе, обусловленном неполнофазным режимом работы силового трансформатора.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При выполнении НИР были выполнены как методические исследования, так и исследования по существу поставленных задач: исследование антирезонансных свойств ТН типа НАЛИ-НТЗ-10 и НАЛИ-НТЗ-35.

**К методическим исследованиям** следует отнести:

1. Разработка математических моделей и расчёт параметров этих моделей для ТН типов НАЛИ-НТЗ-10 и НАЛИ-НТЗ-35;
2. Получение выражений для расчёта частот собственных колебаний в испытательной схеме.
3. Получение упрощенного выражения для оценки несимметрии напряжений, обусловленной явлением «ложной земли».

**Основные выводы по существу проведенных исследований** можно сформулировать следующим образом:

1. В ТН типа НАЛИ-НТЗ-10 и НАЛИ-НТЗ-35 не возникает устойчивого феррорезонанса при возникновении несимметрии сети (дуговые замыкания, отключение металлических замыканий). Это объясняется особенностью конструкции ТН, а именно – отсутствием источника ЭДС в контуре нулевой последовательности из-за трёхстержневой конструкции основного магнитопровода ТН.
2. Было выполнено моделирование процессов при горении перемежающейся дуги в испытательной схеме. Полученные компьютерные осциллограммы хорошо согласуются с имеющимися опытными осциллограммами, что говорит о достоверности разработанных математических моделей.
3. Горение перемежающейся дуги с интервалами между зажиганиями не более 10мс не приводит к повреждению или даже к сколько-либо существенному нагреву ТН. Это объясняется тем, что ТНП обладает большим реактивным сопротивлением и, пока разрядка (перезарядка) ёмкости нулевой последовательности сети происходит через дугу, в первичной обмотке ТНП не возникает значительных токов.
4. После погасания последней дуги, либо после отключения ОЗЗ, через некоторое время в первичной обмотке ТНП (и, соответственно, в первичных обмотках фаз ТПП) возникает бросок тока намагничивания значительной величины. Бросок тока обусловлен насыщением магнитопровода ТНП постоянным напряжением нулевой последовательности, оставшимся на ёмкостях фаз сети (на нейтрали) и последующим разрядом этих ёмкостей через ТН.
5. Наличие этого броска тока намагничивания может представлять опасность для исследуемых ТН в тех случаях, когда возникновение несимметрии сети (например – дуговые замыкания) повторяется через интервалы времени, существенно превышающие 10мс.
6. Для ограничения бросков токов намагничивания можно увеличить активное сопротивление первичной обмотки ТНП (например, включив последовательно с обмоткой высокоомный резистор), т.е. – затруднение разряда ёмкости сети через ТН. К сожалению, для ограничения тока до безопасных значений требуется сопротивление порядка 100 кОм для НАЛИ-НТЗ-10 и 750 кОм для НАЛИ-НТЗ-35. Такие величины сопротивлений окажут существенное влияние на метрологические характеристики ТН.



7. Исследуемые ТН подвержены явлению «ложной земли» при ёмкостях фазы сети на землю  $0,1-10нФ$  и несимметрии сопротивлений изоляции фаз сети. Природа этого явления такова, что можно сказать, что ему в большей или меньшей степени подвержены все заземляемые ТН 6-35 кВ. Для предотвращения «ложной земли» достаточно увеличить ток нулевой последовательности в обмотках ТН (например – подключив дополнительное сопротивление  $250\Omega$  в обмотку для измерения напряжения нулевой последовательности). В ТН типа НАЛИ-НТЗ дополнительное сопротивление можно подключить к вторичной обмотке ТНП.
8. Исследуемые ТН не подвержены повреждениям при возникновении в сети неполнофазного режима работы силового трансформатора. Перенапряжения в этом режиме могут достигать  $3,8U_{ф. max}$ , но за счёт сильно сниженной рабочей индукции магнитопровода ТНП существенного увеличения тока в его обмотке у ТН типа НАЛИ-НТЗ в этом режиме не возникает.

