

Practical value. Theoretical researches and practical results allow us to get reliable data of efficiency of measures adopted. It allows us not only to ground expediency of the measures adopted but also get the reliable values of indices of networks efficiency which is necessary in actual operating conditions.

Keywords: *electric networks, reduced expenses, capital investments, exploitation costs, combination of economic and technical parameters*

*Рекомендовано до публікації докт. техн. наук
Ф.П. Шкрабцем. Дата надходження рукопису 08.11.13.*

УДК 631.314.222.8

**Ю.Л. Саенко, д-р техн. наук, проф.,
В.В. Нестерович, канд. техн. наук, доц.,
А.С. Попов, канд. техн. наук**

Государственное высшее учебное заведение „Приазовский
государственный технический университет“, г. Мариуполь,
Украина, e-mail: artempopov9@gmail.com

УСТРОЙСТВО ЗАЩИТЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ ОТ ФЕРРОРЕЗОНАНСНЫХ ПРОЦЕССОВ В СЕТЯХ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

**Yu.L. Sayenko, Dr. Sci. (Tech.), Professor,
V.V. Nesterovych, Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Prof.,
A.S. Popov, Cand. Sci. (Tech.)**

State Higher Educational Institution “Pryazovskyi State Technical
University”, Mariupol, Ukraine, e-mail: artempopov9@gmail.com

DEVICE FOR MEASURING VOLTAGE TRANSFORMERS PROTECTION FROM FERRORESONANCE PROCESSES IN NETWORK WITH ISOLATED NEUTRAL POINT

Цель. Анализ принципов работы известных устройств защиты от феррорезонанса в сетях с изолированной нейтралью. Выявление особенностей протекания феррорезонансных переходных процессов. Разработка алгоритма и устройства защиты измерительных трансформаторов напряжения от феррорезонансных процессов, проверка корректности и работоспособности предложенных решений.

Методика. Разработана математическая модель электрической сети с изолированной нейтралью. Смоделированы процессы феррорезонанса и однофазного дугового замыкания на землю. Используются методы физического моделирования при оценке работоспособности устройства защиты от феррорезонанса. Применены экспериментальные методы при определении параметров измерительных трансформаторов напряжения, необходимых для математического моделирования.

Результаты. Выполнен анализ принципов действия широко известных устройств защиты от феррорезонанса. Выявлено, что в режиме однофазного дугового замыкания на землю возможно ложное срабатывание устройств защиты от феррорезонанса. На основе математического моделирования переходных процессов получен диапазон частот, на которых развиваются феррорезонансные колебания. Предложен способ идентификации режима феррорезонанса, основанный на спектральном анализе напряжения Z_{u0} , а также способ распознавания однофазного дугового замыкания на землю, который основан на вычислении производной от напряжения Z_{u0} . Проверена корректность и работоспособность предложенных алгоритмов путем подачи тестовых сигналов на вход устройства защиты.

Научная новизна. Научно обоснован метод идентификации режима феррорезонанса в сетях с изолированной нейтралью, который от известных методов отличается способом фильтрации напряжения Z_{u0} (Фурье-анализ вместо режекторного фильтра), что позволяет более точно распознавать вид переходного процесса. Усовершенствован метод идентификации режима однофазного дугового замыкания на землю, который основан на вычислении производной от напряжения Z_{u0} и сравнении с уставкой, что позволяет предупредить ложные срабатывания защиты в режиме однофазного дугового замыкания на землю.

Практическая значимость. Создан алгоритм защиты измерительных трансформаторов напряжения от феррорезонансных процессов. На основании данного алгоритма разработано устройство защиты. Предложенные методы идентификации разновидностей переходных процессов могут быть использованы при организации защит от однофазных замыканий на землю в сетях с изолированной нейтралью.

Ключевые слова: *феррорезонанс, трансформатор напряжения, математическое моделирование, однофазное замыкание на землю, спектральный анализ, напряжение нулевой последовательности, режекторный фильтр*

Постановка проблемы. Одной из причин, приводящей к снижению надежности работы электриче-

ских сетей с изолированной нейтралью, является возникновение и существование феррорезонансных процессов (ФРП). Данные колебания развиваются между емкостью нулевой последовательности сети и

нелинейной индуктивностью трансформаторов напряжения контроля изоляции (ТНКИ). Следствием существования такого режима являются массовые повреждения ТНКИ, возникающие по причине токовой перегрузки обмоток высокого напряжения. По некоторым данным в Украине ежегодно повреждается порядка 10% ТНКИ, установленных в сетях с изолированной нейтралью [1]. Опасность существования режима феррорезонанса заключается не только в массовых повреждениях трансформаторов напряжения (ТН), но и в появлении перенапряжений, кратность которых может составлять $3U_{\phi}$ и выше [2].

Анализ последних исследований и публикаций.

