

Impact of Measuring Part Elements of Transformer Differential Protection on Input Signal Processing

Andreev M.V., Borovikov Yu.S., Gusev A.S., Ruban N.Yu., Suvorov A.S.,
Sulaymanov A.O., Ufa R.A.

National Research Tomsk Polytechnic University
Tomsk, Russian Federation

Abstract. The electric power system (EPS) is a large, multi-parameter, non-linear and dynamic system. The problem of calculation of relay protection (RP) settings has become more urgent nowadays. The situation is exacerbated by the active implementation of renewable energy sources, FACTS, etc., which significantly change the “traditional” EPS and their operating modes. The problem can be solved by deep analysis of functioning of main elements of RP devices in the specific operating conditions and revision of coefficients used in settings calculation. That can be done using RPs detailed mathematical models and modern EPS simulators. The results of the analysis will make it possible to formulate a new methodology for setting up RP. That is a final goal. In the framework of solving this problem, the novel approach for developing RPs’ detailed mathematical models is formulated and theoretically proved. On the basis of this approach, mathematical models of the system “instrumental transformer - auxiliary transformer - analog filter” (measuring part of digital transformer differential protection) for different types of auxiliary current transformers (active and passive) and filters (Butterworth, Chebyshev, Bessel) are developed. A comparative numerical analysis of their frequency and phase responses is carried out, including taking into account the magnetization of instrumental current transformers. Summarizing, the theoretical and practical studies presented in the article allows formulating requirements for RPs’ detailed mathematical models, which will be used in the further research.

Keywords: mathematical simulation, flow graph, settings, relay protection.

Influența elementelor componente de măsurare digitală a protecției diferențiale asupra conversiei semnalului de intrare

Andreev M.V., Borovikov Yu.S., Gusev A.S., Ruban N.Yu., Suvorov A.S.,
Sulaymanov A.O., Ufa R.A.

Instituția autonomă Federală de stat de învățământ superior „Universitatea Națională Politehnică de Cercetare Tomsk “

Tomsk, Federația Rusă

Rezumat. Sistemul electroenergetic (SEE) prezintă un obiect dinamic de mare dimensiune, caracterizat de mulți parametri cu proprietăți de rigiditate și neliniaritate. Definierea setărilor de protecție releu (RE), care să asigure funcționarea corespunzătoare a acestora în condiții specifice de funcționare în sistemul electroenergetic, a fost întotdeauna o sarcină extrem de dificilă. Situația este agravată din cauza implementării active a surselor regenerabile de energie, sistemelor de transmisie flexibile cu curent alternativ, etc., care au schimbat în mod semnificativ SEE „tradiționale“ și regimurile de funcționare ale acestora. Condiția principală pentru rezolvarea acestei probleme este de a avea posibilitatea unei analize complete a funcționării elementelor-cheie ale schemelor de dispozitive de protecție de diferită realizare constructivă pentru condiții concrete de funcționare. Acest lucru se poate face cu utilizarea unor modele matematice detaliate ale sistemelor de protecție și a simulatoarelor moderne ale SEE. Ca parte a soluției acestei probleme autorii au formulat și, teoretic au argumentat abordarea privind crearea de modele matematice detaliate ale protecției prin releu. Pe baza acestei abordări sau sintezat modele matematice în mod colectiv „măsurare transformator - un transformator intermediar - filtru analogic“ (porțiune de măsurare digitală a protecției diferențiale a transformatorului) pentru diferite tipuri de transformatoare de curent intermediare (active și pasive) și filtre (Butterworth, Chebyshev, Bessel), executarea unei analize numerice comparative ale caracteristicilor lor de frecvență, inclusiv, ținând cont de curentul de magnetizare al transformatoarelor de măsură. Studiile teoretice și practice prezentate în articol au fundamentat formularea cerințelor pentru modelele matematice detaliate ale protecției prin releu, care vor fi folosite în viitor.

Cuvinte-cheie: modelare matematică, metoda direcționată a grafelor, setare, protecție releu.

Влияние элементов измерительной части цифровой дифференциальной защиты трансформаторов на преобразование входного сигнала

Андреев М.В., Боровиков Ю.С., Гусев А.С., Рубан Н.Ю., Суворов А.А., Сулайманов А.О., Уфа Р.А.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Томск, Россия

Аннотация. Электроэнергетическая система (ЭЭС) представляет собой большую, многопараметрическую, жесткую, нелинейную и динамическую систему. Определение настроек релейной защиты (РЗ), которые бы обеспечивали их адекватное функционирование в конкретных рабочих условиях в ЭЭС, всегда являлось крайне сложной задачей. Ситуация усугубляется ввиду активного внедрения возобновляемых источников энергии, гибких систем передачи на переменном токе и т.д., которые значительно меняют «традиционные» ЭЭС и режимы их работы. Основным условием решения этой проблемы является наличие возможности полноценного анализа функционирования ключевых элементов схем устройств РЗ различных исполнений в конкретных условиях их работы. Это возможно сделать с использованием детализированных математических моделей РЗ и современных симуляторов ЭЭС. Результаты подобного анализа позволяют сформулировать новую методику настройки РЗ, что и является конечной целью. В рамках решения данной задачи авторами сформулирован и теоретически обоснован подход к созданию детализированных математических моделей РЗ. На базе этого подхода синтезированы математические модели совокупности «измерительный трансформатор - промежуточный трансформатора - аналоговый фильтр» (измерительная часть цифровой дифференциальной защиты трансформатора) для разных типов промежуточных трансформаторов тока (активный и пассивный) и фильтров (Баттерворта, Чебышева, Бесселя), проведен сравнительный численный анализ их частотных характеристик, в том числе с учетом намагничивания измерительных трансформаторов тока. Представленные в статье теоретические и практические исследования позволили обосновано сформулировать требования к детализированным математическим моделям РЗ, которые будут использованы в дальнейшем.

Ключевые слова: математическое моделирование, метод направленных графов, настройка, релейная защита.

