

*Рассмотрены организационные мероприятия, позволяющие исключить возможность появления феррорезонансных процессов в электрических сетях с изолированной нейтралью. Приведены результаты экспериментальных исследований в действующих электрических сетях, позволившие обосновать аналитически полученные результаты расчётов границ областей возможного возникновения затухающего и незатухающего ФРП. Экспериментальным путём обоснована предпочтительность использования ТН типа НТН с точки зрения повышения надёжности и безопасности эксплуатации электрических сетей. Рассмотренные рекомендации внедрены в эксплуатацию в условиях электрических сетей АК «Харьковоблэнерго».*

**УДК 621.314.2**

**А.И. Ганус**

*АК «Харьковоблэнерго»*

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЦ ОБЛАСТЕЙ ВОЗМОЖНЫХ ЗАТУХАЮЩЕГО И НЕЗАТУХАЮЩЕГО ФЕРРОРЕЗОНАНСНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ С ТРАНСФОРМАТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЯ**

**Постановка проблемы в общем виде, её связь с важными научными и практическими заданиями.** Чаще всего повреждения измерительных трансформаторов напряжения (ТН) являются результатом появления в электрических сетях с изолированной нейтралью различных перенапряжений. Их причины следующие:

- отключения электрических цепей с индуктивностями в условиях ускоренного обрыва тока, протекающего через эти индуктивности;
- отключения или включения ёмкостей и «холостых» линий;
- появление гармоник при несимметричных замыканиях;
- появление различных резонансных процессов, в том числе, феррорезонансных.

Феррорезонансные процессы (ФРП) возникают в электрических цепях переменного тока, содержащих нелинейные индуктивности. При нарушении симметрии фазных ёмкостей электрической сети относительно земли в ряде случаев возможен резонанс индуктивностей обмоток ТН и ёмкостей электрической сети на рабочей частоте. Этот процесс сопровождается «опрокидыванием» фазы трансформатора, т.е. таким состоянием схемы, когда напряжение на трансформаторе, складываясь с действующим напряжением, обуславливает повышенное напряжение на ёмкости электрической сети.

Эти процессы чаще всего происходят в электрических сетях с изолированной нейтралью и сопровождаются, как правило, субгармоническими колебаниями фазных напряжений. Их возникновение обусловлено появлением в электрических сетях с изолированной нейтралью однофазных замыканий на землю, но, иногда, они возможны и при нормальных режимах работы электрических сетей.

О масштабах повреждаемости ТН говорит и тот факт, что среди 362 ТН, установленных в сельских электрических сетях АК «Харьковоблэнерго», за шесть лет с 1999 по 2004 г. было зарегистрировано 260 повреждений [1].

В настоящее время используются различные мероприятия, направленные на снижение повреждаемости ТН. Однако, большинство из них нельзя отнести к эффективным, а эффективные требуют значительного вложения финансовых средств для реализации.

Поэтому, важное значение имеет разработка организационных мероприятий, не требующих капитальных вложений, направленных на снижение повреждаемости ТН.

Особое внимание к рассматриваемой теме обусловлено также тем, что одной из функций ТН является контроль изоляции, т.е. выявление фактов появления земли в электрических сетях с изолированной нейтралью, которое возможно при обрыве проводов воздушных линий (ВЛ) или их прикосновения к металлическим элементам конструкций опор. Учитывая, что в электрических сетях с изолированной нейтралью подобные нарушения в работе не вызывают автоматического отключения напряжения от повреждённых ВЛ, сравнительно часто происходят случаи гибели людей и животных при их приближении на недопустимое расстояние к проводам и опорам, находящихся под напряжением. Резко увеличивается вероятность несчастных случаев при повреждении ТН, когда часть электрической сети остаётся без контроля изоляции. Поэтому, проблема повреждаемости ТН напрямую связана с вопросами безопасной эксплуатации электрических сетей.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Основные из известных способов защиты ТН основаны на включении в обмотку «разомкнутый треугольник» ТН активного сопротивления [2], заземлении нейтрали ТН через активное сопротивление [3], введение активного сопротивления в первичную обмотку ТН [4], кратковременное подключение низкоомного сопротивления к вторичным обмоткам ТН [5] предназначены для ограничения тока через обмотки ТН при возникшем ФРП или для погашения ФРП, но не для его исключения.