В настоящее время известен ряд устройств, предназначенных для защиты ТНКИ от феррорезонанса. Среди наиболее популярных устройств можно выделить Smart Load и VT Guard фирмы ABB [3, 4], устройства семейства ПЗФ [5], устройства, состоящие из балластного резистора и LC-фильтра, который установлен последовательно с гасящим резистором и настроен на промышленную частоту [6]. Все вышеупомянутые устройства подключаются к обмотке разомкнутого треугольника. Проанализировав принцип действия данных устройств, можно выделить следующие их недостатки.

Устройство Smart Load имеет низкую чувствительность к субгармоническим ФРП, поскольку уставка срабатывания выбрана выше 100В, что необходимо для отстройки от режима однофазного замыкания на землю (ОЗЗ). В тоже время, при субгармонических колебаниях, напряжение $3U_0$, в большинстве случаев, не превышает 100В. В результате данная защита оказывается эффективной лишь при феррорезонансах, развивающихся на частотах 50Гц и выше, поскольку такие ФРП сопровождаются более высокими перенапряжениями, чем при субгармоническом феррорезонансе, и величина напряжения $3U_0$ оказывается существенно выше 100В.

В основу устройства VT Guard положено использование гасящего резистора, который установлен последовательно с термистором, имеющим положительный температурный коэффициент. Термистор установлен с целью предупредить перегрузку ТНКИ при длительных ОЗЗ. Согласно данным производителя, сопротивление термистора увеличивается до 200Ом через 5с после подачи на него напряжения. Уменьшение сопротивления до начального значения происходит в течение 2-х минут. Такое устройство оказывается эффективным лишь при кратковременной несимметрии, например, для случая кратковременного возникновения и самоустранения замыкания (клевка изоляции). В случае отключения длительного замыкания и возбуждения феррорезонанса устройство не сработает, поскольку термистор успеет увеличить свое сопротивление и будет блокировать гасящие свойства балластного резистора.

Существенный вклад в развитие и совершенствование устройств защиты от феррорезонанса в сетях среднего и высокого напряжения внесли сотрудники НУ „Львовская политехника“ во главе с докт. техн.

наук, проф. А.В. Жураховским. В основу работы устройства ПЗФ-5 положен цифровой режекторный фильтр, пропускающий все частоты, кроме промышленной [5]. При появлении непромышленных частот в спектре напряжения $3i_0$ происходит срабатывание устройства. Уставка срабатывания по напряжению $3U_0$ регулируется от 10 до 100В. Также в данном устройстве есть возможность установить выдержку времени между возникновением режима феррорезонанса и подключением балластного резистора, имеется защита от „зацикливания“, внутреннее тестирование, сигнализация о срабатывании, а также журнал срабатывания устройства. Стоит отметить высокую эффективность данного устройства. Опыт его эксплуатации показал, что после установки устройств ПЗФ повреждения ТНКИ не наблюдались. Схожим по принципу действия, но более простым устройством защиты, является использование аналогового LC-фильтра-пробки, настроенного на промышленную частоту, и балластного сопротивления [6]. К недостаткам устройств, имеющих в своем составе настроенный на промышленную частоту фильтр, можно отнести возможные ложные срабатывания при однофазных дуговых замыканиях на землю (ОДЗ), а также отсутствие чувствительности к феррорезонансам на промышленной частоте. Более подробно возможность ложного срабатывания данных устройств в режиме ОДЗ будет рассмотрена далее.

Выделение нерешенной ранее части общей проблемы. В настоящее время при разработке и исследовании эффективности применения устройств защиты от феррорезонанса не учитываются в полной мере режимы работы защитных устройств при процессах однофазного дугового замыкания на землю. Поэтому данное направление исследования следует считать перспективным. Дальнейшего совершенствования также требуют алгоритмы идентификации переходных процессов.

Формулирование цели работы. Целью данной работы является разработка алгоритма и устройства защиты ТНКИ от феррорезонанса в сетях с изолированной нейтралью, а также проверка корректности и работоспособности предложенных алгоритмов.

Изложение основного материала. В зависимости от частоты колебаний выделяют следующие разновидности ФРП: феррорезонанс на основной частоте, субгармонический феррорезонанс, квазипериодический феррорезонанс, хаотический феррорезонанс. Классификация режима феррорезонанса осуществляется на основе спектрального анализа данных переходных процессов. Результаты, приведенные в данной работе, получены для сети 6кВ с ТН типа НТМИ-6, однако по своей сути являются универсальными для сетей всех уровней напряжения с изолированной нейтралью.