Введение

Общеизвестным фактом является стремительный рост энергопотребления в мире. За последние 15 лет прирост составил примерно 35-40% [1, 2] и предпосылок к снижению этих цифр нет. Таким образом, наращивание генерируемых мощностей будет также продолжаться. В итоге, современная электроэнергетическая система (ЭЭС), которая уже на сегодняшний день представляет собой сложную, динамическую, многопараметрическую и нелинейную систему, станет еще сложнее. Ситуация усугубляется за счет увеличения доли распределенной генерации и активного внедрения возобновляемых источников энергии [3]. В соответствии с [2] суммарная генерируемая мощность источников, работающих на энергии ветра и солнца, за последние 15 лет увеличилась более чем на 30 %. Защита ЭЭС в силу указанных изменений становится крайне сложной и актуальной задачей.

Статистика аварийности в ЭЭС [4-7] свидетельствует о том, что, несмотря на значительный прогресс в развитии цифровых систем, по-прежнему причиной тяжелых

аварий в мире являются неправильные действия релейной защиты (РЗ) и автоматики.

Что касается конкретных причин неправильных действий устройств защиты, то примерно 20% [8] их связано с ошибками в схемах и уставках, которые в свою очередь определяются несоответствием настройки защит реальным условиям их функционирования. Проблема неадекватной реальным условиям функционирования настройки и определяющие её факторы рассмотрены авторами в [9, 10].

Очевидным условием решения этой проблемы является возможность детализированного анализа работы ключевых элементов схем устройств РЗ различных исполнений в конкретных условиях их функционирования. Это позволит достаточно достоверно оценивать процессы изменения токов и напряжений в защищаемых объектах, погрешности преобразования в измерительных преобразователях (ИП) – измерительных трансформаторах тока (ИТТ) и напряжения (ИТН), и применяемых РЗ, а также определять на основе результатов этого анализа параметры адекватной настройки РЗ. Обеспечить эту возможность позволяют

адекватные всережимные математические модели средств РЗ, реализующие моделирование одновременно всей совокупности элементов, входящих в состав конкретной РЗ, включая ИТТ и ИТН.

Основным демотиватором создания таких моделей долгое время являлось отсутствие инструментов для полного достоверного моделирования энергосистем. Полнота и достоверность математического моделирования ЭЭС определяется адекватностью применяемых математических моделей основного и вспомогательного оборудования, включая РЗ и ИП, и способностью средств их реализации решать совокупную модель реальной ЭЭС с гарантированной приемлемой точностью. Математическое описание силового оборудования ЭЭС уже известно и доступно в открытых литературных источниках. Основная проблема заключается в средствах реализации этих описаний и определяется проблематикой применяемых численных методов интегрирования дифференциальных уравнений, описывающих процессы в оборудовании и ЭЭС в целом [11-14]. Альтернативным по отношению к обозначенному является комплексный подход, практической реализацией которого является многопроцессорная программно-аппаратная система – Всережимный моделирующий комплекс реального времени ЭЭС (ВМК РВ ЭЭС) [15].

По мнению авторов, применение ВМК РВ ЭЭС в совокупности с детализированными математическими моделями РЗ открывает возможность более глубокого изучения процессов в цепях РЗ и формирования методик по их настройке. В качестве объекта исследований выбрана цифровая дифференциальная защита трансформаторов (ЦДЗТ), поскольку авторы уже имели опыт работы с данным видом РЗ. Кроме того ЦДЗТ относится к разряду основных защит и представляет значительный интерес в плане изучения.

Статья имеет следующую структуру. В Секции 1 кратко обозначен подход к созданию детализированных математических моделей РЗ. В Секции 2 представлены частотные характеристики моделируемых элементов ЦДЗТ, исследуемой в рамках данной работы. По данным характеристикам верифицировалась математическая модель ЦДЗТ. Секция 3 посвящена исследованию

математической модели ЦДЗТ в частотном спектре и оценке влияния отдельных элементов измерительной части ЦДЗТ на преобразование входного сигнала. В Секции 4 представлено обсуждение полученных результатов, сформулировано общее заключение и обозначены дальнейшие планы работы.

I. РАЗРАБОТКА ДЕТАЛИЗИРОВАННЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

А. Методика создания детализированных моделей релейной защиты

Авторами сформулирован и обоснован подход к разработке детализированных всережимных математических моделей РЗ, которые достаточно полно и достоверно воспроизводят процессы в конкретных реализациях и ИП. Положения этого подхода представлены, например в [9]. Поэтому в данной публикации лишь кратко обозначены основные моменты:

1) *Основой для математического описания РЗ является схема замещения:* Схема замещения составляется на базе принципиальной схемы РЗ. При этом РЗ и ИП (ИТТ и ИТН) моделируются совместно как единое целое.

2) *Формирование математических моделей РЗ:* На основе схем замещения составляются математические описания в виде передаточных функций (ПФ) РЗ, включая ИП. Эти ПФ позволяют проводить частотный анализ элементов моделируемой защиты и формировать определяющие их дифференциальные уравнения, образующие всережимную математическую модель воспроизводимой защиты. Одним из наиболее эффективных методов получения ПФ является метод направленных графов [16]. Для составления ПФ схемы РЗ возможны два подхода.

а) Полная схема замещения: моделировать схему РЗ, включая ИП, как единое целое.

б) Разделенная схема замещения: разделить принципиальную схему и соответственно схему замещения на функциональные фрагменты, а затем последовательно математически описывать каждый такой фрагмент с учетом всех взаимосвязей.

Недостатком первого варианта является то, что при моделировании относительно больших схем с переменными параметрами математическая модель получается громоздкой и сложной. Второй вариант позволяет создать гибкую модель для любой схемы РЗ, однако, увеличивается шанс появления ошибки при эквивалентировании схемы.

В рамках предыдущих исследований [9, 10] авторами избирался второй вариант. Выбор был связан с моделированием наряду с цифровыми РЗ (ЦРЗ) электромеханических и электронных РЗ, итоговый направленный граф которых получался очень громоздкий с множеством некасающихся контуров. Составление ПФ на его основе представляло крайне сложную задачу. Поскольку автоматизировать процесс перебора контуров для формулы Мэсона [16] не представлялось возможным, возрастал шанс ошибки. Кроме того, численный расчет такой ПФ приводил к «зависанию» расчетных программ. В итоге было выбрано единое направление для всех элементных баз.

И всё же, по мнению авторов, первый подход предпочтителен, поскольку также как и второй позволяет определять напряжение и ток в любой точке схемы замещения, но в отличие от второго подхода – исключает необходимость постоянно заботиться об адекватном учете взаимосвязей конкретного функционального элемента. Все связи учитываются естественным образом при моделировании схемы целиком. Именно данный подход авторы применили при выполнении представленных в статье исследований.

