

УДК 621.311

Александр Николаевич Антонов

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, e-mail: alex.antonov.embox@gmail.com

Владимир Дмитриевич Лебедев

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, e-mail: vd_lebedev@mail.ru

Разработка устройства для предотвращения феррорезонансных явлений в сетях 6–10 кВ, работающих с изолированной нейтралью

Авторское резюме

Состояние вопроса. Одним из опасных режимов, характерных для сетей, работающих с изолированной нейтралью, является протекание феррорезонанса. Для предотвращения развития такого рода процессов различными производителями разработано множество способов, при этом, ввиду наличия у каждого из решений ряда присущих им недостатков, остается актуальным вопрос о выборе конкретного решения в каждом отдельном случае. Следовательно, существует потребность в разработке устройства, применение которого стало бы универсальной и доступной мерой по предотвращению феррорезонансных явлений в сетях, работающих с изолированной нейтралью.

Материалы и методы. Исследование проведено с использованием метода физического моделирования на базе стенда работы сетей 6–10 кВ.

Результаты. Исследованы преимущества и недостатки существующих решений по предотвращению развития феррорезонансов в сетях с изолированной нейтралью. Исследовано устройство для предотвращения феррорезонансных явлений в сетях 6–10 кВ, разработанное по заказу ООО «НТЗ «Волхов». Получены экспериментальные осциллограммы, подтверждающие эффективность применения предложенного решения.

Выводы. Представленное устройство позволяет эффективно предотвращать протекание феррорезонанса в сетях 6–10 кВ, работающих с изолированной нейтралью. В предложенном решении устранен ряд недостатков, характерных для существующих на сегодняшний день аналогов.

Ключевые слова: феррорезонанс, сети с изолированной нейтралью, антирезонансное устройство, однофазное замыкание на землю, моделирование сети с изолированной нейтралью, трансформатор напряжения, физическое моделирование

Aleksandr Nikolaevich Antonov

Ivanovo State Power Engineering University, Post-graduate Student of Automatic Control of Electric Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: alex.antonov.embox@gmail.com

Vladimir Dmitrievich Lebedev

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Automatic Control of Electric Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: vd_lebedev@mail.ru

Development of a device to prevent ferroresonance phenomena in 6–10 kV isolated-neutral networks

Abstract

Background. Occurrence of ferroresonance is one of the dangerous mode characteristics of isolated-neutral networks. Various manufacturers have developed numerous methods to prevent this type of process, but the choice of a specific solution in each individual case remains a pressing issue due to the inherent drawbacks of each solution. Consequently, there is a need to develop a device that is considered as a universal and affordable measure to prevent ferroresonance phenomena in isolated-neutral networks.

Materials and methods. The study has been conducted using the physical modeling method based on a test-bed for modeling the operation a 6–10 kV network.

Results. The advantages and disadvantages of existing solutions to prevent the development of ferroresonances in isolated-neutral networks have been investigated. The device to prevent ferroresonance phenomena in 6–10 kV networks developed under order of NTZ Volkhov LLC, has been studied. Experimental oscillograms have been obtained confirming the effectiveness of the proposed solution.

Conclusions. Proposed device makes it possible to effectively prevent flow of ferroresonance in 6–10 kV isolated-neutral networks. In the proposed solution, a number of drawbacks characteristic of currently existing analogues have been eliminated.

Key words: ferroresonance, isolated-neutral networks, antiresonance device, single-phase ground fault, isolated neutral network modeling, voltage transformer, physical modeling

DOI: 10.17588/2072-2672.2026.4.049-057

Введение. Среди явлений, оказывающих негативное влияние на работу оборудования в сетях с изолированной нейтралью, особое место занимают феррорезонансные явления. Характерными признаками протекания феррорезонансных явлений в сетях с изолированной нейтралью является продолжительное воздействие перенапряжений и сверхтоков на первичную обмотку трансформаторов напряжения (ТН). Это приводит к повреждению ТН и необходимости их последующей замены.

Данная проблема актуальна не только для сетей РФ, но и для сетей ряда стран Европы, таких как Испания и Польша [1–4]. Актуальность проблемы подтверждается отчетом Technical Brochure 569 – Resonance and Ferroresonance in Power Networks, подготовленным рабочей группой СИГРЭ WG C4.307 [5]. Среди отечественных ученых, внесших существенный вклад в исследование данного явления, можно выделить таких, как М.Х. Зихерман, Л.Е. Дударев, И.В. Волошек Л.С., Борисенко, К.П. Кадомская, О.И. Лаптев, Д.А. Матвеев и др. [6–11].

Принципиальная схема, отражающая доминирующие эффекты при возникновении феррорезонанса при однофазном замыкании на землю перемежающегося характера, представлена на рис. 1.

Исследование работы ТН в переходных режимах может быть выполнено расчетным методом путем решения системы уравнений:

$$\begin{cases} \frac{d\Psi_A(i)}{dt} = -u_{C_A}(t) - i_{L_A}(t) R_{T_A}, \\ \frac{d\Psi_B(i)}{dt} = -u_{C_B}(t) - i_{L_B}(t) R_{T_B}, \\ \frac{d\Psi_C(i)}{dt} = -u_{C_C}(t) - i_{L_C}(t) R_{T_C}, \\ \frac{di_A}{dt} - \frac{di_B}{dt} = \frac{e_A(t) - e_B(t) - i_A(t) R_{\text{И}}}{L_{\text{И}}} + \\ + \frac{i_B(t) R_{\text{И}} + u_{C_A}(t) - u_{C_B}(t)}{L_{\text{И}}}, \\ \frac{di_B}{dt} - \frac{di_C}{dt} = \frac{e_B(t) - e_C(t) - i_B(t) R_{\text{И}}}{L_{\text{И}}} + \\ + \frac{i_C(t) R_{\text{И}} + u_{C_B}(t) - u_{C_C}(t)}{L_{\text{И}}}, \\ \frac{du_{C_A}}{dt} = \frac{i_{L_A}(t) - i_A(t)}{C_{\Phi}}, \\ \frac{du_{C_B}}{dt} = \frac{i_{L_B}(t) - i_B(t)}{C_{\Phi}}, \\ \frac{du_{C_C}}{dt} = \frac{i_{L_C}(t) - i_C(t)}{C_{\Phi}}, \\ 0 = i_A(t) + i_B(t) + i_C(t), \end{cases}$$