Исключение возможности возникновения ФРП обеспечивается при использовании ТН типа НТН [6]. Однако, его использование требует дополнительных капитальных вложений.

Задача повышения надёжности ТН за счёт использования исключительно организационных мероприятий, не требующих капитальных вложений, ранее не ставилась.

**Формулировка целей статьи (постановка задачи).** Условием резонанса является появление хотя бы кратковременного равенства

$$\omega_0 \cdot L_{ТН} = \frac{1}{\omega_0 \cdot C_c}, \quad (1)$$

где  $L_{ТН}$  – индуктивность ТН,

$C_c$  – суммарная зарядная ёмкость ВЛ-6(10) – 35 кВ, подключённых к секциям шин подстанции (ПС),

$\omega_0$  – резонансная частота.

Исходя из этого, исключить возможность резонансных явлений, в том числе ФРП, возможно за счёт ограничения величин суммарной зарядной ёмкости ВЛ-6(10) – 35 кВ, подключённых к секциям шин ПС, теми параметрами, при которых невозможен резонанс.

Данная задача была исследована в [7], где были определены границы областей возможного возникновения ФРП.

Целью данной работы является экспериментальное подтверждение аналитически полученных в [7] результатов.

В рамках решения поставленной задачи необходимо экспериментально в действующих электрических сетях

- при соответствующей конфигурации электрических сетей номинальным напряжением 6(10) и 35 кВ добиться появления ФРП;

- изменением конфигурации электрической сети 35 кВ в соответствии с рекомендациями, изложенными в [7], добиться исключения возможности появления ФРП;

- изменением конфигурации электрической сети 6(10) кВ в соответствии с рекомендациями, изложенными в [7], добиться условий возможного появления ФРП и их исключения.

**Изложение основного материала исследования.** Схема многоуровневой электрической сети, в которой производился эксперимент, приведена на рис. 1. Она включает в себя электрическую сеть 35 кВ, к которой подключена ПС 35/10 кВ «Прудянка», и электрическую сеть 10 кВ от рассматриваемой ПС.

Электрическая сеть 35 кВ запитана от двух центров питания ПС 110/35/10 кВ «т. Казачья Лопань» и ПС 110/35/10 кВ «т. Слатино» по следующим ВЛ-35 кВ.

Первая секция шин 35 кВ ПС 35/10 кВ «Прудянка» подключена к секциям шин 35 кВ питающей ПС 110/35/10 кВ «т. Казачья Лопань» через ВЛ-35 кВ «т. Казачья Лопань – Токаревка» длиной 9,4 км (провода марки АС-95), «Токаревка – Прудянка» длиной 6,9 км (провода марки АС-120). Кроме ВЛ-35 кВ «т. Казачья Лопань – Токаревка» к секциям шин 35 кВ питающей ПС 110/35/10 кВ «т. Казачья Лопань» подключена ВЛ-35 кВ «т. Казачья Лопань – Агроном» длиной 3,5 км (провода марки АС-50). На ПС 35/10 кВ «Агроном» во время натурального эксперимента секционный выключатель был во включенном состоянии, обеспечивая подачу охранного напряжения на ВЛ-35 кВ «Агроном - Уды», длина которой 10,1 км (провода марки АС-95). Со стороны ПС 35/10 кВ «Уды» во время натурального эксперимента ВЛ-35 кВ «Агроном - Уды» была отключена.

Вторая секция шин 35 кВ ПС 35/10 кВ «Прудянка» подключена к секциям шин 35 кВ питающей ПС 110/35/10 кВ «т. Слатино» через ВЛ-35 кВ «т. Слатино – Прудянка» длиной 12,3 км (провода марки АС-120). Кроме ВЛ-35 кВ «т. Слатино – Прудянка» к секциям шин 35 кВ питающей ПС 110/35/10 кВ «т. Слатино» подключена ВЛ-35 кВ «т. Слатино – ХПТФ» длиной 14,2 км (провода марки АС-120). Секционный выключатель на ПС 35/10 кВ «ХПТФ» во время натурального эксперимента был отключён.

