

УДК 621.311

Юрий Дмитриевич Кутумов

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, e-mail: kutumov97@mail.ru

Максим Игоревич Цветков

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», студент кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, e-mail: maximtzv3tkov@yandex.ru

Исследование влияния бросков намагничивающего тока трансформаторов на устойчивость функционирования измерительных органов релейной защиты в целях совершенствования методик выбора их уставок

Авторское резюме

Состояние вопроса. Броски тока намагничивания трансформаторов возникают в электрических сетях 0,4–750 кВ при подключении трансформатора к сети (оперативных переключениях, опробовании и пр.). Броски тока намагничивания сопровождаются резким увеличением действующего значения тока, протекающего через трансформатор/иные энергообъекты, его питающие, что может быть причиной ложных срабатываний устройств релейной защиты. Для исключения таких неправильных срабатываний при возникновении бросков тока намагничивания в устройствах релейной защиты предпринимается ряд мер расчетного, конструктивного или алгоритмического характера. Мероприятия по отстройке от бросков тока намагничивания, связанные с применением расчетных методик, базируются на выражениях из Руководящих указаний по релейной защите, полученных еще в 1970-е гг. для электромеханических реле. В связи с этим основной целью настоящего исследования является проверка функционирования цифровых измерительных органов различного типа при бросках тока намагничивания и обоснование актуальности применения существующих расчетных выражений.

Материалы и методы. Исследование переходных и установившихся режимов при бросках тока намагничивания и оценка устойчивости функционирования измерительных органов релейной защиты различных типов осуществлены с применением методов имитационного моделирования в программном комплексе Matlab.

Результаты. Исследованы количественные параметры и характеристики бросков тока намагничивания трансформаторов на примере ЛЭП с ответвлением. Получены диаграммы, иллюстрирующие характер изменения различных компонентов бросков тока намагничивания и характер изменения замеров цифровых измерительных органов различных типов при появлении бросков тока намагничивания. Дана оценка актуальности применения известных расчетных выражений в условиях широкого распространения микропроцессорных защит.

Выводы. Полученные результаты дают возможность сделать выводы о целесообразности применения ряда существующих расчетных выражений для выбора параметров настройки токовых и дистанционных защит ЛЭП/трансформаторов в современных условиях и могут быть использованы для упрощения процесса параметрирования указанных защит.

Ключевые слова: силовой трансформатор, устойчивость функционирования измерительных органов, бросок тока намагничивания, цифровые измерительные органы

Yuri Dmitrievitch Kutumov

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automatic Control of Electric Power Systems, Russia, Ivanovo, e-mail: kutumov97@mail.ru

Maxim Igorevich Tsvetkov

Ivanovo State Power Engineering University, bachelor degree student of the Department of Automatic Control of Electric Power Systems, Russia, Ivanovo, e-mail: maximtzv3tkov@yandex.ru

Study of the influence of transformer magnetizing current inrush on the operation stability of measuring elements of relay protection with the purpose of improving the methods of selecting their settings

Abstract

Background. Transformer magnetization current inrush (MCI) occurs in 0,4–750 kV electrical networks when connecting a transformer to the network (during operational switching, testing, etc.). MCI is accompanied by a sharp increase

in the r.m.s. value of the current which flows through the transformer / other power facilities supplying it, which can be the cause of incorrect relay protection operation. To eliminate such incorrect operation when MCI occurs, a number of measures of a calculation, design or algorithmic nature are taken in relay protection devices. Measures for tuning out MCI which are associated with the use of calculation methods, however, are based on expressions from the Guidelines for Relay Protection obtained back in the 1970s for electromechanical relays. The main objective of this work is to check the functioning of digital measuring devices of various types in MCI and to justify the relevance/lack of relevance of the use of the mentioned calculation expressions.

Materials and methods. For study of transient and steady-state modes during MCI, and for assessment of the operation stability of relay protection measuring elements of various types, simulation study in Matlab software was used.

Results. The quantitative parameters and characteristics of transformer MCI are studied with the usage of a power transmission line with a transmission branch switched from one side. Diagrams which illustrate the nature of the change in various components of the MCI and the nature of the change in measurements of digital measuring devices of various types when the MCI appears are obtained. An assessment of the relevance of using known calculation expressions in the conditions of widespread use of microprocessor protection is given.

Conclusions. The obtained results make it possible to draw conclusions about the advisability of using a number of calculation expressions for setting calculation for overcurrent and distance protection of power transmission lines/transformers in modern conditions and make it possible to simplify the process of parameter setting the specified protection devices.

Key words: power transformer, magnetization current inrush, digital measuring devices, relay protection, operational stability

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.4.028-037

Введение. Броски тока намагничивания (БТН) трансформаторов возникают в электрических сетях 0,4–750 кВ при подключении ненагруженного трансформатора к сети (оперативных переключениях, опробовании и пр.) (рис. 1).



Рис. 1. Кривые броска намагничивающего тока в фазах автотрансформатора напряжением 500/220 кВ

Для обеспечения несрабатывания устройств релейной защиты (РЗ) при возникновении БТН предпринимается ряд мер расчетного, конструктивного или алгоритмического характера.

Алгоритмические способы отстройки от броска тока намагничивания включают в себя использование преобразования Фурье, введение блокировки по второй гармонике (в микропроцессорных устройствах релейной защиты) и пр.¹

Конструктивные мероприятия применяются в устройствах защиты трансформаторов (реже – ЛЭП) на электрохимической и микроэлектронной элементной базе. Так, например, в реле РНТ-565 и ДЗТ-11 используется быстронасыщающийся трансформатор, кото-

рый позволяет автоматически загружать указанные реле при появлении апериодической составляющей (0-й гармоники) в однополярном БТН [1, 2].

В микроэлектронном реле ДЗТ-21 для отстройки дифференциальной защиты трансформатора (ДЗТ) от БТН используется время-импульсный способ, который заключается в преобразовании кривой токов в плечах трансформатора в последовательность импульсов, длительность которых в начале процесса будет различаться (при БТН длительность таких импульсов будет меньше, чем при токе КЗ/нагрузочных режимах) [3].

Расчетные способы отстройки от БТН основаны на оценке его величины (либо на оценке величины его оставшихся после применения преобразования Фурье компонент) и последующем выборе уставок защит такой величины, при которой измерительные органы таких защит срабатывать не будут.

Отметим, что, несмотря на появление БТН в трансформаторах (иногда – в двигателях), данный режим может оказывать существенное влияние и на защиты ЛЭП (их отдельные органы), которые обеспечивают питание указанных трансформаторов.