Наиболее часто встречающимся случаем в сетях с изолированной нейтралью является субгармонический феррорезонанс на частоте 25Гц, поэтому большинство защит ТНКИ ориентировано именно на этот тип феррорезонанса. Такие колебания возникают при

отключении или самоустранении ОЗЗ. Наличие составляющей пониженной частоты в спектре напряжения нулевой последовательности и фазных напряжений приводят к возникновению сверхтоков в обмотке высокого напряжения и повреждению самого ТНКИ. Перенапряжения в этом режиме, как правило,

не превосходят величины $2U_{\phi}$, поэтому не опасны для сети. Типовой пример субгармонического ФРП приведен на рис. 1, на котором изображены токи в обмотке ВН (рис.1, а), напряжение $3u_0$ (рис 1, б), спектр напряжения $3u_0$ (рис. 1, в) для случая феррорезонанса, возникшего в результате устрания ОЗЗ.

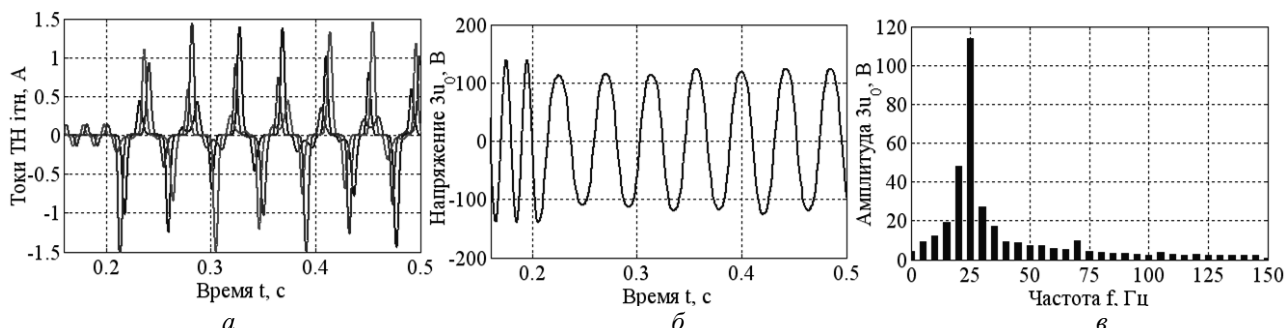


Рис. 1. Расчетные кривые токов в обмотке ВН трансформатора (а), напряжения $3u_0$ (б), спектр напряжения $3u_0$ (в) в режиме субгармонического феррорезонанса

В ходе исследований была определена область существования устойчивого феррорезонанса для ТН типа НТМИ-6. Субгармонический ФРП на частоте 25Гц возникает при фазной емкости сети 0,1–0,62мкФ. При меньшей емкости сети феррорезонанс также возможен, однако он развивается на частотах 50Гц и выше и сопровождается перенапряжениями уровня $2-4U_{\phi}$. Расчет переходных процессов проводился при изменении в широком диапазоне параметров сети.

Как показывают результаты исследований, появление ФРП в подавляющем большинстве случаев сопровождается искажением формы кривой фазных напряжений и напряжения нулевой последовательности [7, 8]. Статистический анализ частот, на которых развиваются феррорезонансные колебания, показывает, что наиболее вероятным диапазоном частот существования ФРП является область 10–200Гц.

Факт искажения напряжения $3u_0$ в режиме феррорезонанса положен в основу метода идентификации данного режима. Блок-схема разработанного устройства защиты от ФРП приведена на рис. 2. Алгоритм работы устройства заключается в следующем. В режиме реального времени проводится мониторинг напряжения $3u_0$. Выборка данных проводится один раз за секунду. За этот период рассчитывается действующее значение напряжения $3U_0$ (блок 1, рис. 2). Блок 2 выполняет функцию сравнения с уставкой. В случае, если величина напряжения $3U_0$ не превышает 20В, устройство не предпринимает никаких дальнейших действий, и процесс мониторинга продолжается. Уставка 20В позволяет отстроиться от срабатываний при незначительном смещении нейтрали. Выборка по времени 1с позволяет отстроиться от кратковременных выбросов напряжения, возникающих при быстро затухающих переходных процессах.

В случае, если действующее значение напряжения $3U_0$ превысит 20В, напряжение $3u_0$ подается на вход блоков 3 и 4. Блок 3 реализует алгоритм быстрого преобразования Фурье. С учетом выявленной непосредственной связи между появлением феррорезонан-

са и искажением формы напряжения $3u_0$, результаты спектрального анализа являются индикатором существования режима феррорезонанса. На рис. 3 приводятся пороговые значения напряжения $3u_0$, при которых происходит идентификация режима феррорезонанса. В случае, если текущий режим идентифицируется как феррорезонанс, на выходе блока 3 формируется логическая единица, в противном случае – ноль.