Рассмотрим основные характеристики подстанций, входящих в электрическую сеть, в которой производился натуральный эксперимент.

Источником напряжения 35 кВ на ПС 110/35/10 кВ «т. Казачья Лопань» был трансформатор 110/35/10 кВ мощностью 20 МВА. На ПС 110/35/10 кВ «т. Казачья Лопань» на секциях шин, задействованных в натурном эксперименте, установлено 2 ТН-35 кВ.

Источником напряжения 35 кВ на ПС 110/35/10 кВ «т. Слатино» был трансформатор 110/35/10 кВ мощностью 25 МВА. На ПС 110/35/10 кВ «т. Слатино» на секциях шин, задействованных в натурном эксперименте, установлено 2 ТН-35 кВ.

На ПС «Токаревка» установлены два понижающих трансформатора 35/10 кВ с мощностями 2,5 и 1,6 МВА.

На ПС «Агроном» установлены два понижающих трансформатора 35/10 кВ с мощностями по 2,5 МВА каждый, а также два ТН-35 кВ.

На второй секции шин ПС «ХПТФ» установлен понижающий трансформатор 35/10 кВ мощностью 6,3 МВА.

ПС 35/10 кВ «Прудянка» - двухтрансформаторная. Мощность каждого из понижающих трансформаторов – 2,5 МВА. К I секции шин подключены ВЛ-10 кВ «Токаревка» длиной 22,56 км, провода марки АС-35 (нагрузка в день эксперимента составляла 5 А) и ВЛ-10 кВ «Цуповка» длиной 22,91 км, провода марки АС-50 (с нагрузкой 40 А). Ко II секции шин подключены ВЛ-10 кВ «Прудянка» длиной 2,48 км, провода марки АС-35 (с нагрузкой 10 А), ВЛ-10 кВ «Слатино» длиной 21,02 км, провода марки АС-35 (с нагрузкой 55 А) и ВЛ-10 кВ «Проходы» длиной 34,35 км, провода марки АС-35 (с нагрузкой 45 А). К I секции шин во время эксперимента был подключён ТН типа НТМИ. Секционный выключатель 10 кВ на ПС 35/10 кВ «Прудянка» во время