либо экспериментально на физической модели. Оба метода взаимно дополняют друг друга и позволяют осуществлять верификацию результатов математических и физических экспериментов.

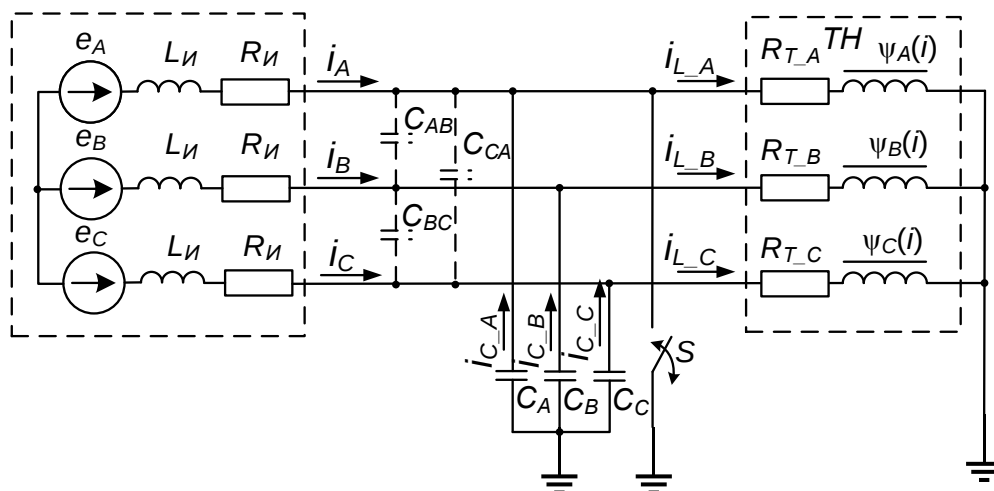


Рис. 1. Упрощенная схема сети с ТН при периодических однофазных замыканиях на землю: e_A, e_B, e_C – трехфазная ЭДС; $L_{\text{И}}, R_{\text{И}}$ – индуктивности и сопротивления эквивалентного источника; C_A, C_B, C_C – емкости фазных проводов на землю; C_{AB}, C_{BC}, C_{CA} – междуфазные емкости; $R_{T_A}, R_{T_B}, R_{T_C}$ – эквивалентные сопротивления активных потерь энергии в ТН; Ψ_A, Ψ_B, Ψ_C – нелинейные зависимости потокоцеплений от тока первичных обмоток ТН; S – ключ, моделирующий перемежающуюся дугу однофазного замыкания на землю

Проблема выбора мероприятий по предотвращению феррорезонансных явлений в сетях с изолированной нейтралью на сегодняшний день остается актуальной. Продолжается разработка множества новых способов борьбы с феррорезонансами, что позволяет считать, что оптимальное решение для предупреждения возникновения таких процессов еще не найдено.

Рассматривая данный вопрос с точки зрения нормативно-правовых актов и опыта эксплуатации сетей в России, следует обратиться к положениям, зафиксированным в СТО 56947007-29.240.10.191-2014 «Методические указания по защите от резонансных повышений напряжения в электроустановках 6–750 кВ» [12]. На основании данного стандарта была составлена сводная таблица, которая включает в себя мероприятия по предотвращению феррорезонансных явлений в сетях с изолированной нейтралью [13]. Анализ представленной таблицы показывает, что основными способами борьбы с феррорезонансными процессами являются использование ТН с антирезонансной конструкцией либо установка резистора в разомкнутый треугольник дополнительной обмотки ТН.

Также в [13] выделен ряд мер, называемых аппаратными, в том числе: заземление нейтрали сети через высокоомный резистор с сопротивлением больше емкостного сопротивления сети и заземление нейтрали сети через ДГР при величине емкостного тока замыкания на землю 10 А и более.

В зарубежной практике, прежде всего в энергосетях Польши и Испании, также считается обоснованным применение специальных демпфирующих феррорезонансные явления устройств [14], подключаемых к выводам разомкнутого треугольника дополнительной обмотки ТН. В [15] предлагаются сетевые мероприятия, включающие определенный алгоритм коммутаций.

Рассмотрим основные преимущества и недостатки упомянутых выше мероприятий по предотвращению феррорезонанса.

Характерными для антирезонансных ТН особенностями являются трехфазная конструкция магнитопровода, сниженная величина рабочей индукции (по сравнению с группой однофазных ТН), а также применение короткозамкнутой вторичной обмотки и трансформатора нулевой последовательности (ТНП), обладающего существенным реактивным сопротивлением. Благодаря таким характеристикам удается избежать насыщения магнитопровода ТН и, следовательно, возникновения феррорезонансных явлений. Однако, несмотря на вышеперечисленные преимущества применения антирезонансных электромагнитных ТН, существуют и недостатки. Данный способ требует замены значительной части ТН в сетях 6–35 кВ, работающих с изолированной нейтралью. Стоимость таких ТН выше, чем традиционных

[16], поэтому проведение такого рода мероприятий должно осуществляться только в тех сетях, где это дает экономический эффект за счет снижения повреждаемости.