В настоящее время активно продолжается внедрение ЦРЗ в энергосистемах во всем мире. Поэтому внимание исследователей сместилось в сторону них. В рамках данной статьи авторы также сосредоточились на моделировании ЦРЗ.

В. Разработка математической модели цифровой защиты

Любая ЦРЗ вне зависимости от вида и типа имеет одинаковую структуру, содержащую три последовательно объединённых части [17]:

- Измерительная часть (ИЧ) – содержит ИТТ (ИТН), промежуточные преобразователи (ПП) и аналоговые

частотные фильтры, как правило, фильтры низких частот (ФНЧ).

- Преобразовательная часть (ПЧ) – содержит аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) и коммутирующий блок, обеспечивающий поочередную выборку мгновенных значений и их запоминание на время, необходимое для правильной работы АЦП.
- Вычислительно-логическая часть (ВЛЧ) – содержит микропроцессор, реализующий множество функций: цифровая фильтрация, преобразование в вектора, реализация алгоритма РЗ и т.д., а также выходные цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП) и аналоговые реле.

Очевидно, что погрешности ПЧ определяются аппаратными характеристиками (главным образом разрядностью) АЦП и могут быть учтены достаточно точно при создании совокупной модели ЦРЗ. Методики определения этих погрешностей известны и описаны в литературе.

Микропроцессор в составе ВЛЧ ввиду высокого качества современного производства можно считать идеальным, т.е. можно отбросить аппаратные погрешности. Что касается ЦАП, то ситуация здесь аналогичная АЦП. Говоря о выходных аналоговых реле, на сегодняшний день существуют достаточно подробные математические описания электромеханических реле, которые могут быть применены для учета выходных реле ЦРЗ. С другой стороны – функция выходных аналоговых реле заключается, по сути, в формировании дискретного сигнала (1 – срабатывание или 0 – несрабатывание РЗ) и, по мнению авторов, нет необходимости такого усложнения модели ЦРЗ за счет их детального моделирования. Для учета погрешностей достаточно знать время работы (паспортные данные) реле и ввести соответствующую задержку срабатывания на выходе ЦРЗ.

Основной акцент при моделировании ЦРЗ следует сделать на детализированное моделирование ИЧ. Данный вывод подкрепляется и другими исследованиями, например [18-26].

Возникает вопрос: что и как нужно учитывать в ИЧ?

В статье [22] автор пишет, что неучет ПП не влияет на точность результатов моделирования РЗ в целом. К аналогичным упрощениям прибегают и другие исследователи [23, 26]. Что касается аналоговых ФНЧ, то тут прослеживается неопределённость при их выборе, поскольку детальная информация в фирменных руководящих указаниях по ЦРЗ отсутствует. При этом в соответствии с литературными источниками есть несколько типов аналоговых фильтров, которые потенциально могут использоваться в ЦРЗ: 1) ФНЧ Баттерворта 3-его порядка [24]; 2) ФНЧ Баттерворта 4-ого порядка; 3) ФНЧ Чебышева, ФНЧ Бесселя, эллиптический фильтр [25]. В [22] использовался фильтр 2-ого порядка.

Однако авторам не удалось найти публикации, содержащие конкретные данные, подтверждающие обоснованность выводов о неучете какого-то из указанных элементов или незначительности его влияния на работу ЦРЗ в целом. По этой причине было решено провести исследования и ответить на поставленный вопрос применительно к ЦДЗТ. Некоторые фрагменты полученных ранее результатов исследований математической модели ЦДЗТ уже опубликованы, например в [9]. Созданная ранее модель, однако, реализует лишь простейший аналоговый ФНЧ и один вид ПП – пассивный трансформатор тока (ПТТ). Эти результаты не дают ответа на поставленный вопрос.

Первоначально необходимо было создать математическую модель ИЧ на базе разработанного подхода. Из многообразия ФНЧ и ПТТ сформированы следующие сочетания ИЧ ЦДЗТ: 1) ИТТ-активный ПТТ-ФНЧ Баттерворта 3-его порядка; 2) ИТТ-активный ПТТ-ФНЧ Баттерворта 1-ого порядка; 3) ИТТ-активный ПТТ-ФНЧ Чебышева 3-его порядка; 4) ИТТ-активный ПТТ-ФНЧ Бесселя 3-его порядка; 5) ИТТ-пассивный ПТТ-ФНЧ Баттерворта 3-его порядка; 6) ИТТ-пассивный ПТТ-ФНЧ Баттерворта 1-ого порядка; 7) ИТТ-пассивный ПТТ-ФНЧ Чебышева 3-его порядка; 8) ИТТ-пассивный ПТТ-ФНЧ Бесселя 3-его порядка. Для проведения сравнительного анализа для всех сочетаний составлены схемы замещения и направленные графы, как для примера показано на рисунке 1.

Рисунок 1 содержит следующие обозначения: Z_{1TA} , Z_{2TA} , Z_{mTA} – полные сопротивления соответственно первичной, вторичной обмоток и цепи намагничивания ИТТ; Z_{1TAL} , Z_{2TAL} , Z_{mTAL} – полные сопротивления соответственно первичной, вторичной обмоток и цепи намагничивания ПТТ; R_{IM} – сопротивление встроенного измерительного резистора активного ПТТ; R_1 , R_2 , R_3 , R_4 , R_5 – сопротивления резисторов в составе ФНЧ Чебышев 3-его порядка; C_1 , C_2 , C_3 – емкости конденсаторов в составе ФНЧ Чебышев 3-его порядка; R_{FL} – сопротивление нагрузки ФНЧ; Y_{1TA} , Y_{2TA} , Y_{mTA} , Y_{1TAL} , Y_{2TAL} , Y_{mTAL} , Y_{RIM} , Y_{R1} , Y_{R2} , Y_{R3} , Y_{R4} , Y_{R5} , Y_{C1} , Y_{C2} , Y_{C3} –