**Общее заключение по НИР** можно сформулировать так:

Применение ТН типа НАЛИ-НТЗ позволит полностью исключить возникновение феррорезонанса при однократных дугowych замыканиях («клевках земли») и отключении металлических замыканий на землю – т.е. при основных видах воздействий, приводящих к возникновению феррорезонанса в сетях с изолированной нейтралью.

Горение перемежающейся дуги в большинстве случаев также не приведёт к повреждению ТН, причём чем интенсивнее горит дуга (чем меньше интервал между зажиганиями/погасаниями) – тем безопаснее этот режим для исследуемых ТН. Возникновение режима перемежающихся дугowych замыканий с интервалами между зажиганиями 20-30мс и больше может представлять опасность для ТН. Насколько вероятно возникновение такого режима в реальной сети – вопрос сложный, поскольку существует множество причин возникновения дугowych замыканий и мест возможного горения дуги. Можно порекомендовать Производителю исследовать в испытательной схеме поведение ТН с интервалами между зажиганиями 20-30мс (возможно, потребуется изменение конструкции «короткозамыкателя»).

Явление "ложной земли" не приводит к повреждению ТН и вызывает лишь нарушение работы релейных схем и измерительных приборов, подключенных ко вторичной обмотке ТН, предназначенной для измерения напряжения нулевой последовательности. Этот режим возможен только в сетях с очень маленькой ёмкостью фазы на землю (единицы нанофарад), и, следовательно, также является маловероятным. В целом данный режим можно считать режимом феррорезонанса достаточно условно, это скорее свойство (особенность) сетей с малой ёмкостью фазы на землю, заземляемыми ТН, и с какой-либо несимметрией. Наиболее выраженное явление «ложной земли» возникает при несимметрии сопротивления изоляции фаз. Ложный сигнал о замыкании на землю в таких сетях возникает практически во всех существующих в настоящее время конструкциях электромагнитных ТН. При этом существует техническая возможность предотвратить или существенным образом демпфировать явление «ложной земли» в сетях с малой ёмкостью на землю и с ТН типа НАЛИ-НТЗ за счёт дополнительного активного сопротивления, которое следует подключать к обмотке для измерения напряжения нулевой последовательности.

Возникновение неполнофазного режима работы силового трансформатора может приводить к возникновению на повреждённой фазе перенапряжений до  $3,8U_{ф.мах}$ . Для традиционных трансформаторов такой режим является очень опасным, т.к. за счёт насыщения ток в их первичных обмотках в таком режиме может достигать единиц ампер. Исследуемые ТН типа НАЛИ-НТЗ не подвержены повреждениям в этом режиме благодаря значительно сниженной рабочей индукции ТНП. Конструкция ТНП позволяет выдержать трёхкратное повышение напряжения на первичной обмотке.