Также некоторые производители электромагнитных ТН пытаются обеспечить их антирезонансные свойства путем включения в нейтраль первичной обмотки дополнительного активного сопротивления величиной 800–1000 Ом в целях увеличения рассеивания энергии при протекании феррорезонансных явлений и демпфирования колебаний. Пример схемы соединения обмоток трехфазной антирезонансной группы ТН типа ЗНОЛ.06 приведен на рис. 2. Однако данный подход не позволяет полностью устранить вероятность возникновения устойчивого феррорезонанса.

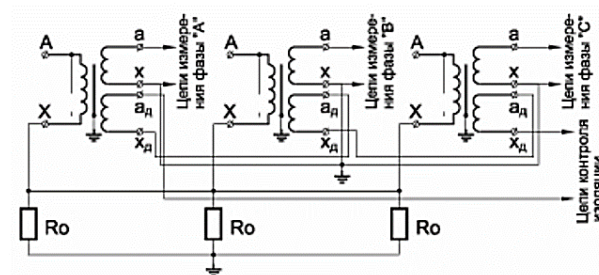


Рис. 2. Схема соединения обмоток трехфазной антирезонансной группы ТН типа ЗНОЛ.06

В [17] доказана возможность возникновения устойчивого феррорезонанса при применении вышеописанного способа борьбы с феррорезонансными явлениями. В качестве возможного решения рассматривается увеличение активного сопротивления в нейтрали до 4–7 кОм, однако отмечается, что это недопустимо по условию изоляции заземляемого вывода обмотки ТН (ТН типа ЗНОЛ). Включение дополнительных активных сопротивлений величиной 12–21 кОм последовательно с обмотками ВН, по мнению автора [17], также считается противоречивой мерой, так как это отрицательно скажется на метрологических характеристиках ТН.

Другим подходом к решению данной проблемы является изменение режима заземления нейтрали сети на резонансно-компенсированный или резистивный. Принцип действия такого решения заключается в ограничении кратности перенапряжений на электрооборудовании. Тем не менее у этого способа существуют недостатки. Так, авторы [18] отмечают, что в случае резистивного заземления нейтрали возрастает величина тока в месте однофазного замыкания на землю, а также возникает необходимость в использовании резисторов с высокой мощностью рассеивания (вплоть до нескольких кВт). К недостаткам заземления нейтрали через ДГР авторы относят возможность возникновения дуговых пере-

напряжений при значительной расстройке компенсации, высокую стоимость и сложность устройств автоматической постройки ДГР, сложности при выявлении поврежденных присоединений и обеспечении правильной работы устройств релейной защиты от ОЗЗ.

Также представляет интерес зарубежный опыт проведения сетевых мероприятий по предотвращению феррорезонансных явлений в сетях среднего напряжения с изолированной нейтралью. В [15] приводится разработанный для энергосетей Испании алгоритм сетевых переключений, состоящий из следующих последовательных этапов.

1. Прекратить параллельную работу шин, если таковая имеет место, для изолирования источника феррорезонанса в сети и предотвращения ложных отключений в неповрежденной части сети.

2. Отключить выключатели всех присоединений, на которых установлены ТН без защиты от феррорезонанса.

3. Отключить выключатели слаботокопроводящих линий и линий с большой емкостью.

4. Отключить выключатели всех линий, связанных с распределенной генерацией, для прекращения подпитки феррорезонанса.

5. Отключить все выключатели на подстанции.

По мнению авторов, данный алгоритм сводит к минимуму негативное воздействие феррорезонансных явлений за минимально возможное время, предотвращая ложные отключения. Однако представленный алгоритм подразумевает соответствующую подготовку диспетчеров и оперативного персонала, что займет продолжительное время. Существенным недостатком такого алгоритма является и возможность погашения подстанции, что негативным образом сказывается на надежности электроснабжения потребителей.

Другой способ борьбы с феррорезонансом, получивший широкое распространение в европейских странах, заключается в применении специальных устройств для предотвращения феррорезонансных явлений. Общим для таких устройств является подключение к выводам дополнительной вторичной обмотки ТН, соединенной по схеме разомкнутого треугольника.

Идея об использовании дополнительной вторичной обмотки ТН для предотвращения феррорезонансных явлений первоначально предполагала подключение к ее выводам резистора на постоянной основе в целях увеличения рассеивания энергии. Была выбрана величина активного сопротивления ≈ 25 Ом, при которой в дополнительной вторичной обмотке ТН, соединенной по схеме разомкнутого треугольника, при напряжении 100 В будет протекать ток 4 А, а на резисторе будет рассеиваться мощность 400 Вт.

В [19] отмечена ограниченная эффективность такого способа предотвращения феррорезонансных явлений. Утверждается, что на основании опыта эксплуатации такая мера не устраивает сетевые компании. Кроме того, для описанного способа требуется дополнительное увеличение мощности ТН по сравнению с той небольшой мощностью, которая требуется для современных микропроцессорных устройств защиты, измерения и учета электроэнергии.

Следующим этапом в развитии способов демпфирования феррорезонансных колебаний стала разработка специализированных устройств производителями электротехнического оборудования из европейских стран, Турции, Китая и России.