Цель и задачи исследования. В настоящее время известны работы [4, 5], в которых дана оценка величины БТН трансформаторов, а также приводятся расчетные выражения для определения их параметров и характеристик, которые стали основой для соответствующих разделов Руководящих указаний по релейной защите², где описаны расчетные выражения для отстройки токовых и дистанционных измерительных органов от БТН по параметру

¹ Шкаф дистанционной и токовой защиты линии ШЭ2607 021(021021). Руководство по эксплуатации ЭКРА.656453.902 РЭ (021_400 от 25.06.2020) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ekra.ru/upload/iblock/549/%D0%A0%D0%AD%20%D0%A8%D0%AD2607%20021_400.pdf [Дата обращения 15.05.2025].

² Руководящие указания по релейной защите. Вып. 09. Дифференциально-фазная высокочастотная защита линий 110–330 кВ. – М.: Энергия, 1972. – 115 с.

срабатывания (причем эти выражения позволяют учесть тип стали и тип включения выключателя – однофазное, двухфазное, трехфазное включение). Очевидно, что указанные расчетные выражения актуальны для электромеханических реле, которые анализируют полный спектр электрической величины (тока, напряжения).

Тем не менее часть расчетных выражений³ в настоящее время используется при выборе параметров настройки защит на микропроцессорной элементной базе⁴, в которых применяются алгоритмические способы отстройки от БТН и гармонических составляющих, входящих в его состав. Наиболее очевидным способом является преобразование Фурье. При этом использование указанных расчетных выражений предполагается как для дистанционных защит / их измерительных органов⁵, так и для токовых защит⁶.

Учитывая вышеуказанное, актуальным является исследование влияния БТН трансформаторов на устойчивость функционирования измерительных органов релейной защиты в целях совершенствования методик выбора их уставок и возможного исключения ряда излишних расчетных выражений.

В связи с поставленной целью необходимо решить следующие задачи:

- 1) исследовать количественные параметры и характеристики БТН;
- 2) изучить влияние БТН на устойчивость функционирования измерительных органов:
 - междуфазных токовых отсечек ЛЭП 110–220 кВ;
 - токовых защит нулевой последовательности ЛЭП 110–750 кВ;
 - сопротивлений дистанционных защит ЛЭП 110–750 кВ.

При этом исследованию и последующему аналитическому сравнению будут подвергнуты:

- замеры цифровых измерительных органов, основанных на применении преобразования Фурье;

- замеры цифровых измерительных органов, основанных на применении алгоритмов, анализирующих полный гармонический спектр электрической величины;

- замеры измерительных органов релейной защиты, полученные на основе расчетных выражений из [4, 5].

Методы исследования. Исследование переходных режимов при БТН и оценка устойчивости функционирования измерительных органов различных защит проведены с использованием имитационного моделирования в программном комплексе Matlab.

Верификация модели трансформатора для исследования БТН в программном комплексе Matlab выполнена путем сравнения токов при БТН в фазах трансформатора с результатами осциллографирования аварийного события, связанного с опробованием шинного моста (ШМ) Т-1 ПС 220 кВ Вичуга (рис. 2) при его опробовании со стороны ПС 220 кВ Вичуга в феврале 2025 г. Сопротивление питающей энергосистемы рассчитано в программном комплексе АРУ РЗА путем эквивалентирования относительно опробуемого шинного моста:

$$Z_{1c} = 1,166 + j4,256 \text{ Ом};$$

$$Z_{0c} = 0,461 + j4,155 \text{ Ом}.$$

Сопротивление ШМ составляет:

$$Z_{1n} = 0,34 + j0,82 \text{ Ом};$$

$$Z_{0c} = 0,81 + j2,88 \text{ Ом}.$$

Длина ШМ – 2,09 км, трансформатор – Т-1 типа ТДТН-40000/110.

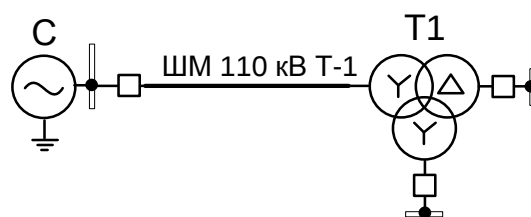


Рис. 2. Схема ШМ 110 кВ Т-1 ПС 220 кВ Вичуга

Результаты сравнения осциллограмм токов при БТН (рис. 3) показали высокую степень сходимости, из чего следует значительный уровень достоверности модели в программном комплексе Matlab, основанной на применении модели трансформатора с заданной пользователем кривой намагничивания электротехнической стали Э330 (рис. 4).

³ Руководящие указания по релейной защите. Вып. 09. Дифференциально-фазная высокочастотная защита линий 110–330 кВ. – М.: Энергия, 1972. – 115 с.

⁴ Стандарт ОАО «СО ЕЭС» (СТО 56947007-29.120.70.032-2008) «Методические указания по выбору параметров срабатывания дифференциально-фазной и высокочастотной микропроцессорных защит сетей 220 кВ и выше, устройств АПВ сетей 330 кВ и выше производства ООО «НПП «ЭКРА»». Утвержден и введен в действие 12.07.2011 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.soups.ru/fileadmin/files/laws/standards/STO_parameter_choice.pdf [Дата обращения 31.10.2024]; Методические указания по расчету и выбору параметров настройки дистанционных защит линий электропередачи 110 кВ и выше. Утверждены распоряжением АО «СО ЕЭС» от 17.08.2021 № 89р. – М.: АО «СО ЕЭС», 2021. – 295 с.

⁵ Там же.

⁶ Методические указания по расчету и выбору параметров настройки резервных токовых защит линий электропередачи 110 кВ и выше. Утверждены распоряжением АО «СО ЕЭС» от 10.05.2023 № 61р. – М.: АО «СО ЕЭС», 2023. – 289 с.