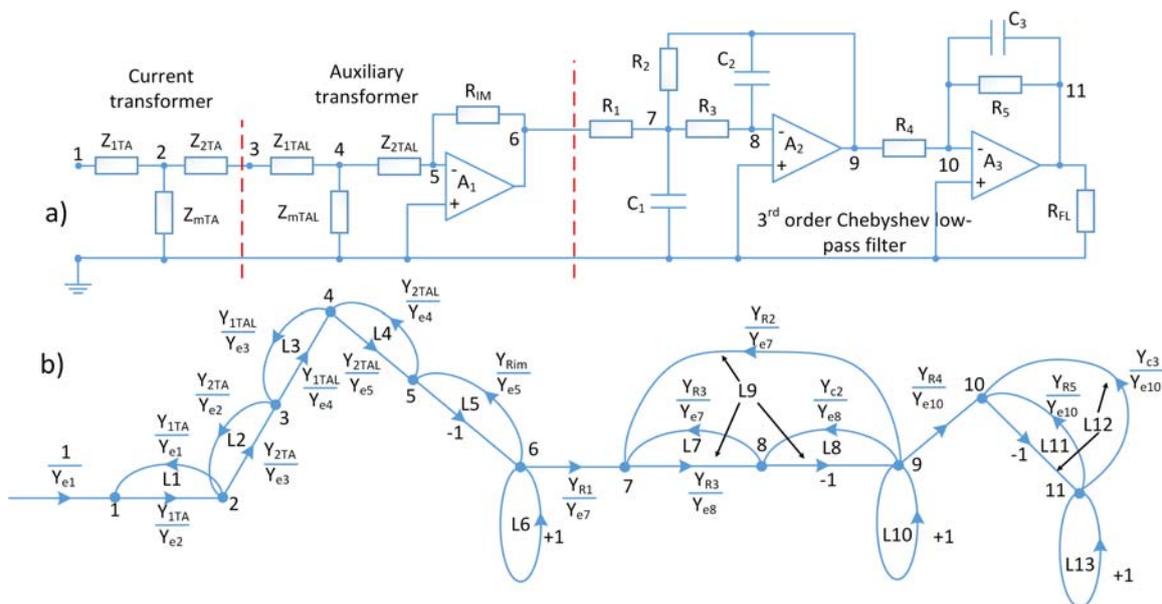


Рис.1. Схема замещения (а) и направленный граф (б).

проводимости соответствующих элементов схемы замещения; $Y_{e1}, Y_{e2}, Y_{e3}, Y_{e4}, Y_{e5}, Y_{e6}, Y_{e7}, Y_{e8}, Y_{e9}, Y_{e10}, Y_{e11}$ – эквивалентные проводимости соответствующих узлов схемы замещения; $L1, L2, L3, L4, L5, L6, L7, L8, L9, L10, L11, L12, L13$ – коэффициенты передачи контуров направленного графа [16].

II. ВЕРИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Применяются два основных подхода к получению достоверных математических моделей РЗ:

- Сравнение результатов функционирования математической модели и реального устройства.
- Сравнение полученных характеристик отдельных узлов модели с теоретическими сведениями, доступными в открытых источниках.

Первый подход сложно реализуем ввиду ряда факторов, в частности, сложности извлечения информации в конкретных узлах реального устройства, а также отсутствия доступа к оборудованию. Для получения достоверной модели ЦДЗТ использован второй подход. В связи с отсутствием возможности найти всю необходимую информацию, численные значения элементов схем замещения ИЧ выбирались таким образом, чтобы амплитудно-частотные (АЧХ) и фазо-частотные (ФЧХ) характеристики отдельно взятых ФНЧ (Рис. 2 и Рис. 3), ПТТ (Рис. 4 и Рис. 5) и ИТТ (Рис. 6 и Рис. 7) были максимально близки к теоретическим. Размерностью для модуля ПФ $|W(j\omega)|$ во всех представленных АЧХ является Ом, поскольку входной сигнал – ток, выходной – напряжение. Как известно, ПФ – это отношение выходного сигнала к входному.

Теоретические характеристики фильтров, по которым осуществлялась верификация представлены в [27].

Следует отметить, что ФЧХ активного ПТТ сдвинуто на ± 180 градусов на рисунке 5.

Исследования частотных характеристик реальных трансформаторов тока, которые были взяты за эталон, представлены в [28-30].

Сравнительный анализ модельных АЧХ и ФЧХ показал их соответствие теоретическим.

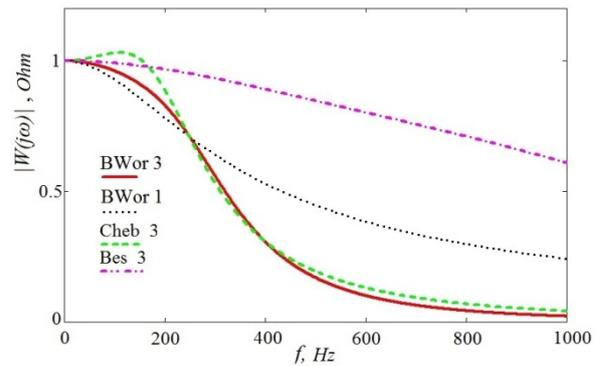


Рис.2. АЧХ ФНЧ: BWor 3 – ФНЧ Баттерворта 3-го порядка, BWor 1 – ФНЧ Баттерворта 1-го порядка, Cheb 3 – ФНЧ Чебышева 3-го порядка, Bes 3 – ФНЧ Бесселя 3-го порядка.

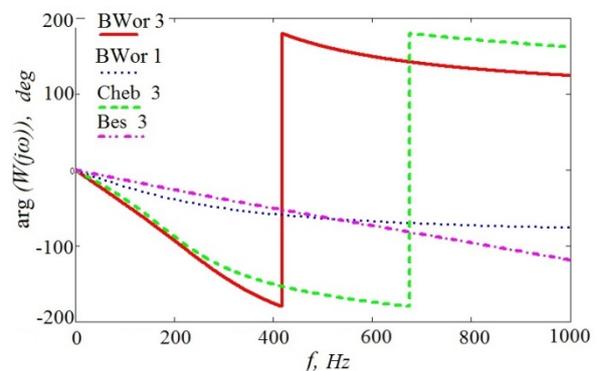


Рис.3. ФЧХ ФНЧ.