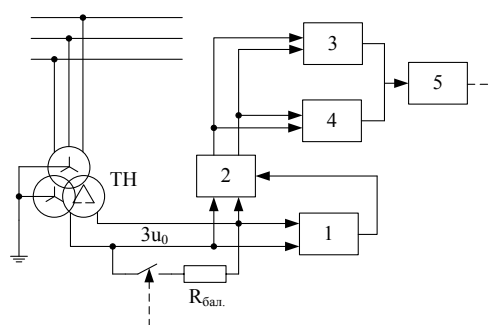


Рис. 2. Блок-схема разработанного устройства защиты от феррорезонанса: 1 – блок вычисления действующего значения напряжения $3u_0$; 2 – блок сравнения действующего значения напряжения $3u_0$ с уставкой; 3 – блок вычисления быстрого преобразования Фурье; 4 – блок отстройки от перемежающихся однофазных дуговых замыканий на землю; 5 – блок логического умножения; $3u_0$ – мгновенное значение напряжения нулевой последовательности; ТН – трансформатор напряжения; $R_{бал.}$ – балластное сопротивление

Выбор уставок срабатывания защиты от феррорезонанса обусловлен следующими соображениями. Субгармонические ФРП чаще всего развиваются на частотах 17 и 25Гц, причем резонансная частота зависит от типа ТН. Расчеты показывают, что напряжение $3u_0$ при субгармоническом феррорезонансе за-

висит от фазной емкости сети, причем с ростом емкости напряжение $3u_0$ увеличивается, а при ее уменьшении напряжение $3u_0$ снижается. При емкостях 0,1 мкФ и менее напряжение $3U_0$ в режиме субгармонического феррорезонанса составляет не более 28В (40В – амплитудное), поэтому для обеспечения достаточной чувствительности устройства уставка срабатывания $3u_0$ при субгармонических ФРП выбрана равной 25В. Для выявления субгармонических ФРП анализируется диапазон частот 10–35 Гц.

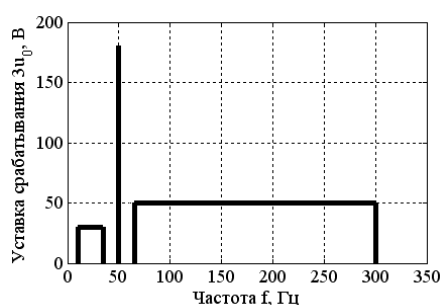


Рис. 3. Пороговые значения напряжения срабатывания напряжения $3u_0$ при идентификации феррорезонанса

Частотный диапазон 35–65 Гц при идентификации режима феррорезонанса в рассмотрение не берется, дабы исключить возможное влияние боковых лепестков составляющей промышленной частоты при Фурье-анализе. Исключением является составляющая 50 Гц, пороговое значение напряжения составляет 180В. Такая уставка выбрана с целью отстройки от режима глухого ОЗЗ, для которого амплитудное значение напряжения $3u_0$ промышленной частоты составляет 141В. В режиме перемежающегося ОДЗ напряжение $3U_0$ может составлять 150В и выше. Для отстройки от перемежающихся ОДЗ используется дополнительный алгоритм идентификации режима ОДЗ (блок 4 на рис. 2).

В диапазоне частот 60–300 Гц порог срабатывания устройства равен 50В. ФРП на таких частотах зачастую сопровождаются опасными перенапряжениями, поэтому увеличение порога срабатывания до 50В не снизит чувствительность защиты. В свою очередь, это позволит, в некоторой мере, отстроится от режима перемежающегося ОДЗ, для которого также характерно искажение формы напряжения нулевой последовательности. Анализ спектра напряжения $3u_0$ в диапазоне частот выше 300 Гц не выполняется, поскольку ФРП на таких частотах не развиваются.

Подобный алгоритм защиты от феррорезонанса положен в основу устройства ПЗФ-5, разработанного сотрудниками кафедры электрических систем и сетей НУ „Львовская политехника“ [5]. Предлагаемый в данной работе алгоритм отличается от известного принципом фильтрации напряжения $3u_0$ (Фурье-анализ вместо режекторного фильтра), а также отстройкой от ложных срабатываний в режиме ОДЗ.

Блок 4 (рис. 2) выполняет функцию идентификации режима ОДЗ. В основу работы данного алгорит-

ма положено вычисление скорости изменения напряжения $3u_0$, т.е. вычисляется производная $d(3u_0)/dt$ и выполняется сравнение модуля производной от этого напряжения с пороговым значением. Основная идея, положенная в основу идентификации режима перемежающегося ОДЗ, заключается в том, что скорость изменения напряжения $3u_0$ при ОДЗ оказывается существенно выше, чем при прочих разновидностях переходных процессов. В случае, если текущий режим идентифицируется как ОДЗ, на выходе блока 4 формируется логический ноль, в противном случае – логическая единица. Блок 5 (рис. 2) выполняет функцию логического умножения. В случае, если на выходе блоков 4 и 5 в результате расчета получены логические единицы, устройство подключает гасящий резистор к обмотке разомкнутого треугольника, в любых других случаях резистор остается неподключенным.