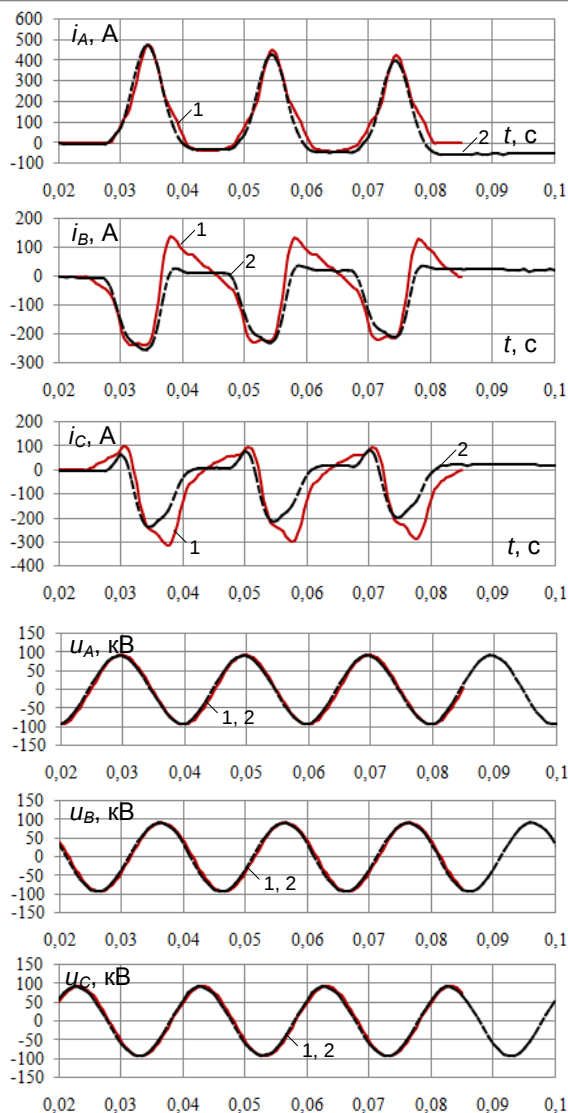


Рис. 3. Осциллограммы токов при БТН (фаза А): 1 – по результатам имитационного моделирования в Matlab; 2 – по результатам анализа аварийной осциллограммы

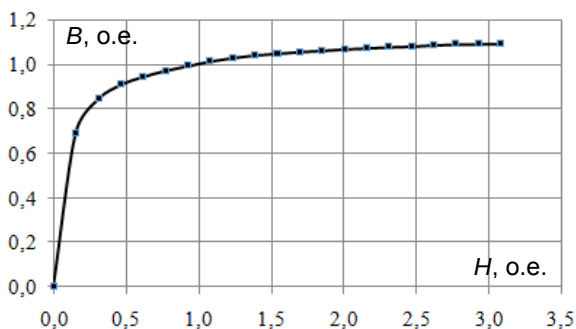


Рис. 4. Кривая намагничивания электротехнической стали Э330, используемая при моделировании в Matlab

Исследование количественных параметров и характеристик БТН и их влияния на функционирование измерительных органов защит выполнено для схемы сети на рис. 5, включающей в

себя эквивалентную энергосистему, проведено относительно опробуемой ЛЭП:

$$Z_{1c} = 0,487 + j2,611 \text{ Ом};$$

$$Z_{0c} = 0,369 + j2,712 \text{ Ом}.$$

Участок ЛЭП до трансформатора ответвления имеет длину 17 км, провод АС-240/32, опора типа ПС110-2 и непосредственно трансформатор ответвления ПС 110 кВ Залесье ТДН-16000/110.

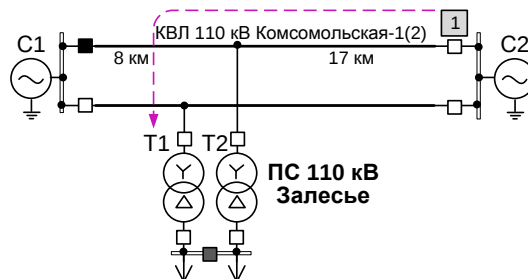


Рис. 5. Схема исследуемого участка сети

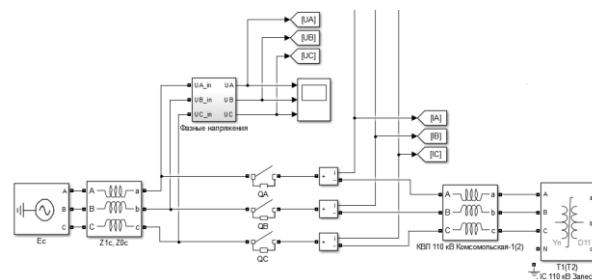


Рис. 6. Модель опробуемой ЛЭП и трансформатора ПС 110 кВ Залесье в программном комплексе Matlab

Исследование проведено с учетом влияния на БТН следующих факторов:

- изменения сопротивления эквивалентной системы;
- изменения длины ЛЭП до трансформатора ответвления;
- типа включения;
- режима заземления нейтрали;
- фазы включения;
- влияния нагрузки трансформатора.

По результатам исследования сделаны следующие выводы.

При увеличении сопротивления системы Z_{1c} , Z_{0c} пропорционально уменьшается действующее значение тока БТН во всех фазах. При увеличении длины ЛЭП уменьшается действующее значение тока во всех фазах, а постоянная времени затухания БТН растет, что связано с увеличением активного сопротивления контура, по которому протекает БТН.

При трехфазном включении значение тока в одной фазе более чем в два раза превышает значение тока в двух других фазах, причем в двух других фазах значения тока по модулю совпадают (рис. 7). Значения токов БТН преимущественно однополярны (в большинстве случаев при большем диапазоне фазы включения).

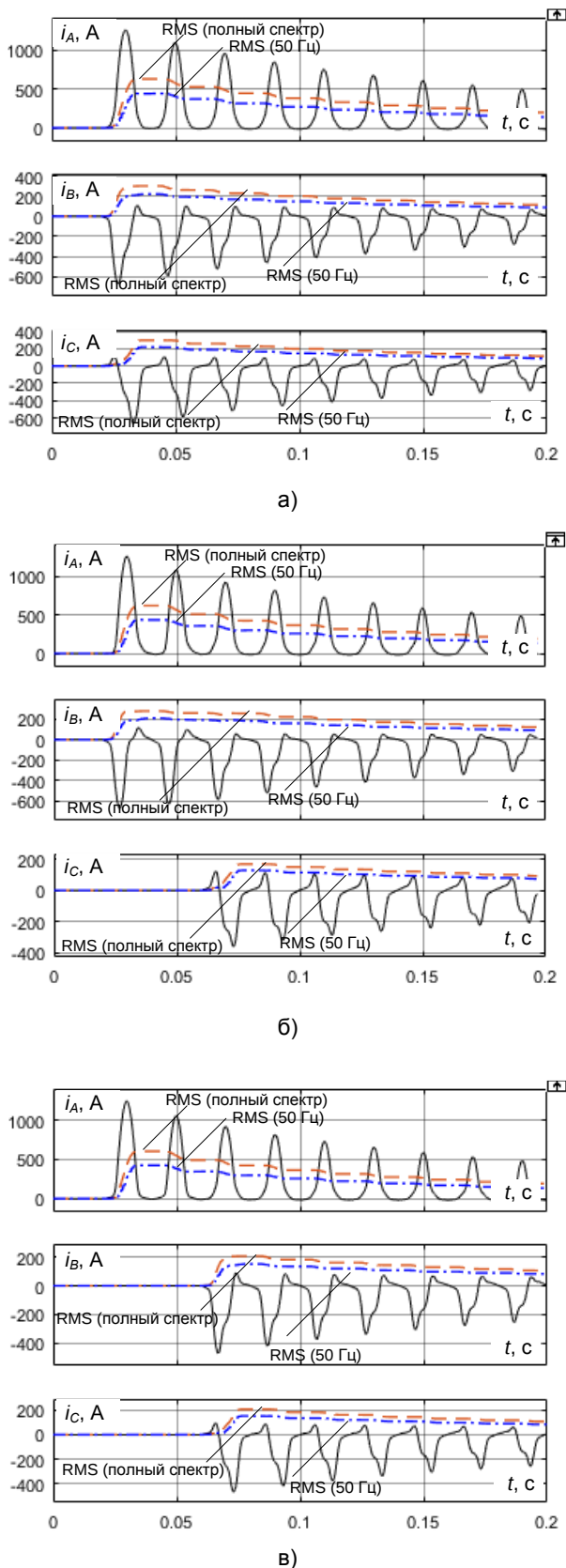


Рис. 7. Осциллограммы, отражающие влияние различных типов включения на параметры и характеристики БТН: а – трехфазное; б – двухфазное; в – однофазное