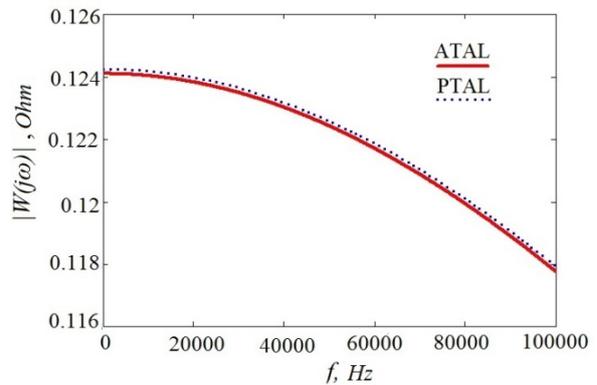


Рис.4. АЧХ ПТТ: ATAL – активный ПТТ, PTAL – пассивный ПТТ.

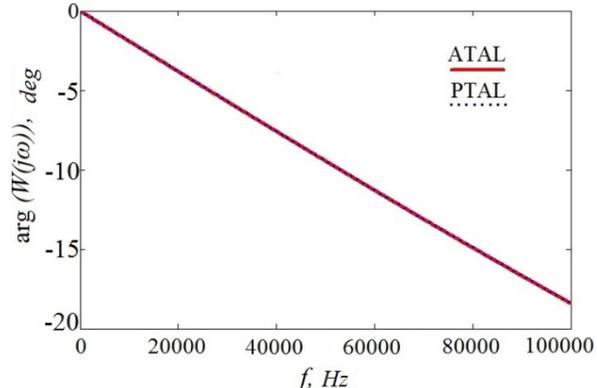


Рис.5. ФЧХ ПТТ.

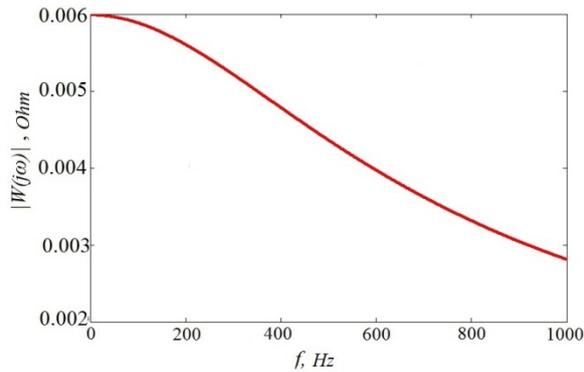


Рис.6. АЧХ ИТТ.

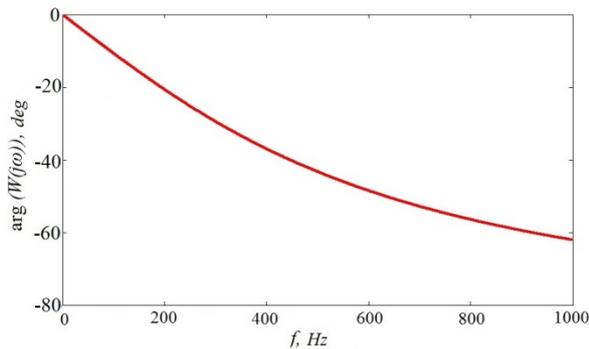


Рис.7. ФЧХ ИТТ.

III. ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Выводы о влиянии того или иного ФНЧ и ПТТ на преобразование входного сигнала ИЧ делались на основании их АЧХ и ФЧХ. Номера характеристик на рисунках 8-13 соответствуют последовательностям сочетаний ИТТ, ПТТ и ФНЧ, названных ранее. Как было сказано ранее, ПФ учитывают всю схему ИЧ. При этом для анализа поведения каждого отдельного элемента ИЧ «прямой путь» [16], учитываемый при составлении ПФ, ограничивался до выхода соответствующего элемента ИЧ: ИТТ, ПТТ и ФНЧ.

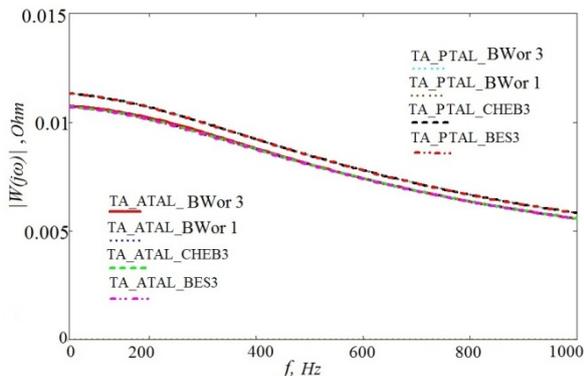


Рис.8. АЧХ ПФ «ИТТ-ПТТ-ФНЧ» (от входа ИТТ до выхода ИТТ).

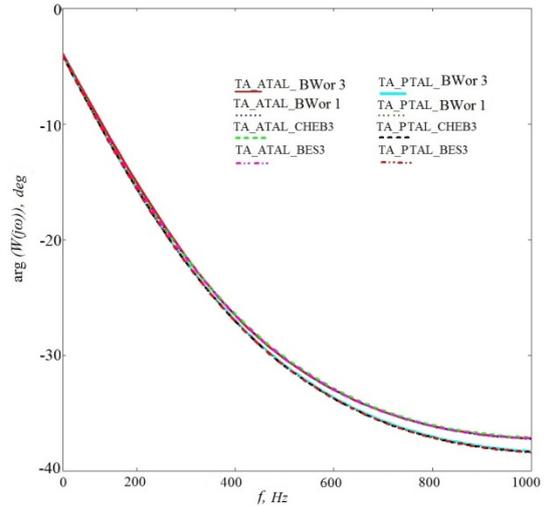


Рис.9. ФЧХ ПФ «ИТТ-ПТТ-ФНЧ» (от входа ИТТ до выхода ИТТ).

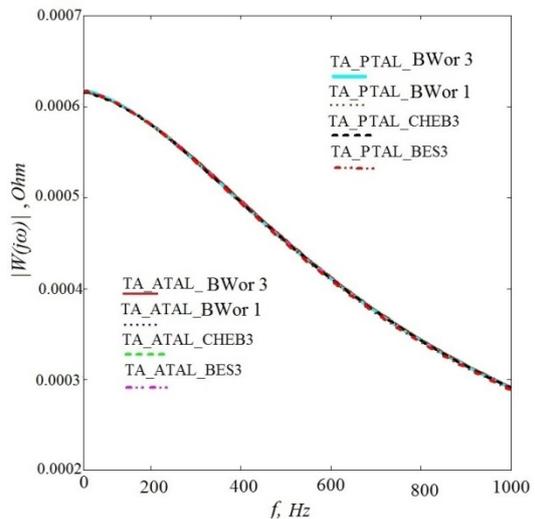


Рис.10. АЧХ ПФ «ИТТ-ПТТ-ФНЧ» (от входа ИТТ до выхода ПТТ).