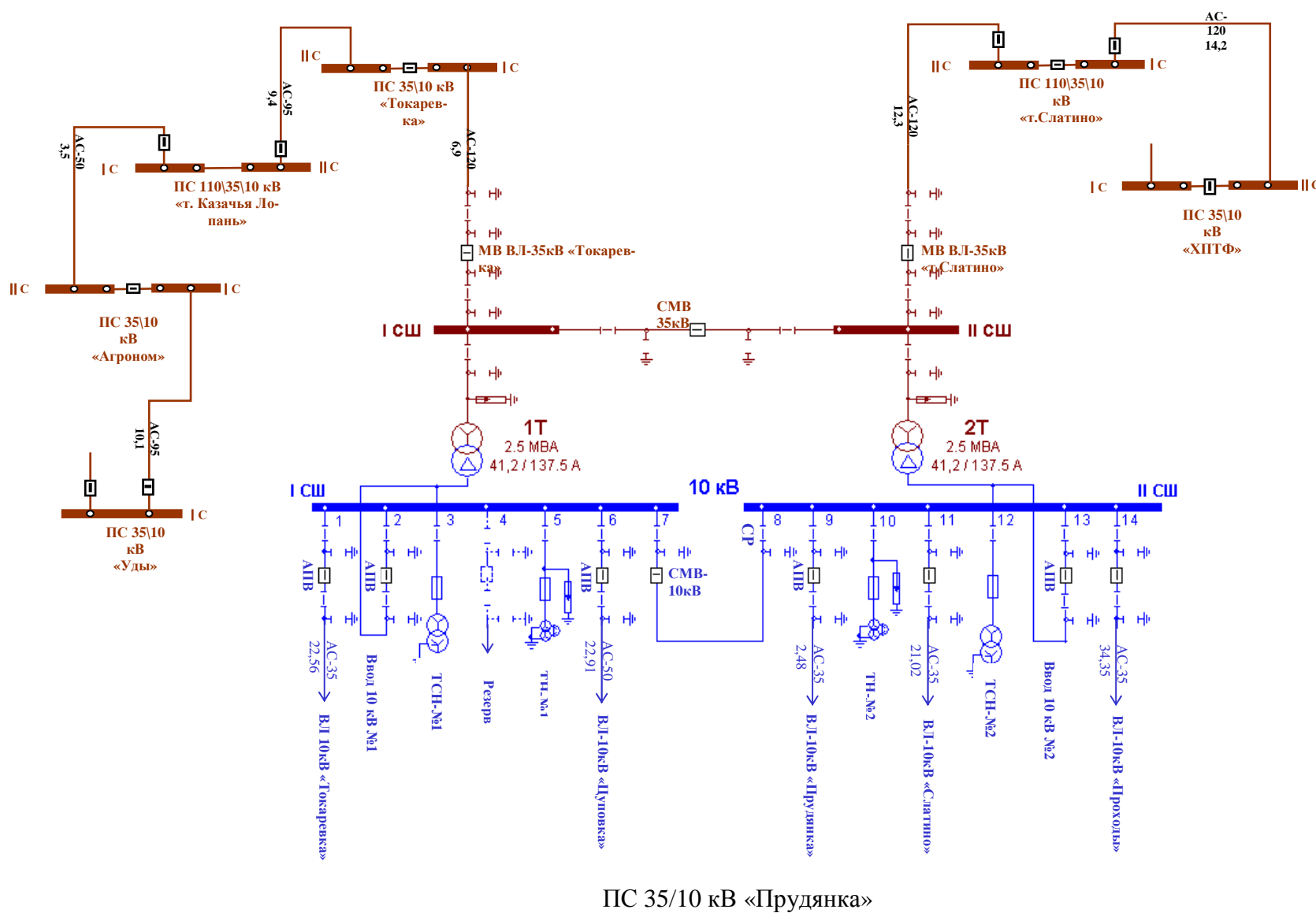


Рис.1. Схема многоуровневой электрической сети, в которой производился натуральный эксперимент.

эксперимента также был включён для обеспечения задач сравнительного анализа реакций каждого из ТН на действие идентичных повреждающих факторов.

Имитация перемежающейся дуги осуществлялась путём подключения провода одной из фаз ВЛ-10 кВ «Прудянка» к земле через установку для задания интенсивности дуги, расстояние между пластинами которой регулировалось перед каждым из экспериментов с целью квазиприближения к наиболее тяжелому, с точки зрения эксплуатации ТН, режиму. При максимальном расстоянии между пластинами – дуга отсутствовала. При уменьшении этого расстояния – дуга появлялась, а её интенсивность зависела от расстояния между пластинами.

Оптимальным для экспериментов было такое расстояние между пластинами, при котором горение дуги было бы неустойчивым, а токи замыкания на землю были бы минимальными. Изменение ёмкости сети 10 кВ осуществлялось путём отключения или подключения ВЛ-10 кВ «Токаревка», «Цуповка», «Слатино», «Проходы» в определённой комбинации, а изменение ёмкости электрической сети 35 кВ – отключением-подключением ВЛ-35 кВ «Прудянка - Токаревка» и «т. Слатино – Прудянка».

Съём показаний регистрирующих приборов осуществлялся с вторичных обмоток обоих ТН и с шунта, установленного в нейтрали ТН типа НТМИ.

ФРП был получен при и переходном процессе отключения ВЛ-10 кВ «Слатино» от объединённых секций шин с подключёнными ВЛ-10 кВ «Проходы» и «Прудянка» при наличии искусственной земли в сети 10 кВ. При этом величина ёмкостного тока замыкания на землю уменьшилась с 1,75 А до 1,04 А. При этом ВЛ-35 кВ «т. Слатино – Прудянка» была включена, а ВЛ-35 кВ «Прудянка - Токаревка» - отключена. При указанной конфигурации многоуровневой электрической сети, согласно результатов исследований, произведённых в [7], она находится в области возможного возникновения незатухающего ФРП.