Режим заземления нейтрали трансформатора ответвления в значительной степени влия-

ет на параметры БТН. При заземленной нейтрали как действующее значение тока, так и действующее значение его составляющей 50 Гц увеличивается по сравнению с режимом, когда нейтраль не заземлена (рис. 8).

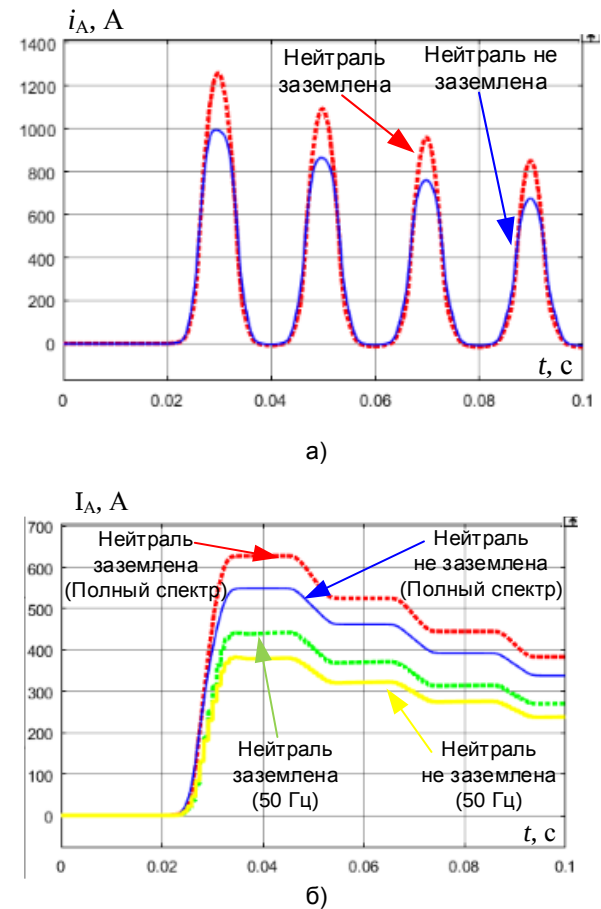


Рис. 8. Осциллограммы, иллюстрирующие влияние режима заземления нейтрали трансформатора на параметры и характеристики БТН (тип включения – трехфазное; токи фазы А): а – мгновенные значения токов; б – действующие значения токов

Установлено, что фаза включения играет определяющую роль. В момент включения трансформатора наибольшее значение тока наблюдается в фазе, в которой мгновенное значение напряжения в этот момент переходит через нуль (рис. 9, фаза А). Исходя из этого, можно утверждать, что замеры дистанционных измерительных органов при БТН будут обладать наименьшим (наиболее определяющим) значением именно при такой фазе включения (когда ток наибольший), так как напряжение при БТН сохраняет свои амплитудные и частотные (синусоидальные) характеристики.

При фазе включения, соответствующей максимуму напряжения подключаемого фазного провода, ток БТН становится двухполярным.

Результаты моделирования также показали, что нагрузка трансформатора ответвления практически не влияет на параметр мгновенного значения тока в фазе (рис. 10).

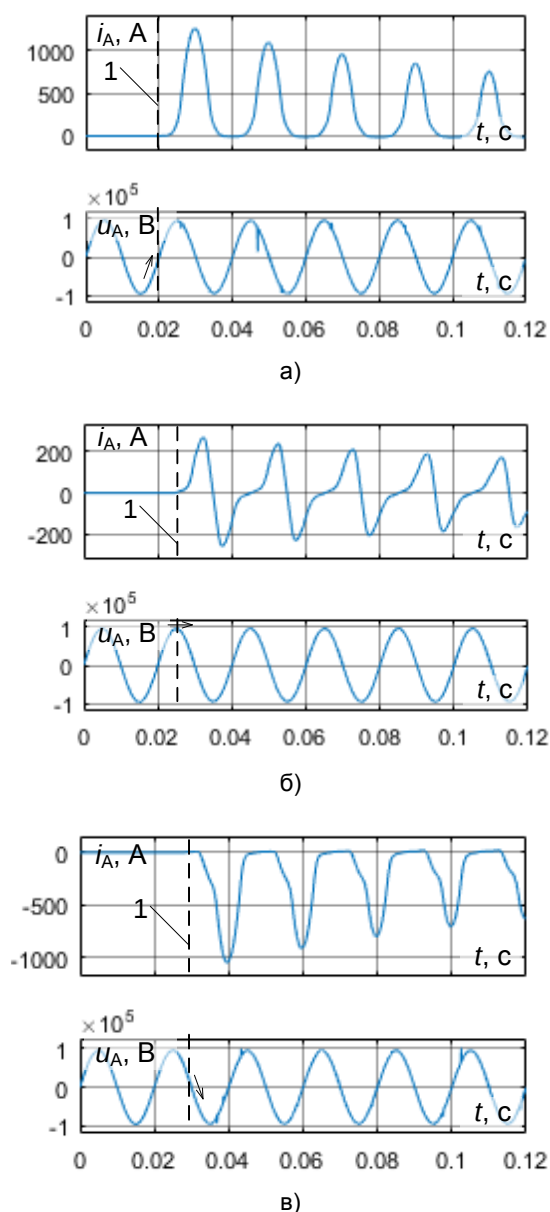


Рис. 9. Осциллограммы, иллюстрирующие влияние фазы включения на полярность (и на величину) тока БТН: а – $t_{\text{вкл}} = 0,02$ с; б – $t_{\text{вкл}} = 0,025$ с; в – $t_{\text{вкл}} = 0,028$ с