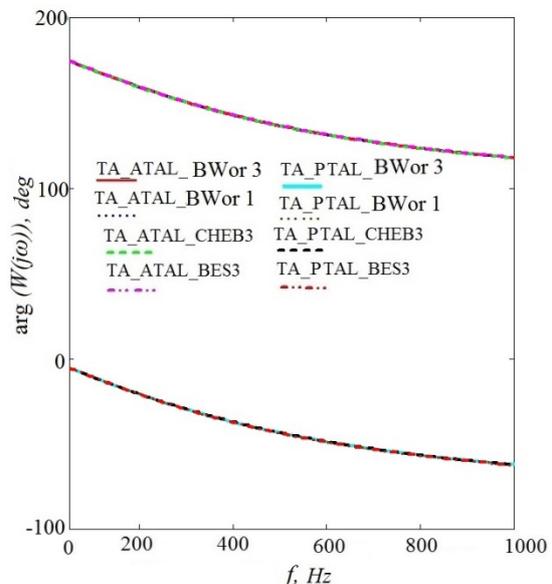


Рис.11. ФЧХ ПФ «ИТТ-ПТТ-ФНЧ» (от входа ИТТ до выхода ПТТ).

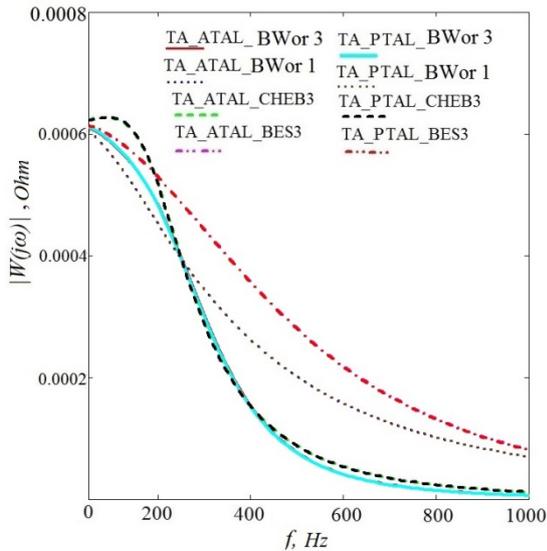


Рис.12. АЧХ ПФ «ИТТ-ПТТ-ФНЧ» (от входа ИТТ до выхода ФНЧ)

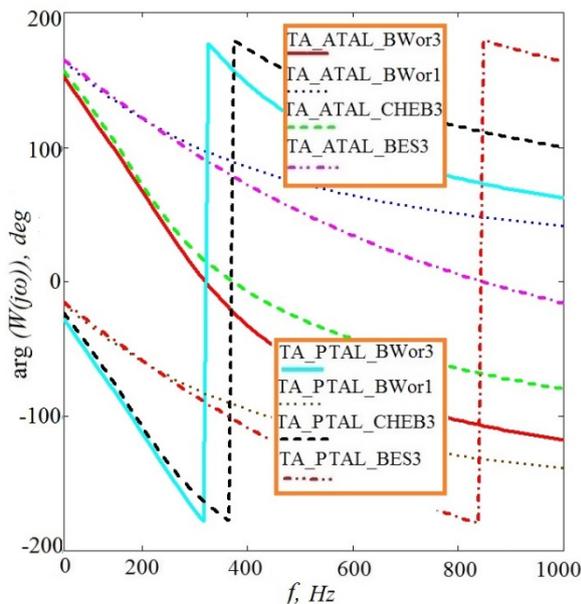


Рис.13. ФЧХ ПФ «ИТТ-ПТТ-ФНЧ» (от входа ИТТ до выхода ФНЧ)

Хорошо известен факт значительного влияния процесса намагничивания ИТТ на преобразование входного ИЧ и работу ЦДЗТ в целом. В схемах замещения ИТТ потери на намагничивание учтены соответствующим сопротивлением Z_{mTA} . Для получения выше представленных характеристик данное сопротивление фиксировалось значением 1000 Ом. Однако для анализа влияния нелинейности цепи намагничивания построены трехмерные зависимости (Рис. 14b Рис. 15 and Рис. 16). На них представлены

распределения ПФ (модуль ПФ $|W(j\omega)|$ – ось Z) в зависимости от сопротивления цепи намагничивания ИТТ (Z_μ – ось X) и частоты входного сигнала (f – ось Y).

Зависимости на рисунках 14 и 15 схожи по характеру изменения. Зависимость на рисунке 15 перевернута осознанно с целью продемонстрировать её «обратную сторону».

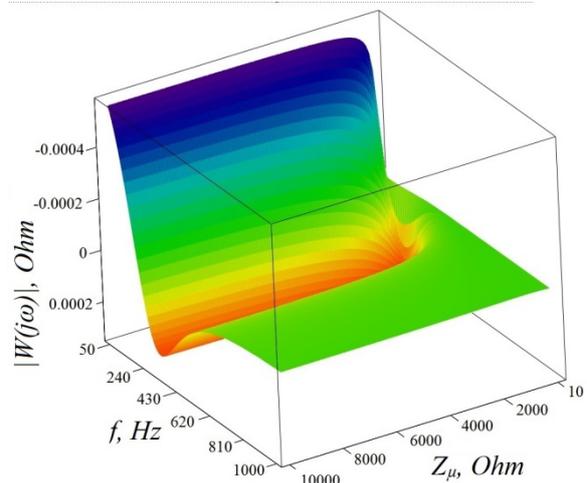


Рис.14. Трехмерная зависимость $|W(j\omega)| = f(Z_\mu, f)$ ПФ «ИТТ-активный ПТТ-ФНЧ Баттерворта 3-его порядка»