Эффективным способом демпфирования феррорезонансных колебаний является временное включение резистора в дополнительную вторичную обмотку ТН, соединенную по схеме разомкнутого треугольника, ввиду чего становится возможным снижение величины активного сопротивления, что положительно сказывается на эффективности борьбы с феррорезонансом [14]. В таких устройствах активное сопротивление коммутируется в случае преодоления значением утроенного напряжения нулевой последовательности заданной пороговой величины с определенной выдержкой времени. Однако авторы [14] обнаружили недостаток, заключающийся в ограниченной работе устройств при превышении определенной длительности замыкания на землю.

Тем не менее наиболее перспективной мерой по предотвращению феррорезонансных явлений на данный момент является применение специальных защитных устройств. Стоимость таких решений в значительной степени ниже, чем у обозначенных выше способов, что способствует их широкому внедрению. Данное утверждение относится к устройствам, коммутирующим активное сопротивление в цепи дополнительных вторичных обмоток ТН, соединенных по схеме разомкнутого треугольника. Тем не менее требуется усовершенствование имеющихся алгоритмов работы таких устройств в целях повышения эффективности предотвращения возникновения потенциальных феррорезонансных явлений.

Методы исследования. Настоящее исследование проведено с использованием метода физического моделирования. Все необходимые эксперименты проводились на стенде физического моделирования сетей 6–10 кВ на базе научно-образовательного центра «Высоковольтные измерительные преобразователи и трансформаторы» (НОЦ ВИПТ) ИГЭУ.

Испытательная установка (рис. 3), моделирующая сеть (см. рис. 1), ее компоненты и

спектр возможных моделируемых режимов, подробно описана в [20, 21]. Чтобы оценить эффективность устройства для предотвращения феррорезонанса, авторы использовали группу однофазных трансформаторов напряжения (ТН) типа 3хЗНОЛ-НТЗ-10 при моделировании дуговых однофазных замыканий на землю. Для создания режима с возникновением дуговых перемежающихся замыканий на землю использовался разрядник с поворотным контактом. В нормальном режиме в высоковольтной части линейное напряжение поддерживалось на уровне 12 кВ (максимальное рабочее напряжение для ТН класса напряжения 10 кВ по ГОСТ 29322–2014 (IEC 60038:2009)).

В целом результаты экспериментов получены при натурно-макетном моделировании на физической установке, имеющей удовлетворительные основные инварианты подобия, к которым относятся: сам объект исследования (ТН); параметры элементов схемы; условия проведения эксперимента, включая условия формирования дуги однофазного замыкания в соответствии с теорией подобия и моделирования [22]. Адекватность полученных в ходе физического эксперимента результатов проверялась и доказывалась их верификацией с расчетными данными, полученными на имитационных математических моделях, составленных в программном комплексе Matlab+Simulink.



Рис. 3. Лабораторная испытательная установка

Результаты исследования. Результатом исследования является предложенный вариант устройства по предотвращению феррорезонансных явлений [23], эффективность применения которого подтверждается экспериментальными осциллограммами режимных параметров при протекании феррорезонанса.

Функциональная схема устройства и способ его подключения показаны на рис. 4. Подключение производится к выводам дополнительных вторичных обмоток группы однофазных ТН, соединенных по схеме разомкнутого треугольника. Демпфирование феррорезонансных колебаний достигается за счет временного снижения величины сопротивления нагрузки с десятков кОм до единиц Ом. Прерывистый характер включения обеспечивается посредством применения терморезисторов с прямым температурным коэффициентом (термистором РТС). Также устранена проблема отказа срабатывания прибора при более длительных прерывистых замыканиях на землю путем внедрения канала обратной связи по температуре на термисторах РТС. Данное решение позволяет отключать устройство при перегреве термисторов для снижения их температуры, после чего схема в автоматическом режиме вводится в работу. Таким образом, указанный алгоритм позволяет увеличить продолжительность времени эффективной работы устройства, что позитивным образом сказывается на предотвращении феррорезонансных явлений.

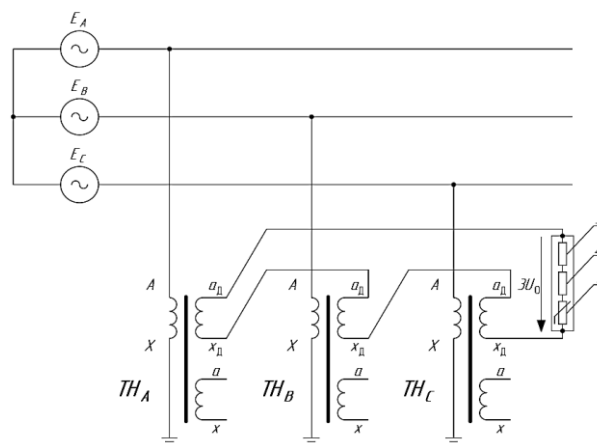
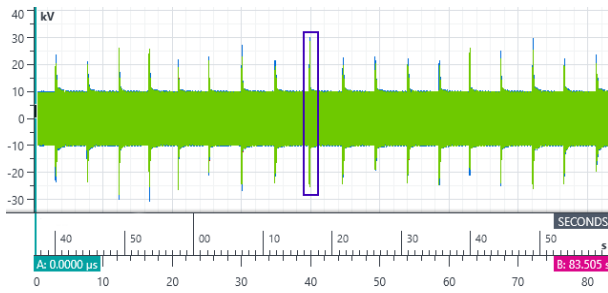
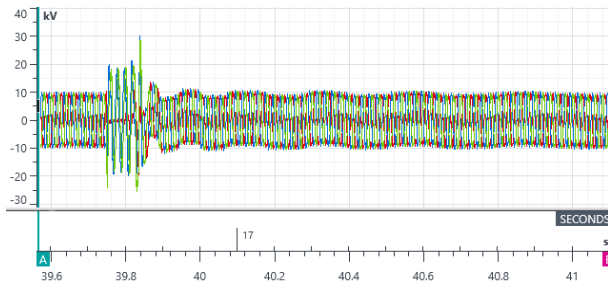