Пороговым значением величины $|d(3u_0)/dt|$ принято значение $2 \cdot 10^6$ В/с. В случае превышения модулем производной порогового значения, текущий режим идентифицируется как ОДЗ. Данная величина получена в ходе анализа результатов компьютерного моделирования переходных процессов и анализа данных, записанных регистраторами переходных процессов в действующих сетях. При определении порогового значения $|d(3u_0)/dt|$ во внимание принимался режим феррорезонанса. Максимальное значение производной для случая существования ФРП составило $5 \cdot 10^5$ В/с, что соответствовало феррорезонансу на частоте 150 Гц. Амплитуда напряжения $3u_0$ при этом составила 400В, кратность перенапряжений – 3,8 U_ϕ , фазная емкость составила 8 пФ.

На рис. 4 приводятся результаты моделирования процессов ОДЗ, на котором приведены напряжение $3u_0$ (рис. 4, а), спектр $3u_0$ (рис. 4, б), производная $d(3u_0)/dt$ для данного режима (рис. 4, в). Моделирование электрической дуги реализовано на основе теории Дударева. Напряжение пробоя поврежденной фазы варьировалось в пределах 0,6–1 U_ϕ , гашение дуги происходило при первом или последующих переходах через ноль высокочастотной составляющей тока ОЗЗ. Также моделировалось случайное поведение дуги, при котором напряжение пробоя изменялось случайным образом, что эквивалентно, например, случайному касанию неизолированных проводов о ветви деревьев под воздействием ветра.

На рис. 5 приводятся результаты моделирования ФРП, на котором приведены напряжение $3u_0$ (рис. 5, а), спектр $3u_0$ (рис. 5, б), производная $d(3u_0)/dt$ (рис. 5, в) для данного режима.

Анализ приведенных выше результатов показывает, что производная от напряжения $3u_0$ в режиме ОДЗ оказывается существенно выше, чем при феррорезонансе, что позволяет отстроить защиту от данного вида переходного процесса. Амплитуды высших гармонических составляющих в режиме феррорезонанса также оказываются достаточными для обеспечения чувствительности устройства к ФРП.

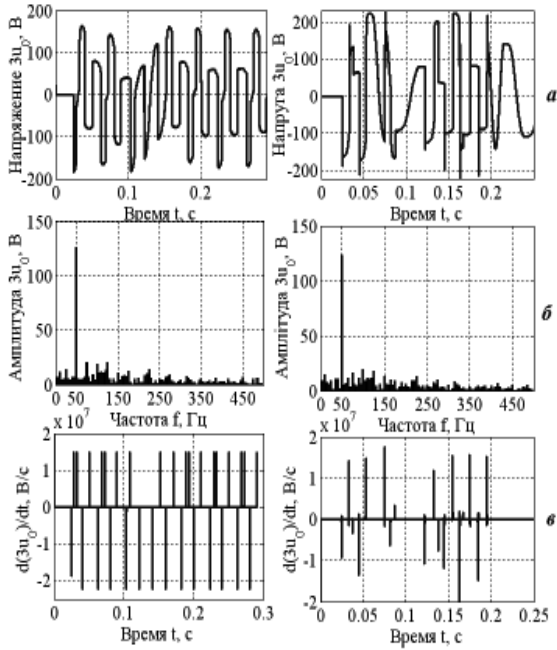


Рис. 4. Расчетные кривые напряжения Z_{i0} (а), спектр этого напряжения (б), производная $d(Z_{i0})/dt$ (в) для режима ОДЗ

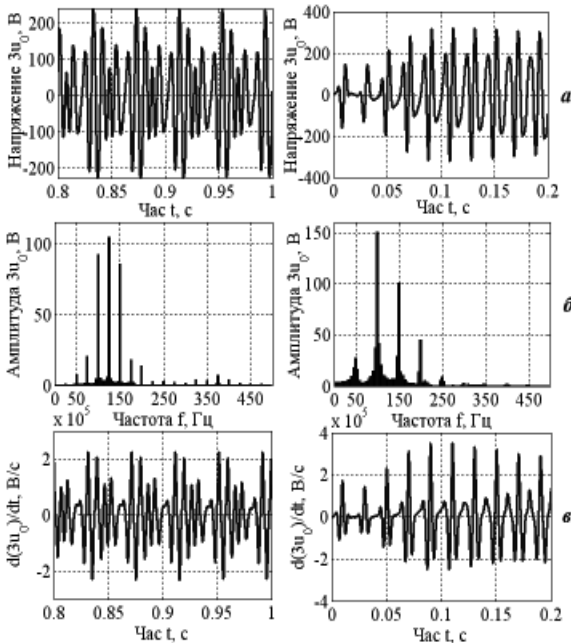


Рис. 5. Расчетные кривые напряжения Z_{i0} (а), спектр этого напряжения (б), производная $d(Z_{i0})/dt$ (в) для режима феррорезонанса

Отсутствие дополнительной отстройки от режима ОДЗ может существенно снизить селективность работы защиты, что непременно приведет к ложным срабатываниям. Ошибочные срабатывания защиты нежелательны, поскольку при подключенном балластном резисторе снижаются метрологические характеристики ТН, кроме того снижается коммутационный ресурс защитного устройства.