Важным преимуществом ТН типа НАЛИ-НТЗ-10 и НАЛИ-НТЗ-35 является литая изоляция, позволяющая использовать их в сетях с повышенными требованиями по пожаро и взрывобезопасности.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Зихерман М.Х.** Повреждение трансформаторов напряжения при дуговых замыканиях на землю // Электрические станции, 1978, №11, С.65-67.
2. **Алексеев В.Г.** Исследование режимов работы трансформаторов напряжения контроля изоляции в сетях 6...10 кВ / Алексеев В.Г., Дунайцев С.Г., Зихерман М.Х. // Электрические станции. – 1981. - №1, С.56-59.
3. **Алексеев В.Г.** Феррорезонанс в сетях 6-10 кВ / Алексеев В.Г., Зихерман М.Х. // Электрические станции, 1979, №1, С.63-65.
4. **Зихерман М.Х.** Трансформаторы напряжения для сетей 6-10 кВ. Причины повреждаемости // Новости электротехники. 2003. №1(25).
5. **Кадомская К.П.** Антирезонансные трансформаторы напряжения. Эффективность применения. / Кадомская К.П., Лаптев О.И. // Новости электротехники, Вып 6(42), 2006.
6. **Лихачев Ф.А.** Повышение надёжности распределительных сетей 6-10 кВ // Электрические станции, 1981, №11, С.51-56.
7. **Дударев Л.Е.** Оценка эффективности защиты трансформаторов напряжения от токовых перегрузок / Дударев Л.Е., Волошек И.В. // Электрические станции, 1986, №11, С.65-69.
8. **Дударев Л.Е.** Численный анализ феррорезонансных процессов в сетях с изолированной нейтралью / Дударев Л.Е., Волошек И.В., Левковский А.И. // Электрические станции, 1991, №4, С.66-71.
9. **Дударев Л.Е.** Подавление феррорезонансных процессов в сетях с изолированной нейтралью // Электрические станции, 1993, №10, С.36-39.
10. НТЗ Волхов. Каталог продукции. URL: [http://www.ntzv.ru/images/ntzv\\_catalog.pdf](http://www.ntzv.ru/images/ntzv_catalog.pdf)
11. **Справочник по электротехническим материалам**/Под ред. Корицкого Ю.В., Пасынкова В.В., Тареева Б.М.-Т. 3.-3-е изд., перераб.- Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1988.-728с.
12. **Колонтаров П.Л., Цейтлин Л.А.** Расчёт индуктивностей. -3-е изд., перераб. и доп.- Л: Энергоатомиздат, 1986.
13. **Селиванов В.Н.** Исследование феррорезонансных колебаний в воздушных сетях 35 кВ с изолированной нейтралью и электромагнитными трансформаторами напряжения. Дис. кан. тех. наук: 05.14.02. - СПбГПУ, 2004. - 178с.
14. **Заболотников А.П., Кадомская К.П., Тихонов А.А.** Математическое моделирование и перенапряжения в электрических сетях 6...35 кВ: Монография / Новосиб. гос. техн. ун-т. – Новосибирск, 1993. – 158с.
15. **Кадомская К.П., Лавров Ю.А., Рейхердт А.А.** Перенапряжения в электрических сетях различного назначения и защита от них: Учебник.- Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004.-368 с.- (Серия «Учебники НГТУ»)
16. Протокол № 8-14 от 07.11.2014 испытательной лаборатории ООО «НТЗ» ВОЛХОВ» испытаний ТН типа НАЛИ-НТЗ-10 на устойчивость к феррорезонансу.

17. **Тихомиров П.М.** Расчет трансформаторов. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 528с.
18. **Лаптев О.И.** Исследование эффективности антирезонансных трансформаторов напряжения типа НАМИ в электрических сетях высокого и среднего напряжений: Дис. кан. тех. наук: 05.14.12. Новосибир.гос.техн.ун-т. - Новосибирск. 2007.
19. **Справочник по электрическим установкам высокого напряжения** / Под ред. И.А. Баумштейна, С.А. Бажанова.-3-е изд., перераб. и доп.- М.:Энергоатомиздат, 1989.-768с.
20. Программа и методика испытаний антирезонансных трёхфазных трансформаторов напряжения на устойчивость к явлениям феррорезонанса. ООО «НТЗ «Волхов».
21. **Емельянец Ю.А.** О феррорезонансных процессах без замыкания на землю в сетях 6-35 кВ.// Новости электротехники.-2009.-№4 (58)
22. **Зихерман М.Х.** Антирезонансные трансформаторы напряжения. Перспективы развития // Новости электротехники.- 2009.-№3(57).
23. Протокол № 9-14 от 06.05.2015 испытательной лаборатории ООО «НТЗ» ВОЛХОВ» испытаний ТН типа НАЛИ-НТЗ-10 на устойчивость к опрокидыванию фазы.