Рис. 4. Функциональная схема предлагаемого устройства и способ его подключения к сети: 1 – термистор РТС; 2 – группа резисторов; 3 – блок управления

Для подтверждения эффективности демпфирования феррорезонансных колебаний была проведена серия опытов, заключающаяся в моделировании кратковременного протекания однофазных дуговых замыканий на землю. Эксперименты проводились для группы однофазных ТН 3хЗНОЛ-НТЗ-10 при суммарной емкости сети на землю 1,43 мкФ, так как для данных параметров характерно протекание устойчивых феррорезонансных явлений [21]. Количество последовательных зажигания дуги – 18, интервал между зажиганиями – $5 \pm 0,5$ с. Осциллограммы режимных параметров показаны на рис. 5–7.

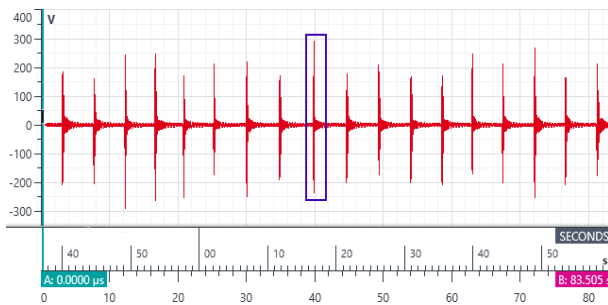


а)

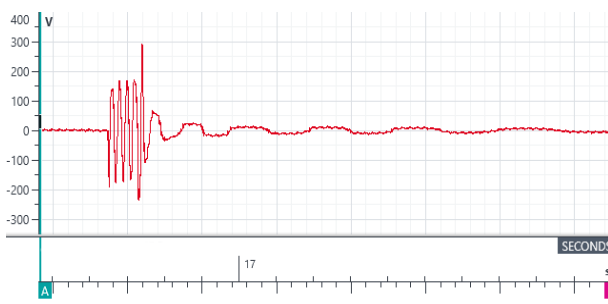


б)

Рис. 5. Осциллограммы фазных напряжений на первичных обмотках ТН: а – в течение всего опыта; б – масштабированный участок горения дуги и гашения колебаний

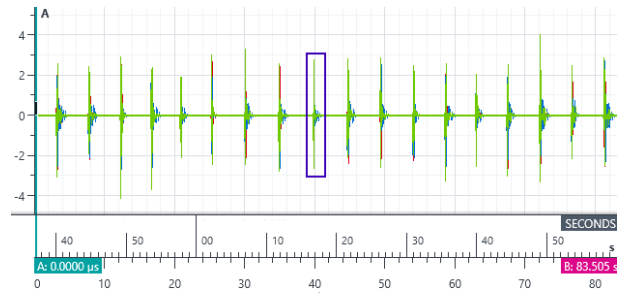


а)



б)

Рис. 6. Осциллограммы напряжения ЗУО: а – в течение всего опыта; б – масштабированный участок горения дуги и гашения колебаний



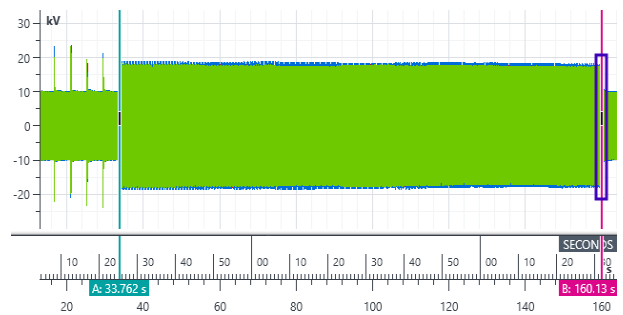
а)



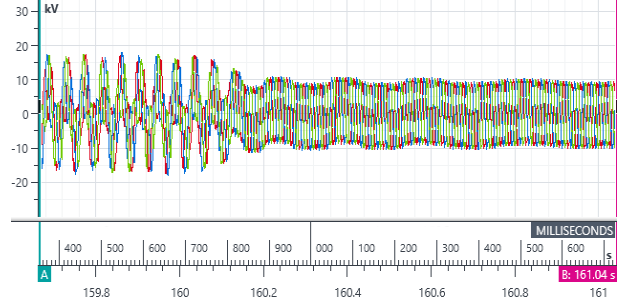
б)

Рис. 7. Осциллограммы мгновенных значений токов в первичных обмотках ТН: а – в течение всего опыта; б – масштабированный участок горения дуги и гашения колебаний

Также была смоделирована ситуация, при которой произойдет перегрев термистора РТС и задействование алгоритма последующего включения схемы. Осциллограммы фазных напряжений на первичных обмотках ТН и напряжения ЗУО показаны на рис. 8–9.