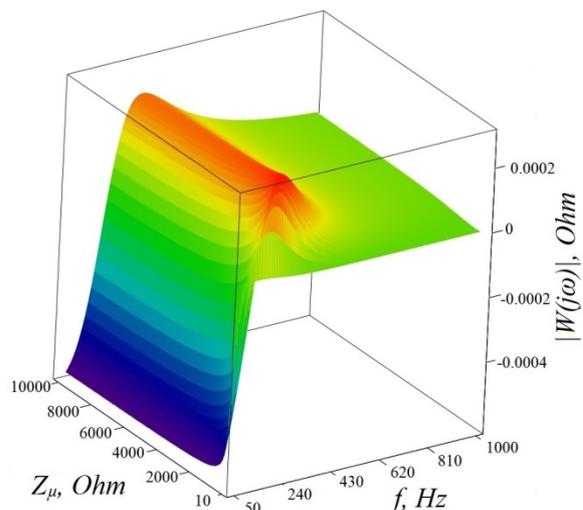


Рис.15. Трехмерная зависимость $|W(j\omega)| = f(Z_\mu, f)$ ПФ «ИТТ-активный ПТТ-ФНЧ Чебышева 3-его порядка»

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

A. Обсуждение результатов

По рисункам 8 и 9 можно оценить, как изменится амплитуда и фаза напряжения на выходе ИТТ при подключении различных

нагрузок. Важно отметить расхождение как АЧХ, так и ФЧХ ИТТ для случаев подключения активного и пассивного ПТТ, питающих одинаковые фильтры. Однако далее это различие нивелируется, поскольку в соответствии с рисунком 10 АЧХ активного и пассивного ПТТ практически полностью совпадают. Это ожидаемо, вследствие принятого допущения: сопротивление резистора во вторичной цепи пассивного ПТТ, служащего для преобразования тока в напряжение, задавалось таким образом, чтобы обеспечить максимальную близость АЧХ активного и пассивного ПТТ. Однако, в реальности, едва ли может быть достигнуто, ввиду невозможности точного «подгона» нагрузочного сопротивления пассивного ПТТ. ФЧХ (рисунок 11) активного и пассивного ПТТ различаются на 180 градусов, поскольку активный ПТТ содержит операционный усилитель, инвертирующий входной сигнал.

Главным выводом, вытекающим из анализа характеристик на рисунках 12 и 13, является осязаемое различие как по амплитуде (рисунок 12), так и по фазе (рисунок 13) выходного напряжения совокупности «ИТТ-ПТТ-ФНЧ» для разных фильтров и ПП. Это наблюдается в полосе пропускания, а также в полосе подавления ФНЧ. Частота среза для всех ФНЧ принята равной 250 Гц. Скачкообразное изменение аргументов ФЧХ ПФ «ИТТ-ПТТ-ФНЧ» (рисунок 13) объясняется достижением ФНЧ частоты резонанса, причем для случаев, когда используется активный ПТТ, это происходит позднее (на частоте > 10 кГц – не показано на рисунке), чем при использовании пассивного ПТТ (на частоте < 1 кГц). Данное явление объясняется наличием операционного усилителя с обратной связью в составе активного ПТТ.

Вышесказанное наводит на мысль о том, что для адекватного моделирования ЦРЗ в целом нужно иметь четкое понимание о конкретной реализации ПТТ и ФНЧ. Кроме того при более адекватном учете влияния цепей намагничивания расхождения будут намного больше. Сказанное подтверждается рисунками 14 и 15: рисунок 14 – сочетание «ИТТ-активный (пассивный) ПТТ-ФНЧ Баттерворта 3-его порядка»; рисунок 15 – сочетание «ИТТ-активный (пассивный) ПТТ-ФНЧ Чебышева 3-его порядка». Для случая включения пассивного ПТТ (не представлено в статье) с теми же ФНЧ характеристики

выглядят аналогично, если исключить инверсию операционного усилителя активного ПТТ. Рисунки 14 и 15, по сути, отражают изменение выходного сигнала ИЧ в зависимости от увеличения частоты входного сигнала и при этом уменьшения сопротивления цепи намагничивания (намагничивание и насыщение) ИТТ, т.е. то, что происходит при коротком замыкании. Из рисунков четко видно, что существенные различия между модулями ПФ совокупностей «ИТТ-ПТТ-ФНЧ Чебышева» и «ИТТ-ПТТ-ФНЧ Баттерворта» наблюдаются как в полосе пропускания, так и в полосе подавления. Однако, в полосе подавления различия значительнее, особенно в режиме близком к насыщению ИТТ. Сравнение этих зависимостей (рисунок 16) более наглядно отражает различие: «цветной сплошной график» – ПФ «ИТТ-ПТТ-ФНЧ Баттерворта», «черный сетчатый график» – ПФ «ИТТ-ПТТ-ФНЧ Чебышева».

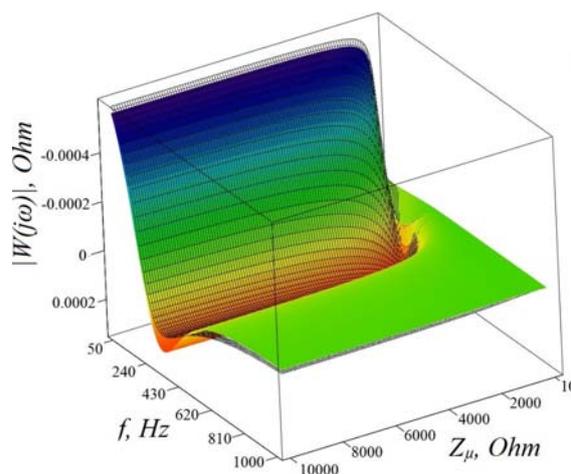


Рис.16. Сравнение зависимостей $|W(j\omega)|=f(Z_\mu, f)$ для ПФ «ИТТ-активный ПТТ-ФНЧ Чебышева 3-его порядка» и ПФ «ИТТ-активный ПТТ-ФНЧ Баттерворта 3-его порядка»

В. Общие выводы по работе

Подводя итог, можно сформулировать следующие основные выводы:

1. Детализированная математическая модель любой цифровой РЗ обязательно должна включать в себя все элементы ИЧ, ПЧ и ВЛЧ, названные ранее. Теоретически доказано, что элементы ИЧ наиболее значительно влияют на работу РЗ в целом и нуждаются в более детальном учете при моделировании РЗ.

2. Численно доказано, что влияние дополнительных элементов ИЧ (ПП и ФНЧ) на преобразование входного сигнала и, потенциально, на функционирование любой ЦРЗ в целом даже с учетом принятых упрощений оказывается существенным. Кроме того, это влияние в значительной степени определяется конкретным видом ПП и ФНЧ, что также было продемонстрировано. Даже на основании полученных частотных характеристик можно опровергнуть мнение о возможности «безболезненного отбрасывания» этих дополнительных элементов при моделировании РЗ.