Реконограмма указанного процесса, приведенная на рис. 2, подтверждает аналитически полученные в [7] результаты.

В ходе следующего эксперимента к первой секции шин 35 кВ ПС 35/10 кВ «Прудянка» была подключена ВЛ-35 кВ «Прудянка - Токаревка». При этом, согласно полученной конфигурации, многоуровневая электрическая сеть стала соответствовать области затухающего ФРП. Реконограмма самого тяжелого из переходных процессов для данной конфигурации электрической сети приведена на рис. 3. Увеличение ёмкости электрической сети 35 кВ позволило исключить возможность появления ФРП при замыкании на землю в электрической сети 10 кВ.

Отключение ВЛ-35 кВ «Прудянка - т. Слатино» привело к тому, что при появлении земли в электрической сети 10 кВ, в последней опять начал возникать ФРП (рис. 4). Однако, его характер отличался от приведенного на рис. 2, что экспериментально подтвердило зависимость характера протекания ФРП в электрических сетях 6-10 кВ от параметров электрических сетей смежных номинальных уровней напряжения с изолированной нейтралью.

Включение ФРП при указанной конфигурации электрической сети 35 кВ оказалось возможным при включении на ПС 35/10 кВ «Прудянка» ВЛ-10 кВ «Токаревка» и «Цуповка». Реконограмма процессов для данной конфигурации многоуровневой электрической сети приведена на рис. 5.

Эксперименты, результаты которых показаны на рис. 2, 4, производились при конфигурации электрических сетей 35 и 10 кВ, соответствующей области возможного возникновения незатухающего ФРП. А эксперименты, результаты которых показаны на рис. 3, 5, производились при конфигурации электрических сетей 35 и 10 кВ,

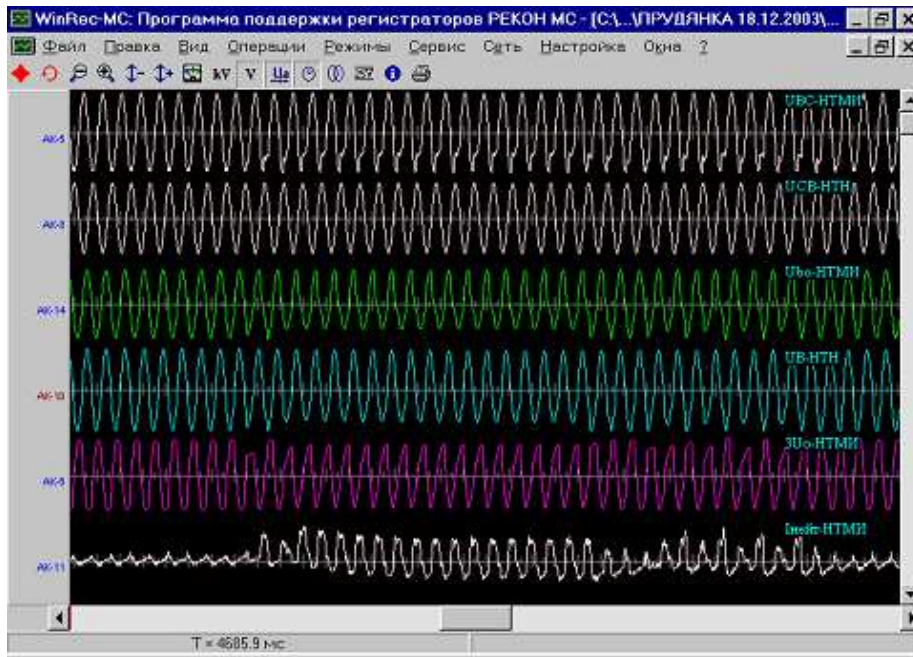


Рис. 2. Рекогнограмма напряжений на вторичных обмотках ТН и тока через нейтраль при искусственном замыкании на землю в сети 10 кВ для многоуровневой электрической сети, конфигурация которой относится к области возможного возникновения незатухающего ФРП.