а)



б)

Рис. 8. Осциллограммы фазных напряжений на первичных обмотках ТН при задействовании алгоритма восстановления работоспособности устройства при перегреве: а – в течение всего опыта; б – масштабированный участок повторного включения и гашения устойчивого феррорезонанса

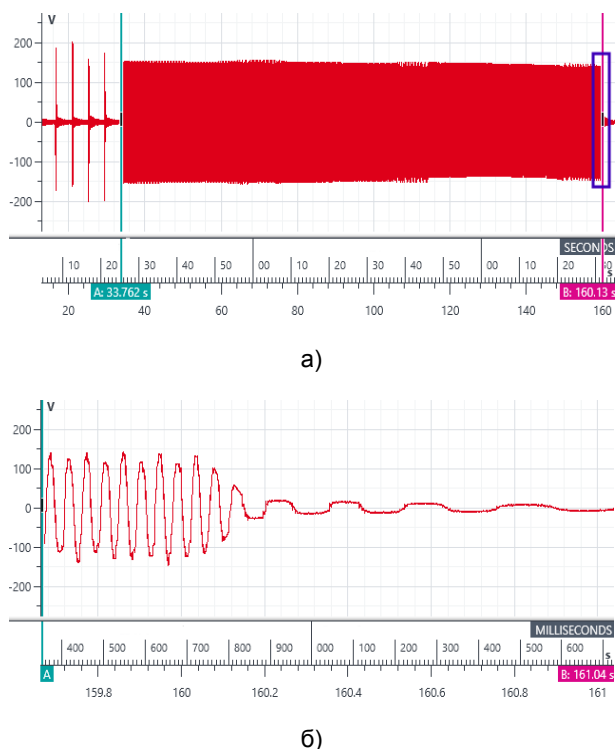


Рис. 9. Осциллограммы напряжения $3U_0$ при задействовании алгоритма восстановления работоспособности устройства при перегреве: а – в течение всего опыта; б – масштабированный участок повторного включения и гашения устойчивого феррорезонанса

Таким образом, в рамках настоящего исследования был предложен алгоритм работы и прототип устройства для предотвращения феррорезонансных явлений в сетях с изолированной нейтралью [22], эффективность работы которого подтверждена экспериментальными осциллограммами режимных параметров при протекании устойчивого феррорезонанса. Среди преимуществ данного решения по сравнению с существующими средствами борьбы с феррорезонансными явлениями можно выделить следующие:

- 1) способность гашения феррорезонанса при доаварийных режимах в сети, сопровождающихся максимальным рабочим напряжением;
- 2) гашение феррорезонансных процессов на всех видах частот (гармонических и субгармонических);
- 3) устройство быстродействующее и реагирует на смещение нейтрали при напряжении на разомкнутом треугольнике начиная с 25 В;
- 4) малое сопротивление устройства при срабатывании обеспечивает быстрое затухание переходного процесса в контуре нулевой последовательности, а также предотвращает накопление энергии, размагничивая магнитную систему группы трансформаторов, снижая риск повторного развития феррорезонансного процесса;
- 5) дискретная обратная связь по температуре термистора позволяет снизить вероятность повреждения трансформатора при перемежаю-

щемся характере замыкания на землю с многократно-повторяющимися пробоями;

б) дешевое решение, позволяющее оснастить потенциально резонирующие трансформаторы класса 6(10) кВ, находящиеся в эксплуатации.

Среди недостатков данного решения можно выделить следующие:

1) при циклических замыканиях на землю в интервале времени с момента нагрева термистора РТС до повторного автоматического включения защитного устройства ТН кратковременно функционирует без защиты, что допускает развитие феррорезонанса (последующая активация прибора обеспечивает ликвидацию феррорезонансного процесса и предотвращает повреждение трансформатора);

2) кратковременное превышение номинальной нагрузки в цепи разомкнутого треугольника может увеличить погрешность измерения.

Таким образом, представленное устройство для предотвращения феррорезонанса в цепях с ТН классов напряжения 6–35 кВ, эффективность которого доказана методом физического моделирования, является технически более совершенным.

Список литературы

1. **Ferroresonant** configurations in power systems / V. Valverde, G. Buigues, A.J. Mazón, et al. // *Renew. Energy Power Qual. J.* – 2012. – Vol. 10, No. 4. – P. 474–479. DOI: 10.24084/repqj10.351.
2. **Araujo A.E.A., Soudack A.C., Marti J.R.** Ferroresonance in power systems: chaotic behaviour // *IEE Proceedings-c.* – May 1993. – Vol. 140. – P. 237–240. DOI: 10.1049/ip-c.1993.0035.
3. **Ferroresonance** in voltage transformers: Analysis and simulations / V. Valverde, A.J. Mazón, I. Zamora, G. Buigues // *Renew. Energy Power Qual. J.* – 2007. – Vol. 1, No. 5. – P. 465–471. DOI: 10.24084/repqj05.317.
4. **Mitigating** ferroresonance in voltage transformers in ungrounded MV networks / W. Piasecki, M. Florkowski, M. Fulczyk, et al. // *IEEE Transactions on Power Delivery.* – October 2007. – Vol. 22, No. 4. – P. 2362–2369. DOI: 10.1109/TPWRD.2007.905383.
5. **CIGRE WG C4.307 Technical Brochure 569** – Resonance and Ferroresonance in Power Networks. – February 2014.
6. **Зихерман М.Х.** Трансформаторы напряжения для сетей 6–10 кВ. Причины повреждаемости // *Новости электротехники.* – 2003. – № 1(25).
7. **Борисенко Л.С., Панасюк Д.И., Стреляев П.И.** Предотвращение повреждений трансформаторов напряжения контроля изоляции 35 кВ при замыканиях на землю // *Энергетик.* – 1983. – № 9. – С. 21–23.
8. **Дударев Л.Е., Волошек И.В., Левковский А.И.** Численный анализ феррорезонансных процессов в сетях с изолированной нейтралью // *Электрические станции.* – 1991. – № 1. – С. 66–71.
9. **Петров О.А.** Смещение нейтрали при пофазных отключениях и обрывах фаз в компенсированной сети // *Электрические станции.* – 1972. – № 9. – С. 57–61.