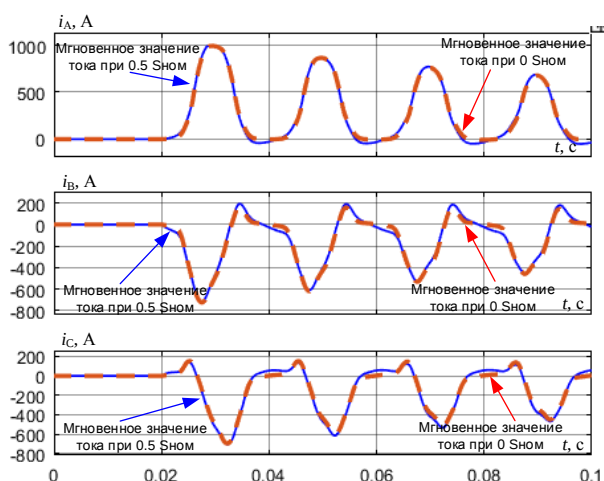


Рис. 10. Осциллограммы, иллюстрирующие влияние нагрузки трансформатора на БТН

Имитационная модель системы цифровой обработки сигналов тока и напряжения включала в себя:

- антиалиазинговый фильтр с частотой среза, равной $0,5f_d$ (f_d – частота дискретизации);
- алгоритм формирования вектора, в котором формируются действительная $\text{Re}(\underline{U})$ и мнимая $\text{Im}(\underline{U})$ части вектора, а также амплитуда выбранной гармонической составляющей вектора U и его фаза $\angle U$;
- модели цифровых измерительных органов согласно [6, 7];
- иные вспомогательные компоненты.

Вектор на основе преобразования Фурье, позволяющий получить первую гармоническую составляющую – 50 Гц, рассчитывался на основе выражения

$$\dot{U}_k = \text{Re}(\dot{U}_k) + j \cdot \text{Im}(\dot{U}_k) = \sum_{n=0}^{N-1} u_n e^{-\frac{2\pi j}{N} kn} = \sum_{n=0}^{N-1} u_n \left[\cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) - j \cdot \sin\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) \right], \quad (1)$$

где $k = 0, \dots, N-1$ – индекс выбранной для анализа (фильтрации) гармонической составляющей; N – число выборок на период; u_n – отдельные выборки исследуемого сигнала; U_k – вектор k -й гармоники исследуемого сигнала.

Вектор, позволяющий анализировать полный спектр исследуемых токов и напряжений, основан на алгоритме двух соседних выборок:

$$\dot{U}_k = \left(\frac{N}{2\pi} + j \right) u_n - \frac{N}{2\pi} u_{n-1}. \quad (2)$$

Изучение влияния БТН на устойчивость функционирования измерительных органов междуфазных токовых отсечек (МФТО) ЛЭП 110–220 кВ. Ток срабатывания МФТО, реагирующей на фазные токи, выбирается по следующим расчетным выражениям⁷:

- для трехфазного включения

$$I_{\text{с.з.}} = \frac{C_1 U_{\text{ном}}}{\sqrt{3} (x_{\text{с1}} + x_{\text{тр.экв}}^{(3)})}; \quad (3)$$

- для однофазного включения

$$I_{\text{с.з.}} = \frac{C_1 \cdot U_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot (x_{\text{с1}} + x_{\text{тр.экв}}^{(1)})}; \quad (4)$$

- для двухфазного включения

$$I_{\text{с.з.}} = \frac{C_2 \cdot U_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot (x_{\text{с1}} + x_{\text{тр.экв}}^{(1)})}; \quad (5)$$

где $C_1 = 0,84$; $C_2 = 0,68$; $x_{\text{с1}}$ – сопротивление питающей энергосистемы прямой последовательности; $U_{\text{ном}} = 115$ кВ – линейное напряжение;

⁷ Руководящие указания по релейной защите. Вып. 09. Дифференциально-фазная высокочастотная защита линий 110–330 кВ. – М.: Энергия, 1972. – 115 с.

ние питающей энергосистемы; $X_{\text{тр.экв.}}^{(1)}$, $X_{\text{тр.экв.}}^{(3)}$ – сопротивления трансформатора и питающей его ЛЭП в условиях существования БТН, о.е.:

$$X_{\text{тр.} *}^{(3)} = 12,7 + u_{k*}; \quad (6)$$

$$X_{\text{тр.} *}^{(1)} = \frac{12,7 + u_{k*}}{1,35}. \quad (7)$$

В силу того что одним из расчетных условий выбора тока срабатывания МФТО является отстройка от трехфазного КЗ на шинах противоположной и «своей» подстанции, в сетях 110–220 кВ указанная уставка в среднем находится в диапазоне от 1000 до 9000 А (если происходит измерение фазных токов).

Исследование замеров измерительных органов в программном комплексе Matlab проведено при различных типах включения (трехфазное, двухфазное, однофазное).

Осциллограммы действующих значений фазных токов, их относительных начальных фаз и действующих значений разности фазных токов получены с применением преобразования Фурье (рис. 11) и алгоритма, основанного на анализе полного спектра токов БТН (рис. 12).

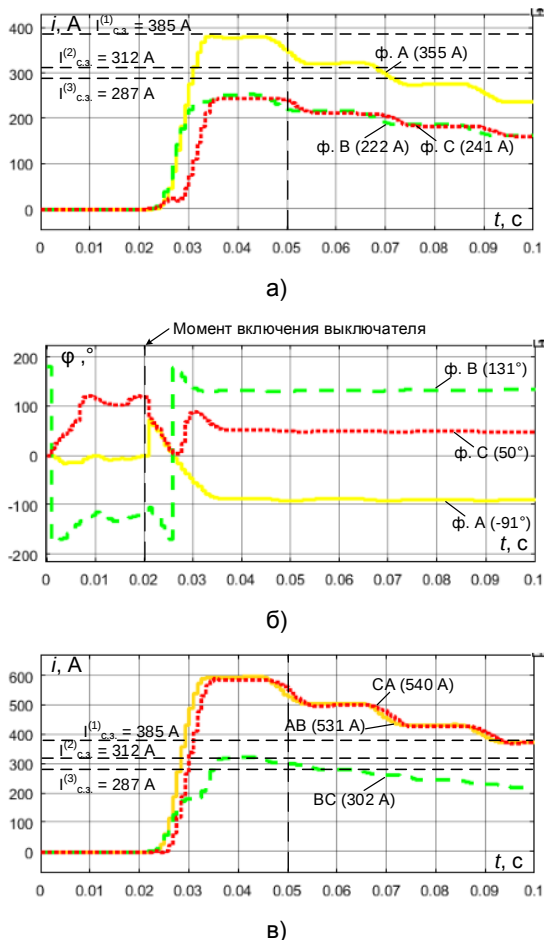


Рис. 11. Результаты расчета электрических величин при БТН (трехфазное включение, алгоритм на основе преобразования Фурье)

Анализ результатов моделирования БТН (рис. 8, 11, 12) показывает, что действующее значение фазного тока при БТН не превышает 600–700 А даже в наиболее неблагоприятных условиях.