Рассмотрим режимы работ защит от феррорезонанса при переходных процессах ОДЗ, содержащих в цепи Z_{i0} режекторный фильтр. На рис. 6 приведены две амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) режекторных фильтров с различной шириной полосы подавления. На рис. 7 приведены переходные характеристики данных фильтров.

Как известно, при ОДЗ в спектре фазных напряжений наряду с промышленной частотой присутствуют высокочастотные составляющие, обусловленные переходными процессами при горении дуги, диапазон частот которых равен 1–3кГц [9]. Очевидно, что данные составляющие при ОДЗ беспрепятственно проходят через фильтр и могут приводить к срабатыванию устройств защиты. В качестве примера на рис. 8 приведены расчетные кривые напряжения Z_{i0} в режиме ОДЗ без учета и с учетом режекторного фильтра, характеристики которых приведены на рис. 6.

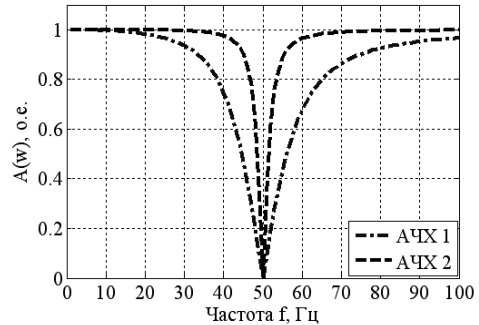


Рис. 6. Амплитудно-частотные характеристики режекторных фильтров с различной шириной полосы подавления

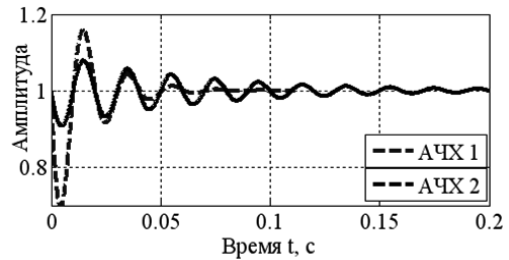


Рис. 7. Единичные характеристики режекторных фильтров с различной шириной полосы подавления

Среднеквадратическое значение исходного напряжения Z_{i0} (без фильтра) составило 108В. На выходе фильтра действующее значение напряжения Z_{i0} составляет порядка 43В. В начальной стадии горения дуги кривые напряжения Z_{i0} для различных фильтров несколько отличаются друг от друга, что поясняется различными динамическими характеристиками фильтров, однако к моменту времени 0,2с выходное напряжение практически не зависит от свойств фильтра (рис. 8). Так, например, в начальной стадии переходного процесса действующее значение напряжения Z_{i0} на выходе фильтра с АЧХ-2 составило

75В. Напряжения такой величины достаточно для ложного срабатывания защитного устройства, поэтому отстройка от режима ОДЗ является необходимой.

На основе предложенного алгоритма защиты от феррорезонанса, блок-схема которой изображена на рис. 2, создано устройство гашения ФРП. В основу устройства положен микроконтроллер фирмы Texas Instruments, стоимость устройства составляет 3000грн. По вопросам приобретения устройства просим связаться с авторами данной статьи.

Устройство монтируется на панели релейной защиты. Питание устройства осуществляется от линейных выводов вторичных цепей ТН, потребляемая мощность не более 5ВА. После выявления феррорезонанса происходит замыкание контактов реле на время 3с, величина резистора составляет 50ом. При появлении напряжения $3u_0$ на панели устройства загорается один из светодиодов – или „Земля в сети“ или „ФРП“. В устройстве предусмотрена система блокировки от повторных срабатываний и „зацикливания“.