10. Кадомская К.П., Лаптев О.И. Исследование эффективности антирезонансных трансформаторов напряжения типа НАМИ в сетях 6–35 кВ с изолированной нейтралью // Научный вестник НГТУ. – 2006. – № 4(25). – С.167–175.

11. Матвеев Д.А. О технических требованиях к антирезонансным трансформаторам напряжения и их стандартизации // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2023. – № 1(76). – С. 114–115.

12. **СТО 56947007-29.240.10.191-2014** Методические указания по защите от резонансных повышений напряжения в электроустановках 6–750 кВ: утвержден и введен в действие: приказом ОАО «ФСК ЕЭС» от 19.11.2014 № 522.

13. Косарев Б.А. Феррорезонансные перенапряжения в электроустановках 6–220 кВ: теория и результаты экспериментальных исследований // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2022. – № 3–4. – С. 45–55. DOI: 10.17122/1999-5458-2022-18-3-4-45-55.

14. Analysis of ferroresonance mitigation effectiveness in auxiliary power systems of high-voltage substations / R. Tarko, W. Nowak, J. Gajdzica, S. Czapp // *Energies*. – 2024. – Vol. 17, No. 10(2423). DOI: 10.3390/en17102423.

15. Ferroresonance phenomena in medium-voltage isolated neutral grids: a case study / R. Martínez, M. Manana, J.I. Rodríguez, et. al. // *IET Renew. Power Gener.* – 2019. – Vol. 13, Issue 1. – P. 209–214. DOI: 10.1049/iet-rpg.2018.5231.

16. Зихерман М.Х. Антирезонансные трансформаторы напряжения. Технические требования и методы испытаний // Новости электротехники. – 2011. – № 2(68).

17. Лаптев О.И. Об эффективности применения современных антирезонансных трансформаторов напряжения в сетях 6–35 кВ // Ограничение перенапряжений. Режимы заземления нейтрали. Электрооборудование сетей 6–35 кВ: материалы Всерос. конф., Новосибирск, 16–18 сентября 2008 г. – Новосибирск: Изд-во Новосибирского государственного технического университета, 2008.

18. Обзор режимов заземления нейтрали в электрических сетях 6–35 кВ / В.А. Бурчевский, Л.В. Владимир, В.А. Ощепков, В.И. Суриков // ОНВ. – 2009. – № 1(77). – С. 122–126.

19. Фишман В.С. Трансформаторы напряжения. Способы устранения феррорезонансных явлений // Новости Электротехники. – 2010. – № 6(66).

20. Antonov A.N., Lebedev V.D. Development of the Experimental Set-Up for Testing MV Voltage Transformers Resistance to Ferroresonance // 2025 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – Sochi, 2025. – P. 821–825. DOI: 10.1109/ICIEAM65163.2025.11028571.

21. Антонов А.Н., Лебедев В.Д. Исследование феррорезонансных явлений в электромагнитных трансформаторах напряжения сетей 6–10 кВ при воздействии дуговых перемежающихся однофазных замыканий на землю // Вестник ИГЭУ. – 2025. – Вып. 6. – С. 51–57. DOI: 10.17588/2072-2672.2025.6.051-057.

22. Веников В.А. Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики). – 2-е изд., доп. и перераб. – М.: Высш. шк., 1976. – 479 с.

23. Устройство защиты трансформатора от феррорезонансных явлений: заявка № 2026106829 РФ / ООО «НТЗ «Волхов»; заявл. 13.03.2026.

References

1. Valverde, V., Buigues, G., Mazón, A.J., Zamora, I., Albizu, I. Ferroresonant Configurations in Power Systems. *Renew. Energy Power Qual. J.*, 2012, vol. 10, no. 4, pp. 474–479. DOI: 10.24084/repqj10.351.

2. Araujo, A.E.A., Soudack, A.C., Marti, J.R. Ferroresonance in power systems: chaotic behaviour. *IEE Proceedings-c*, May 1993, vol. 140, pp. 237–240. DOI: 10.1049/ip-c.1993.0035.

3. Valverde, V., Mazón, A.J., Zamora, I., Buigues, G. Ferroresonance in voltage transformers: Analysis and simulations. *Renew. Energy Power Qual. J.*, 2007, vol. 1, no. 5, pp. 465–471. DOI: 10.24084/repqj05.317.

4. Piasecki, W., Florkowski, M., Fulczyk, M., Mahonen, P., Nowak, W. Mitigating Ferroresonance in Voltage Transformers in Ungrounded MV Networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*, October 2007, vol. 22, no. 4, pp. 2362–2369. DOI: 10.1109/TPWRD.2007.905383.

5. CIGRE WG C4.307 Technical Brochure 569 – Resonance and Ferroresonance in Power Networks. February 2014.

6. Zikherman, M.Kh. Transformatory napryazheniya dlya setey 6–10 kV. Prichiny povrezhdaemosti [Voltage transformers for 6–10 kV networks. The causes of damageability]. *Novosti elektrotehniki*, 2003, no. 1(25).

7. Borisenko, L.S., Panasyuk, D.I., Strelyaev, P.I. Predotvrashchenie povrezhdeniy transformatorov napryazheniya kontrolya izolyatsii 35 kV pri zamykaniyakh na zemlyu [Prevention of damage to 35 kV insulation control voltage transformers in case of earth faults]. *Energetik*, 1983, no. 9, pp. 21–23.

8. Dudarev, L.E., Voloshek, I.V., Levkovskiy, A.I. Chislennyy analiz ferrozonansnykh protsessov v setyakh s izolirovannoy neytral'yu [Numerical analysis of ferroresonance processes in isolated-neutral networks]. *Elektricheskie stantsii*, 1991, vol. 1, pp. 66–71.