Учитывая фильтрующие свойства алгоритма на основе преобразования Фурье, МФТО, отстроенная от длительно допустимых токовых нагрузок ЛЭП (ДДТН), находящихся в диапазоне от 300 до 1000 А для сталеалюминиевых проводов АС-70...АС-400, надежно отстраивается и от БТН.

В связи с этим условия отстройки по выражениям (3)–(5)⁸ целесообразно применять только в случае, если МФТО нормально выведена из работы и вводится только при опробовании ЛЭП. Такое наблюдается (в энергосистемах Ивановской и Костромской обл., в частности), если МФТО не обладает чувствительностью к КЗ вблизи места установки защиты в режиме, когда защищаемая ЛЭП включена с обеих сторон.

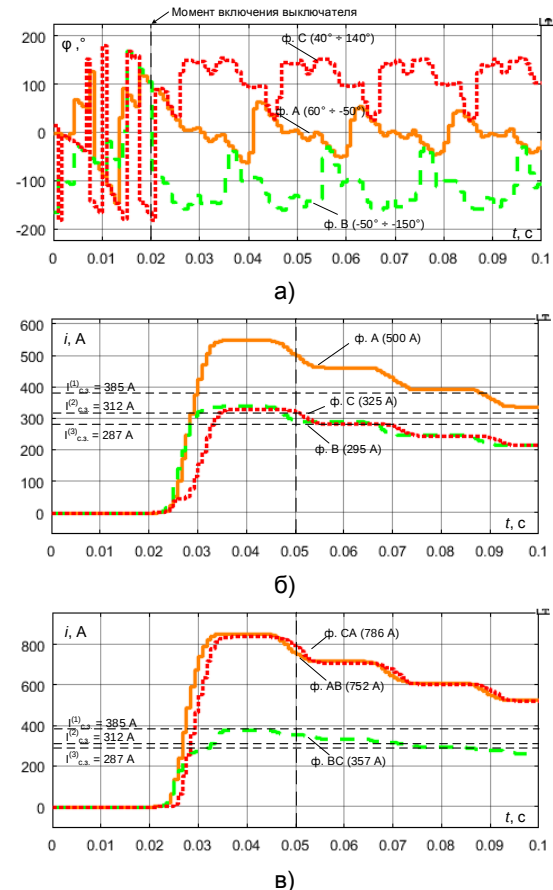


Рис. 12. Результаты расчета электрических величин при БТН (трехфазное включение, алгоритм на основе анализа полного спектра)

Следует иметь в виду, что расчетные условия по выражениям (3)–(5) актуальны только для МФТО, измеряющих фазные токи.

⁸ Методические указания по расчету и выбору параметров настройки резервных токовых защит линий электропередачи 110 кВ и выше. Утв. распоряжением АО «СО ЕЭС» от 10.05.2023 № 61р. – М.: АО «СО ЕЭС», 2023. – 289 с.

В силу искажения фазовых соотношений между фазными токами при БТН (рис. 13), выражения (3)–(5) не могут дать объективного результата расчета уставки пускового токового органа, реагирующего на разности фазных токов. Кроме этого, следует понимать, что указанные фазовые и амплитудные соотношения при всех типах включения делают разности фазных токов при БТН ($I_A - I_B$), ($I_B - I_C$), ($I_C - I_A$) меньше, чем значение $\sqrt{3} \cdot \max(I_A; I_B; I_C)$, что также говорит в пользу исключения указанного расчетного условия из перечня обязательных.

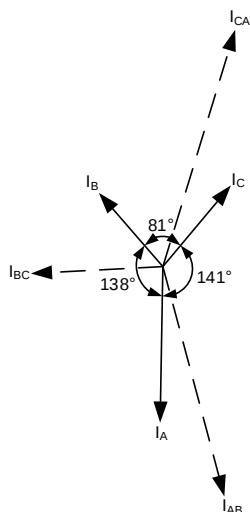


Рис. 13. Векторная диаграмма, иллюстрирующая искажения фазовых соотношений между фазными токами при БТН

Изучение влияния БТН на устойчивость функционирования измерительных органов токовых защит нулевой последовательности ЛЭП 110–750 кВ. Если нейтраль трансформатора заземлена, то в момент включения трансформатора возникает ток нулевой последовательности (рис. 14).

Ток срабатывания ТЗНП по условию отстройки от БТН выбирается по расчетному выражению⁹

$$I_{\text{ос.з}} = \frac{C_5 U_{\text{ном}}}{\sqrt{3} (x_{\text{с1}} + x_{\text{тр.экв}}^{(1)})}, \quad (8)$$

где $C_5 = 0,84$; $x_{\text{с1}}$, $x_{\text{тр.экв}}^{(1)}$ – то же, что и в выражениях (3)–(5).

Анализ полученных результатов (рис. 14) показывает, что измерительный орган тока нулевой последовательности как на основе полного спектра, так и на основе преобразования Фурье в недостаточной степени отстроен от БТН при однофазном включении трансформатора с заземленной нейтралью.

Указанное может привести к ложному срабатыванию пусковых органов ТЗНП ЛЭП 110 кВ,

находящихся в составе протяженных транзитов и имеющих уставки I степени 800–1200 А и несколько ответвительных подстанций.

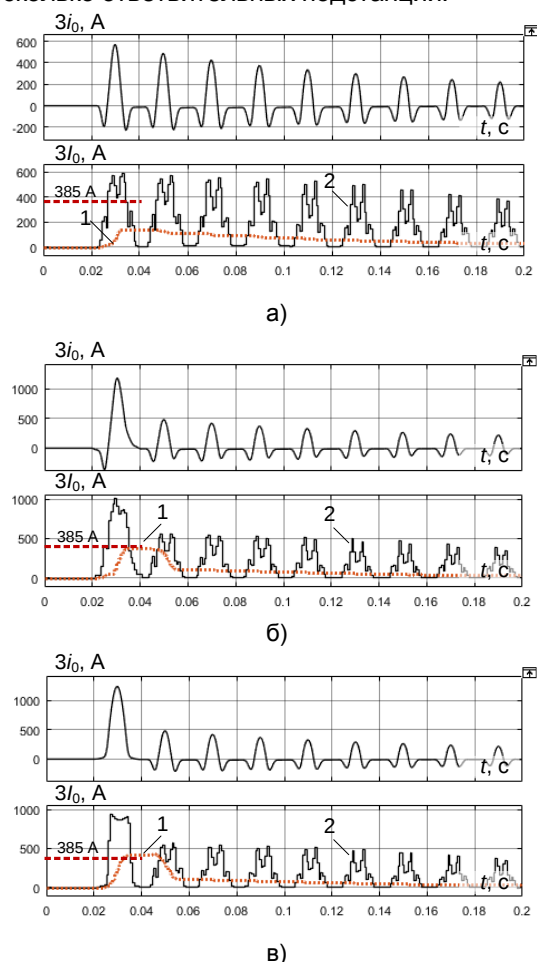


Рис. 14. Осциллограммы токов нулевой последовательности при БТН: а – при трехфазном включении; б – двухфазном включении; в – однофазном включении; 1 – алгоритм на основе преобразования Фурье; 2 – алгоритм на основе полного спектра; 385 А – результат расчета по выражению (8)

Тем не менее следует полагать, что данный вывод актуален только для ненаправленных ступеней ТЗНП; измерительные органы направления мощности ТЗНП функционировать в указанных условиях не будут в силу того, что напряжение, в отличие от тока, сохраняет свой синусоидальный и симметричный характер.