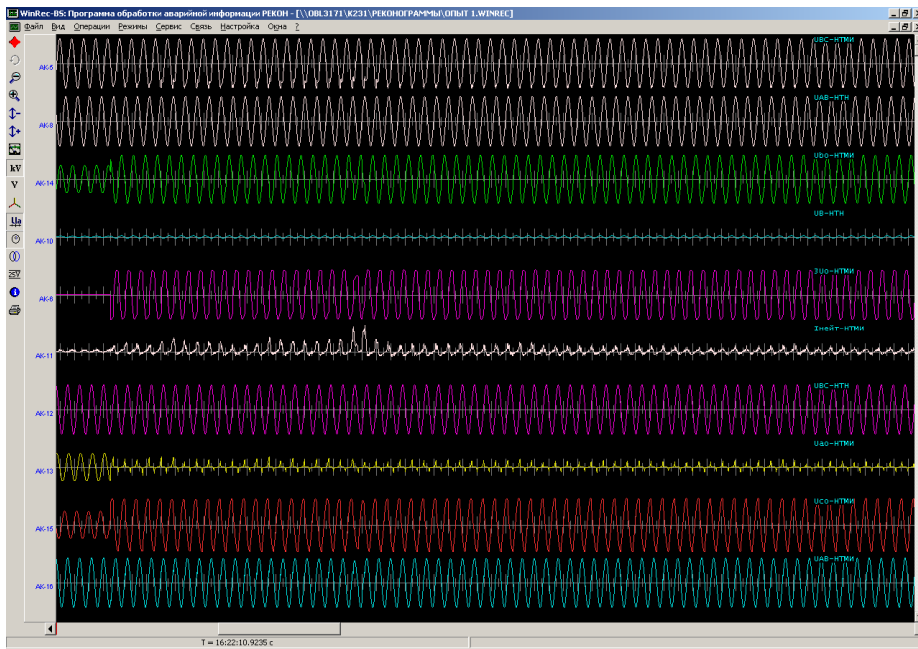


Рис. 3. Рекогнограмма напряжений на вторичных обмотках ТН и тока через нейтраль при искусственном замыкании на землю в сети 10 кВ для многоуровневой электрической сети, конфигурация которой относится к области возможного возникновения затухающего ФРП.

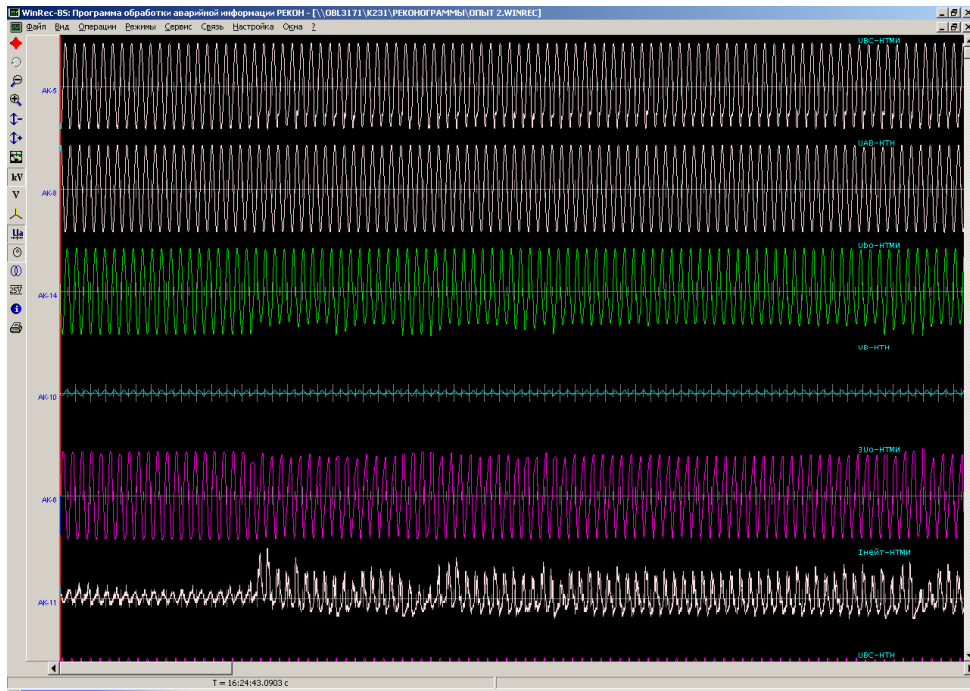


Рис. 4. Реконограмма напряжений на вторичных обмотках ТН и тока через нейтраль при искусственном замыкании на землю в сети 10 кВ для многоуровневой электрической сети, конфигурация которой относится к области возможного возникновения незатухающего ФРП.