9. Petrov, O.A. Smeshchenie neytrali pri pofaznykh otklyucheniyyakh i obryvakh faz v kompensirovannoy seti [Neutral displacement during phase disconnections and phase failures in compensated networks]. *Elektricheskie stantsii*, 1972, no. 9, pp. 57–61.

10. Kadomskaya, K.P., Laptev, O.I. Issledovanie effektivnosti antirezonsnykh transformatorov napryazheniya tipa NAMI v setyakh 6–35 kV s izolirovannoy neytral'yu [Efficiency study of anti-resonance voltage transformers of NAMI type in 6–35 kV systems with isolated neutral]. *Nauchnyy vestnik NGTU*, 2006, no. 4(25), pp.167–175.

11. Matveev, D.A. O tekhnicheskikh trebovaniyakh k antirezonsnym transformatoram napryazheniya i ikh standartizatsii [About technical requirements for anti-resonance voltage transformers and their standardization]. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie*, 2023, no. 1(76), pp. 114–115.

12. **СТО 56947007-29.240.10.191-2014**. Metodicheskie ukazaniya po zashchite ot rezonansnykh povysheniy napryazheniya v elektroustanovkakh 6–750 kV [Procedural Guidelines on Resonance Overvoltage Protection in 6–750 kV Electrical Installations]. ОАО ФСК ЕЭС, Moscow, 2014.

13. Kosarev, B.A. Ferrozonansnye perenapryazheniya v elektroustanovkakh 6–220 kV: teoriya i rezul'taty eksperimental'nykh issledovaniy [Ferroresonance overvoltages in electrical installations 6–220 kV: theory and results of experimental studies]. *Elektrotehnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy*, 2022, no. 3–4, pp. 45–55. DOI: 10.17122/1999-5458-2022-18-3-4-45-55.

14. Tarko, R., Nowak, W., Gajdzica, J., Czapp, S. Analysis of Ferroresonance Mitigation Effectiveness in Auxiliary Power Systems of High-Voltage Substations. *Energies*, 2024, vol. 17, no. 10, p. 2423.
15. Martínez, R., Mañana, M., Rodríguez, J.I., Álvarez, M., Mínguez, R., Arroyo, A., Bayona, E., Azcondo, F.J., Pigazo, A., Cuartas, F. Ferroresonance phenomena in medium-voltage isolated neutral grids: a case study. *IET Renewable Power Generation*, 2019, vol. 13, issue 1, pp. 209–214. DOI: 10.1049/iet-rpg.2018.5231.
16. Zikherman, M.Kh. Antirezonansnye transformatory napryazheniya. Tekhnicheskie trebovaniya i metody ispytaniy [Anti-resonance voltage transformers. Technical requirements and test methods]. *Novosti elektrotekhniki*, 2011, no. 2(68).
17. Laptev, O.I. Ob effektivnosti primeneniya sovremennykh antirezonansnykh transformatorov napryazheniya v setyakh 6–35 kV [On the efficiency of using modern anti-resonance voltage transformers in 6–35 kV networks]. *Materialy vserossiyskoy konferentsii «Ogranichenie perenapryazheniy. Rezhimy zazemleniya neytrali. Elektrooborudovanie setey 6–35 kV»*, Novosibirsk, 16–18 sentyabrya 2008 goda [Proceedings of All Russian conference “Surge Limitation. Neutral Grounding Modes. Electrical Equipment of 6–35 kV Networks”, Novosibirsk, September 16–18, 2008]. Novosibirsk: Izdatel'stvo Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2008.
18. Burchevskiy, V.A., Vladimirov, L.V., Oshchepkov, V.A., Surikov, V.I. Obzor rezhimov zazemleniya neytrali v elektricheskikh setyakh 6–35 kV [Overview of neutral grounding modes in electrical networks 6–35 kV]. *ONV*, 2009, no. 1(77), pp. 122–126.
19. Fishman, V.S. Transformatory napryazheniya. Sposoby ustraneniya ferrozonansnykh yavleniy [Voltage transformers. Ways to eliminate ferroresonance phenomena]. *Novosti elektrotekhniki*, 2010, no. 6(66).
20. Antonov, A.N., Lebedev, V.D. Development of the Experimental Set-Up for Testing MV Voltage Transformers Resistance to Ferroresonance. 2025 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Sochi, 2025, pp. 821–825. DOI: 10.1109/ICIEAM65163.2025.11028571.
21. Antonov, A.N., Lebedev, V.D. Issledovanie ferrozonansnykh yavleniy v elektromagnitnykh transformatorakh napryazheniya setey 6–10 kV pri vozdeystvii dugovykh peremezhayushchikhsya odnofaznykh zamykaniy na zemlyu [Study of ferroresonance phenomena in 6–10 kV electromagnetic voltage transformers when exposed to intermittent single-phase earth faults]. *Vestnik IGEU*, 2025, issue 6, pp. 51–57. DOI: 10.17588/2072-2672.2025.6.051-057.
22. Venikov, V.A. *Teoriya podobiya i modelirovaniya (primeritel'no k zadacham elektroenergetiki)* [Similarity and Modeling Theory (Applied to Electric Power Engineering Tasks)]. Moscow: Vysshaya shkola, 1976. 479 p.
23. NTZ Volkhov LLC. *Ustroystvo zashchity transformatora ot ferrozonansnykh yavleniy* [Device for transformer protection against ferroresonance phenomena]. Patent RF, no. 2026106829, 2026.