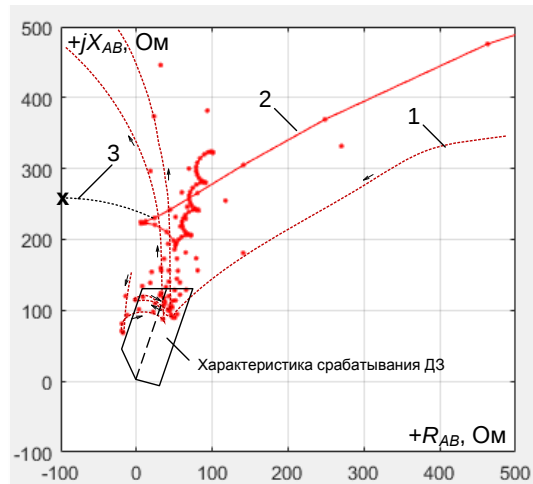
Изучение влияния БТН на устойчивость функционирования измерительных органов сопротивления дистанционных защит ЛЭП 110–750 кВ. Наиболее иллюстративным в данном случае является двухфазное включение защищаемой (исследуемой) ЛЭП (фазы А и В включаются одновременно, фаза С – с запозданием). Замеры получены для измерительного органа на основе фиксации полного спектра токов и напряжений; на основе преобразования Фурье; для замера измерительного органа ДЗ, полученного с помощью расчетных выражений¹⁰ (рис. 15):

⁹ Руководящие указания по релейной защите. Вып. 09. Дифференциально-фазная высокочастотная защита линий 110–330 кВ. – М.: Энергия, 1972. – 115 с.

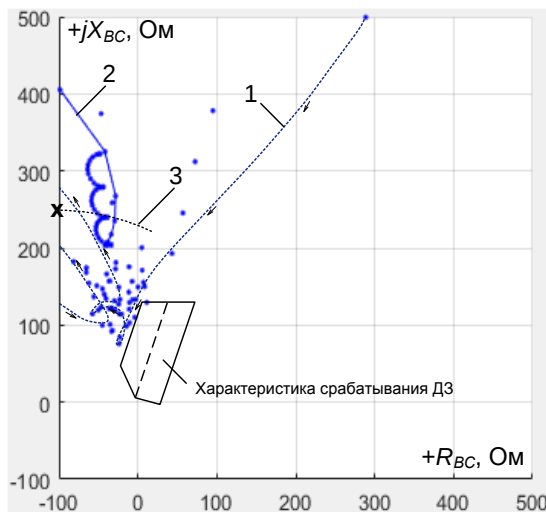
¹⁰ Там же.

$$Z_{c.3} = C_9 (x_{c1} + x_{тр.эКВ}^{(1)}) - x_{c1}, \quad (9)$$

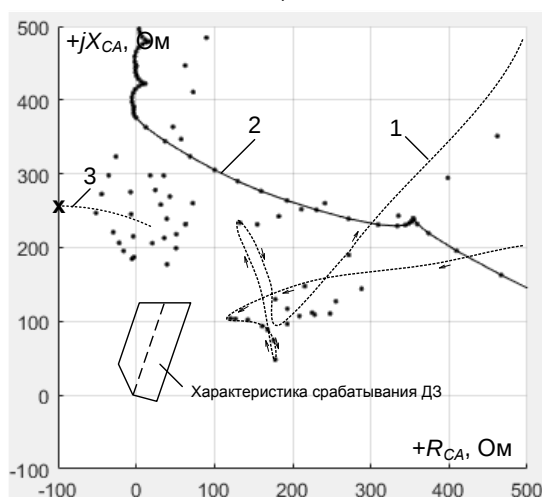
где $C_9 = 1,75$; x_{c1} , $x_{тр.эКВ}^{(1)}$ – то же, что и в (3)–(5).



а)



б)



в)

Рис. 15. Плоскости в осях комплексного сопротивления, иллюстрирующие замеры различных алгоритмов измерительных органов: 1 – полный гармонический спектр электрической величины; 2 – преобразования Фурье; 3 – замер, полученный на основе расчетного выражения (9)

На рис. 16 приведены области, в которые попадает замер измерительного органа сопротивления при различной разности подключения фаз выключателя ($\Delta t_{вкл} = 0 \dots 40$ мс, анализируется полный спектр токов и напряжений). Установлено, что при заявленной производителем выключателя величине $\Delta t_{вкл}$ замер петли, включаемой первой (в нашем случае АВ), не зависит от $\Delta t_{вкл}$ и является наиболее определяющим с точки зрения необходимости отстройки измерительного органа от БТН.

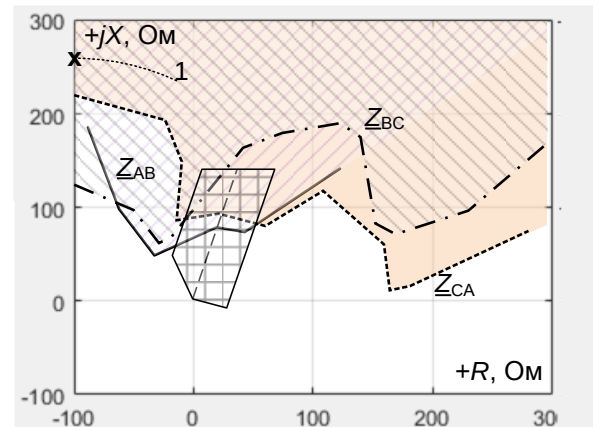


Рис. 16. Области существования режима БТН для различных междуфазных измерительных органов сопротивления при анализе полного спектра токов и напряжений (двухфазное включение АВ, фаза С включается позднее на $\Delta t_{вкл}$)

На рис. 17 приведены области, в которые попадает замер измерительного органа сопротивления при различной разности подключения фаз выключателя ($\Delta t_{вкл} = 0 \dots 40$ мс, орган на основе преобразования Фурье). В данном случае замер петли, включаемой первой (в нашем случае АВ), также не зависит от $\Delta t_{вкл}$, но при этом замер петли ВС зависит от $\Delta t_{вкл}$ и становится столь же определяющим, как и замер петли АВ при $\Delta t_{вкл} = 0 \dots 10$ мс. Вместе с этим алгоритм измерительного органа сопротивления на основе преобразования Фурье в большей степени отстроен от БТН. Следует также отметить, что во всех рассматриваемых случаях использование выражения (9), косвенно полученного на основе анализа полного спектра тока / напряжения, приводит:

- к большему значению замера измерительного органа, чем у реле на основе полного спектра токов и напряжений;

- аналогичному по величине значению замера измерительного органа, чем у реле на основе преобразования Фурье.