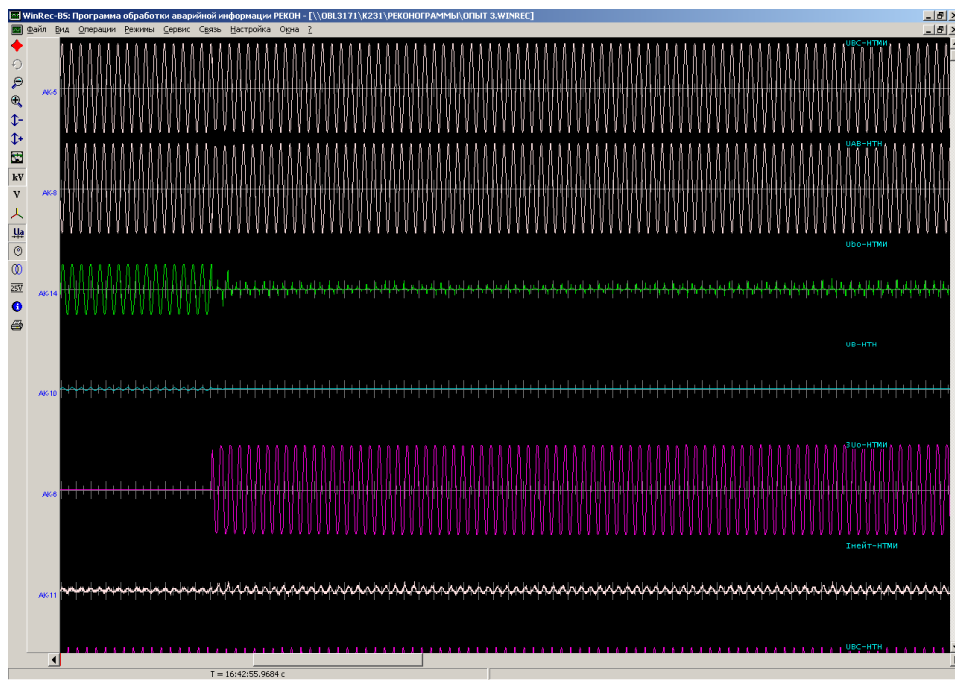


Рис. 5. Реконограмма напряжений на вторичных обмотках ТН и тока через нейтраль при искусственном замыкании на землю в сети 10 кВ для многоуровневой электрической сети, конфигурация которой относится к области возможного возникновения затухающего ФРП.

соответствующей области возможного возникновения затухающего ФРП. Характер протекающих процессов в каждом из рассматриваемых случаев полностью соответствовал тому, что ожидалось по результатам аналитических исследований.

Экспериментальные исследования проводились также с ТН типа НТН-10 кВ. Однако, при их использовании ФРП в электрической сети 10 кВ не возникали при любой из конфигураций электрических сетей 10 и 35 кВ, что подтвердило предпочтительность внедрения данного типа ТН с точки зрения повышения надёжности и безопасности эксплуатации электрических сетей.

Рассмотренные рекомендации внедрены в эксплуатацию в условиях электрических сетей АК «Харьковоблэнерго».

#### **Выводы.**

1. Экспериментальным путём обоснованы аналитически полученные результаты расчётов границ областей возможного возникновения затухающего и незатухающего ФРП.

2. Экспериментальным путём подтверждена возможность использования организационных мероприятий, не требующих капитальных вложений, направленных на снижение повреждаемости ТН, а именно:

- мероприятий, направленных на учёт при разработке схем нормальных режимов электрических сетей условий, при которых возможно возникновение ФРП;
- мероприятий, направленных на учёт при различных ремонтных схемах возможности возникновения при них ФРП с целью их исключения или использования для защиты ТН дополнительных мероприятий.