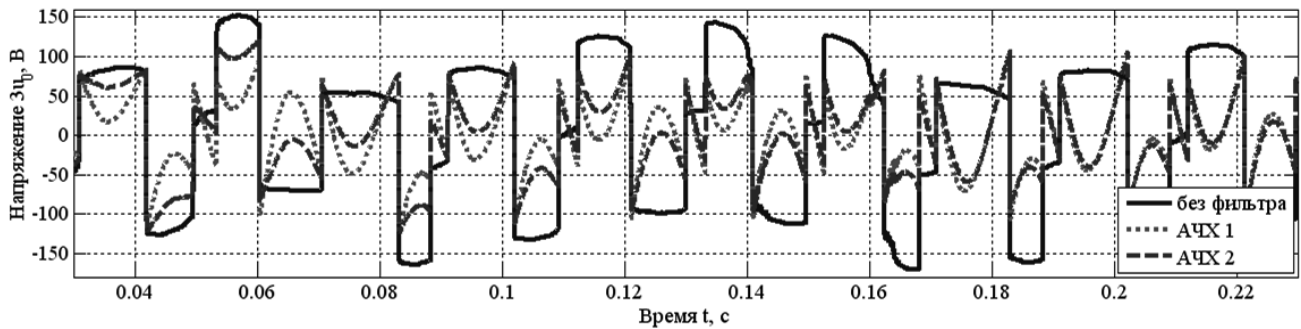


Рис. 8. Расчетные кривые напряжения $3u_0$ в режиме ОДЗ без учета и с учетом режесторного фильтра

Проверка адекватности работы разработанного устройства была проведена следующим образом. На цифровой вход микроконтроллера подавались сигналы, полученные при регистрации переходных процессов в действующих сетях. При тестировании использовались сигналы, соответствующие режимам ОДЗ, ФРП и другим переходным процессам. При этом отслеживалась корректность определения разновидности переходного процесса. Кроме тестовых сигналов, полученных в действующих сетях, были использованы данные, полученные в результате моделирования. Также в ходе экспериментов была собрана электрическая схема, в которой возбуждался феррорезонанс. Сигнал напряжения с нелинейной индуктивности подавался на аналоговый вход устройства, и отслеживалась эффективность работы устройства. Во всех рассмотренных случаях предложенное устройство работало эффективно.

Выводы и перспективы развития направления. В работе рассмотрены известные устройства защиты от феррорезонанса в сетях с изолированной нейтралью и проанализированы условия их работы при переходных процессах. Выявлены условия возможного ложного срабатывания устройств защиты. Разработан алгоритм идентификации феррорезонанса, а также алгоритм отстройки от режима ОДЗ. На основе предложенных принципов идентификации переходных процессов разработано устройство защиты от феррорезонанса, а также проверена корректность его работы. Перспективным направлением дальнейших исследований следует считать интеграцию предложенных принципов идентификации разновидностей переходных процессов в алгоритмы защиты от однофазных замыканий на землю, а также качественный анализ.

Список литературы / References

1. Журахівський А.В. Режимы работы трансформаторів напруги в електромережах з ізолюваною нейтраллю / А.В. Журахівський, А.Я. Яцейко, Р.Я. Масляк // Електроінформ. – 2009. – № 1. – С. 8–11.
2. Zhyrakhivskiy, A.V., Yatseiko, A.Ya. and Masliak, R.Ya. (2009), “Operation modes of voltage transformer in electrical network with isolated neutral point”, *Electroinform*, no. 1, pp. 8–11.
3. Tsao, T. and Ning, C. (2006), “Analysis of ferroresonant overvoltages at Maanshan Nuclear Power Station in Taiwan”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 21, no. 3, pp. 1006–1012.
4. KMB systems, “Smart load to reduce ferroresonance”, available at: <http://www.kmb.cz/in dex.php/en/other/afr-transf-protection> (accessed November 2, 2013).
5. Wojciech, P., Florkowski, M., Fulczyk, M., and Mahonen, P. (2007), “Mitigating ferroresonance in voltage transformers in ungrounded MV networks”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 22, no. 4, pp. 2362–2369.
6. Повышение надежности в работе измерительных трансформаторов напряжения в сетях с изолированной нейтралью [Электронный ресурс]: официальный сайт запорожского завода высоковольтной аппаратуры – Режим доступа: <http://www.zva.zp.ua /doc/archivedoc/common/Reliability.pdf>.
7. The official site of Zaporozhye Plant of High Voltage Equipment, “Increasing the reliability in the measuring voltage transformers in networks with isolated neutral point” available at: <http://www.zva.zp.ua/doc/archivedoc/ common/Reliability.pdf> (accessed November 2, 2013).
8. Aghazadeh, R., Sanaye-Pasand, M. (2004), “Damping of capacitive voltage substations ferroresonance using a suitable RLC filter”, *IEE Proceeding Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 151, no. 6, pp. 721–727.

7. Braun, D., Delfanti, M., Palazzo, M. and Zich, K. (2012), "Harmonic distortion in power stations due to ferroresonance", *Proceedings of Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, May 21-24, 2012, Singapore, pp. 101–104.
8. Serhat, S., Tahir, C., and Sezai, T. (2012), "Spectral and statistical analysis for ferroresonance phenomenon in electric power systems", *Electrical Engineering*, Vol. 94, issue 2, pp. 117–124.
9. Kizilkay, M., La Seta, P. (2005), "Digital simulation of fault arcs in medium-voltage distribution networks", *Proceedings from 15th Power Systems Computation Conference*, August 22-26, 2005 Liège, Belgium, Session 36, Paper 3, pp. 1–7.