Вышеуказанное позволяет сделать вывод о том, что измерительные органы сопротивления быстродействующих защит можно не отстраивать от БТН с использованием выражения

(9) в современных условиях, так как они уже отстроены от него алгоритмически.

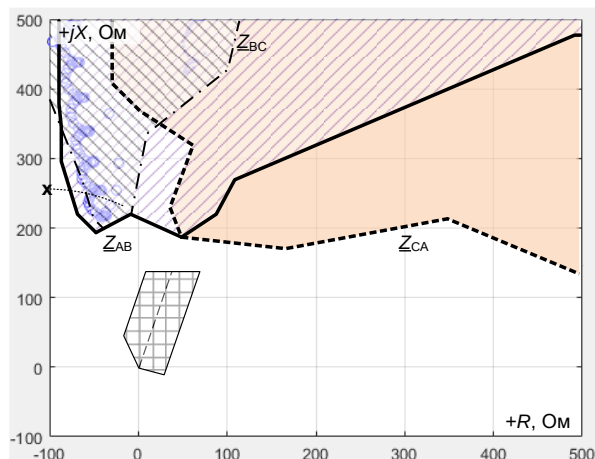


Рис. 17. Области существования режима БТН для различных междуфазных измерительных органов сопротивления при использовании преобразования Фурье (двухфазное включение АВ, фаза С включается позднее на $\Delta t_{\text{вкл}}$)

Выводы. Результаты проведенного исследования дают возможность сделать выводы о целесообразности применения ряда расчетных выражений для выбора параметров настройки токовых и дистанционных защит ЛЭП/трансформаторов, используемых в современных условиях в деятельности энергетических компаний, и тем самым позволяют упростить процесс выбора параметров настройки измерительных органов ряда защит (как основных, так и резервных).

Так, при выборе уставок защит на микропроцессорной элементной базе можно не учитывать расчетные выражения по отстройке от БТН:

- для токовых органов междуфазных токовых отсечек, дифференциально-фазных высокочастотных защит и пр., включенных как на фазные токи, так и на разности фазных токов;

- для дистанционных органов дистанционных защит, высокочастотных защит ЛЭП, дифференциальных защит ЛЭП.

Для измерительных органов тока нулевой последовательности расчетные выражения¹¹ учитывать необходимо.

¹¹ Руководящие указания по релейной защите. Вып. 09. Дифференциально-фазная высокочастотная защита линий 110–330 кВ. – М.: Энергия, 1972. – 115 с.; Методические указания по расчету и выбору параметров настройки дистанционных защит линий электропередачи 110 кВ и выше. Утверждены распоряжением АО «СО ЕЭС» от 17.08.2021 № 89р. – М.: АО «СО ЕЭС», 2021. – 295 с.; Методические указания по расчету и выбору параметров настройки резервных токовых защит линий электропередачи 110 кВ и выше. Утверждены распоряжением АО «СО ЕЭС» от 10.05.2023 № 61р. – М.: АО «СО ЕЭС», 2023. – 289 с.

Список литературы

1. Овчинников В.В. Реле РНТ в схемах дифференциальных защит. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 89 с.
2. Овчинников В.В. Реле РНТ и ДЗТ в схемах дифференциальных защит. Ч. 1. Устройство и конструкции. – М., 2004. – 87 с.
3. Голанцов Е.Б., Молчанов В.В. Дифференциальные защиты трансформаторов с реле типа ДЗТ-21 (ДЗТ-23). – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 86 с.
4. Засыпкин А.С. Релейная защита трансформаторов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 240 с.
5. Бердов Г.В., Засыпкин А.С. Бросок намагничивающего тока в нейтрали силовых трансформаторов при их включении на холостой ход // Научно-технический сборник ВГПИ и НИИ «Энергосетьпроект». Вып. 4. – М.: Энергия, 1971. – С. 35–46.
6. Никитин А.А. Микропроцессорные реле. Основы теории построения измерительной части: учеб. пособие. – Чебоксары: Изд-во НОУ «НОЦ "ЭКРА"», 2016.
7. Oppenheim A.V., Schafer R.W. Discrete-Time Signal Processing. – 3rd Edition. – New Jersey, USA: Prentice Hall, Upper Saddle River, 2010.

References

1. Ovchinnikov, V.V. *Rele RNT v skhemakh differentsial'nykh zashchit* [RNT relay in the schemes of differential protection devices]. Moscow: Energoatomizdat, 1989. 89 p.
2. Ovchinnikov, V.V. *Rele RNT i DZT v skhemakh differentsial'nykh zashchit. Ch. 1. Ustroystvo i konstruktzii* [RNT and DZT relays in the schemes of differential protection devices. Part 1. Design and construction]. Moscow, 2004. 87 p.
3. Golantsov, E.B., Molchanov, V.V. *Differentsial'nye zashchity transformatorov s rele tipa DZT-21 (DZT-23)* [Transformer differential protection device on the basis of DZT-21(DZT-23) device]. Moscow: Energoatomizdat, 1990. 86 p.
4. Zasyppkin, A.S. *Releynaya zashchita transformatorov* [Power transformer relay protection]. Moscow: Energoatomizdat, 1989. 240 p.
5. Berdov, G.V., Zasyppkin, A.S. Brosok namagnichivayushchego toka v neytrali silovyykh transformatorov pri ikh vklyuchenii na kholostoy khod [Magnetizing current inrush in the neutral of power transformers when they are switched on at idle speed]. *Nauchno-tekhnicheskii sbornik VGPI i NII «Energoset'proekt»*. Vyp. 4. [Scientific and technical collection of VGPI and Research Institute "Energoset'proekt". Issue 4]. Moscow: Energiya, 1971, pp. 35–46.
6. Nikitin, A.A. *Mikroprotsessornye rele. Osnovy teorii postroeniya izmeritel'noy chasti* [Microprocessor relays. Fundamentals of the theory of constructing the measuring part]. Cheboksary: Izdatel'stvo NOU «NOTs "EKRA"», 2016.
7. Oppenheim, A.V., Schafer, R.W. *Discrete-Time Signal Processing*. New Jersey, USA: Prentice Hall, Upper Saddle River, 2010.