3. Экспериментальным путём обоснована предпочтительность использования ТН типа НТН с точки зрения повышения надёжности и безопасности эксплуатации электрических сетей.

4. Рассмотренные рекомендации внедрены в эксплуатацию в условиях электрических сетей АК «Харьковоблэнерго».

#### **Литература**

[1] Ганус А.И., Старков К.А. Повреждаемость трансформаторов напряжения в областных электрических сетях АК «Харьковоблэнерго» и мероприятия по её снижению // Світлотехніка та електроенергетика. – 2003. - № 1. с. 75-81.

[2] Правила устройства электроустановок / Минэнерго СССР, п. 4.2.172. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 648 с.: ил.

[3] Нугер Б.К. Повышение надёжности и качества электроснабжения сельского хозяйства. – К.: «Знание», 1985. – 14 с.

[4] А.С. № 1704216 (СССР) Устройство для защиты от перенапряжений в трёхфазной сети с изолированной нейтралью измерительного трансформатора напряжения / Рыбальченко Ю.Я., Михайлов А.М., Холмский Д.В. Оpubл.бюл. №1, 1992.

[5] Пат. 17170А України. Пристрій захисту трансформатору напруги від пошкоджень при ферорезонансних процесах у мережах з ізольованою нейтраллю / Журахівський А.В., Кенс Ю.А., Варецький Ю.О. та ін. Оpubл.бюл. 1995.

[6] Пат. 19575А України. Нерезонуючий трансформатор напруги / Журахівський А.В., Кенс Ю.А., Романишин В.В. Оpubл.бюл. №6, 1997.

[7] Говоров Ф.П., Ганус А.И., Старков К.А. Определение границ области возможного возникновения феррорезонансного процесса в электрических сетях 6(10)-35 кВ с трансформаторами напряжения // Технічна електродинаміка: зб.наук.пр. Тематичний випуск “Проблеми сучасної електротехніки”, частина 6. - Київ: ІЕД НАН України. – 2006. – с. 26-31.



ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ МЕЖ ОБЛАСТЕЙ МОЖЛИВИХ  
ЗАГАСАЮЧОГО Й НЕЗАГАСАЮЧОГО ФЕРРОРЕЗОНАНСНИХ ПРОЦЕСІВ У  
ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ З ІЗОЛЬОВАНОЮ НЕЙТРАЛЛЮ З  
ТРАНСФОРМАТОРАМИ НАПРУГИ

О.І. Ганус

*Розглянуті організаційні заходи, що дозволяють виключити можливість появи феррорезонансних процесів у електричних мережах з ізольованою нейтраллю. Наведені результати експериментальних досліджень у діючих електричних мережах, що дозволили обґрунтувати аналітично отримані результати розрахунків меж областей можливого виникнення загасаючого й незагасаючого ФРП. Експериментальним шляхом обґрунтована перевага використання ТН типу НТН з погляду підвищення надійності й безпеки експлуатації електричних мереж. Розглянуті рекомендації впроваджені в експлуатацію в умовах електричних мереж АК «Харківобленерго».*

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE DOMAIN BOUNDARIES OF THE  
POSSIBLE DAMPING AND PERSISTENT FERRORESONANCE PROCESSES IN THE  
ELECTRIC NETWORKS WITH THE INSULATED NEUTRAL WITH THE VOLTAGE  
TRANSFORMERS

O.I.Ganus

*The organizational arrangements enabling to exclude a possibility of availability of ferroresonance processes in the electrical networks with the insulated neutral are considered. The results of experimental surveys in the operating electrical networks are given, which allowed to substantiate the analytically obtained results of the calculations of domain boundaries of the possible damping and persistent ferroresonance processes. Experimentally the preferability of the NTN voltage transformers use is proved in the view of reliability improvement and operational safety of the electrical networks. The examined recommendations are implemented under the conditions of JSC Kharkivoblenergo electrical networks.*