Мета. Аналіз принципів роботи відомих пристроїв захисту від ферорезонансу в мережах з ізольованою нейтраллю. Виявлення особливостей протікання ферорезонансних перехідних процесів. Розроблення алгоритму та пристрою захисту вимірювальних трансформаторів напруги від ферорезонансних процесів, перевірка коректності та працездатності запропонованих рішень.

Методика. Розроблена математична модель електричної мережі з ізольованою нейтраллю. Змодельовані процеси ферорезонансу та однофазного дугового замикання на землю. Використані методи фізичного моделювання при оцінці працездатності пристрою захисту від ферорезонансу. Застосовані експериментальні методи при визначенні параметрів вимірювальних трансформаторів напруги, необхідних для математичного моделювання.

Результати. Виконаний аналіз принципів дії широко відомих пристроїв захисту від ферорезонансу. Виявлено, що в режимі однофазного дугового замикання на землю можливе хибне спрацьовування пристроїв захисту від ферорезонансу. На основі математичного моделювання перехідних процесів отримано діапазон частот, на яких розвиваються ферорезонансні коливання. Запропонований спосіб ідентифікації режиму ферорезонансу, що ґрунтується на спектральному аналізі напруги $3u_0$, а також спосіб розпізнавання однофазного дугового замикання на землю, що ґрунтується на обчисленні похідної від напруги $3u_0$. Перевірені коректність та працездатність запропонованих алгоритмів шляхом подачі тестових сигналів на вхід пристрою захисту.

Наукова новизна. Науково обґрунтований метод ідентифікації режиму ферорезонансу в мережах з ізольованою нейтраллю, який від відомих методів відрізняється способом фільтрації напруги $3u_0$ (Фур'є-аналіз замість режекторного фільтру), що дозволяє точніше розпізнавати вигляд перехідного процесу. Вдосконалений метод ідентифікації режиму однофазного дугового замикання на землю, який заснований на обчисленні похідної від напруги $3u_0$ і порівнянні з уставкою, що дозволяє попередити помилкові спрацьовування захисту в режимі однофазного дугового замикання на землю.

Практична значимість. Створений алгоритм захисту вимірювальних трансформаторів напруги від ферорезонансних процесів. На основі даного алгоритму розроблений пристрій захисту. Запропоновані методи іден-

тифікації різновидів перехідних процесів можуть бути використані при організації захисту від однофазних замикань на землю в мережах з ізольованою нейтраллю.

Ключові слова: ферорезонанс, трансформатор напруги, математичне моделювання, однофазне замикання на землю, спектральний аналіз, напруга нульової послідовності, режекторний фільтр

Purpose. Analysis of the operating principles of known protection devices for ferroresonance phenomena in networks with isolated neutral point. Identifying the features of the transient ferroresonance processes. Development of the algorithm and protective device for voltage transformers against ferroresonance processes, validation and testing performance of the proposed solutions.

Methodology. Mathematical model of electrical networks with isolated neutral was developed. The processes of ferroresonance phenomena and single-phase earth arc fault were simulated. Physical modeling techniques were used in evaluating the efficiency of protection devices against ferroresonance phenomena. Experimental methods were used in determining the parameters of voltage transformers necessary for mathematical modeling.

Findings. The analysis of the operating principle of widely known protection devices against ferroresonance phenomena was performed. It was found that in the single-phase arc ground fault mode false functioning of protection devices against ferroresonance is possible. Due to the mathematical modeling of transients frequency range of the ferroresonance oscillations was received. A method of identification the ferroresonance mode based on the spectral analysis of voltage $3u_0$ and method of identification single-phase arc ground fault mode based on calculating the derivative voltage $3u_0$ were proposed. The correctness and functionality of the proposed algorithms were verified by means of the test signals to input of protection devices.

Originality. Scientifically proved The method of the ferroresonance mode identification in network with isolated neutral point was scientifically proved, it is different from the known one by filtering of $3u_0$ voltage (Fourier analysis is used instead of the band-stop filter) that allows more accurately detect the type of the transient. The method of identification of single-phase arc ground fault mode was improved. This method is based on computing the derivative of the $3u_0$ voltage and cooperation with set point that allows to prevent false function of protection devices at the single-phase arc ground fault mode.

Practical value. Protection algorithm of measuring voltage transformers against ferroresonance processes was created. The protection device based on this algorithm was developed. The proposed methods of identification of transients may be used for protection against single-phase ground fault in networks with isolated neutral.

Keywords: ferroresonance, voltage transformer, mathematical modeling, single-phase ground fault, spectral analysis, zero-sequence voltage, band-stop filter

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук І.В. Жежеленком. Дата надходження рукопису 04.11.13.