3. Отсутствие детальной информации о видах ФНЧ и ПП, по мнению авторов, не мешает сформулировать общие положения соответствующих методик настройки РЗ. Решение данной задачи является целью дальнейших исследований. Однако для использования созданных в соответствии с предлагаемым подходом математических моделей РЗ для настройки конкретных терминалов защиты эти сведения крайне важны.

ACKNOWLEDGMENT

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, Госзадание «Наука» №13.5852.2017/БЧ тема: «Разработка концепции всережимной верификации расчётов режимов и процессов в электроэнергетических системах и средств её реализации».

Литература (References)

- [1] A. V. Grigoriev, and A. M. Schafran, *Elektroenergetika Rossii: zhizn' posle reformy* [Electric power industry saffron branch: the reforming purposes are how realized?], *Management and business administration*, no.1, pp. 62-71. Available at: <http://ipem.ru/news/publications/630.html> (accessed 23.06.2017) (in Russian).
- [2] “International energy outlook 2016”, U.S. Energy Information Administration. Available at: <http://www.eia.gov/forecasts/ieo/world.cfm> (accessed 15.06.2017)
- [3] K. Jennett, F. Coffele, and C. Booth, “Comprehensive and quantitative analysis of protection problems associated with increasing penetration of inverter-interfaced DG”, in *Proc. Developments in Power Systems Protection (DPSP 2012) Conf.*, Birmingham, UK, 2012, pp. 1-6.
- [4] J. Sykes, V. Madani, J. Burger, M. Adamiak and W. Premerlani, “Reliability of protection systems (what are the real concerns)”, in *Proc. Protective Relay Engineer Conf.*, College Station, TX, USA, 2010, pp. 1–16.
- [5] V. I. Gurevich, *Problemy ocenki nadezhnosti relejnoj zashchity* [Problems of estimation of reliability of relay protection], *Electricity*, 2011, no. 2, pp. 28-31.
- [6] G. H. Kjolle, J. Heggset, B. T. Hjartsjo, and H. Engen, "Protection system faults 1999 – 2003 and the influence on the reliability of supply", in *Proc. IEEE Power Tech Conf.*, St. Petersburg, Russia, 2005, pp. 1-6.
- [7] G. H. Kjolle, O. Gjerde, B. T. Hjartsjo, H. Engen, L. Haarla, L. Koivisto, P. Lindblad, “Protection system faults - a comparative review of fault statistics”, in *Proc. Probabilistic Methods Applied to Power Systems*, Stockholm, Sweden, 2006, pp. 1-7.
- [8] V. A. Kuzmichev, E. V. Konovalova, S. N. Sakharov, A. Yu. Zakharenkov, *Retrospektivnyj analiz raboty ustrojstv RZA v ENES* [Retrospective analysis of operation of relay protection and automatic equipment in the Russian Power System], *Obshchie voprosy ehlektroenergetiki*, 2014, no. 7, pp. 5-10.
- [9] M. V. Andreev, A. O. Sulaymanov and A. S. Gusev, “Simulation of differential protections of transformers in power systems”, in *Proc. Developments in Power Systems Protection (DPSP 2016) Conf.*, Edinburgh, UK, 2016, pp.1–6.
- [10] M. V. Andreev, Yu. S. Borovikov, and N. Yu. Ruban, “Study of impact of relay protections operation on transients in electric power systems using mathematical simulation”, in *Proc. 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST 2016)*, Novosibirsk, Russia, 2016, pp.187–190.
- [11] G. Hall and J. M. Watt, “Stiff problems”, in *Modern numerical methods for ordinary differential equations*, Oxford, UK: Clarendon Press, 1976, pp. 123–208.
- [12] J. C. Butcher, “Differential and difference equations” in *Numerical methods for ordinary differential equations: early days in the birth of numerical analysis*, 2nd ed., Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2008, pp. 1–49.
- [13] N. Watson and J. Arrillage, “Numerical integrator substitution”, in *Power Systems Electromagnetic Transients Simulation*, London, UK: The Institution of Engineering and Technology, 2003, pp. 67–98.

- [14] E. Hairer, and G. Wanner, "Examples of stiff equations" in *Solving Ordinary Differential Equations: stiff and differential algebraic problems*, vol. 14, Germany, Berlin: Springer, 1996, pp. 2–14.
- [15] M. V. Andreev, A. A. Suvorov, and A. O. Sulaymanov, "Universal mathematical model of three-phase electrical transmission lines", in *Proc. 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST 2016)*, Novosibirsk, Russia, 2016, pp. 172–176.
- [16] J. R. Abrahams and G. P. Coverley, "Operations with a Flow Graph", in *Signal flow analysis*, 1st ed., Oxford, UK: Pergamon press, 1965, pp. 31–46.
- [17] G. Ziegler, "Transformer differential protection" in *Numerical Differential Protection*, 2nd ed., Erlangen, Germany: Publicis Publishing, 2012, pp. 167–190.
- [18] A. M. Carter, D. C. Humphreys, A. Dysko, and J. R. McDonald, "Practical use of a dynamic protection modelling system", in *Proc. Developments in Power Systems Protection (DPSP 2001) Conf.*, 2001, pp. 391–394.
- [19] A. Dysko, J. R. McDonald, G. M. Burt, J. Goody, and B. Gwyn, "Dynamic modelling of protection system performance", in *Proc. Developments in Power Systems Protection Conf.*, 1997, pp. 381–385.
- [20] A. Domijan and M. V. Emami, "State space relay modeling and simulation using the ElectroMagnetic Transients Program and its transient analysis of control systems capability", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1990, vol. 5, no. 4, pp. 697–702.
- [21] C.-S. Chen, C.-W. Liu and J.-A. Jiang, "Application of combined adaptive Fourier filtering technique and fault detector to fast distance protection", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2006, vol. 21, no. 2, pp. 619–626.
- [22] Yu. V. Rumiantsev, *Kompleksnaya model' dlya issledovaniya funkcionirovaniya cifrovoj differencial'noj zashchity silovogo transformatora* [Complex model for investigation of the operation of the digital differential protection of a power transformer], *Energetika Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 2016, vol. 59, no. 3, pp. 203–224. (in Russian)
- [23] Yu. A. Ershov, and A. V. Maleev, *Modelirovanie mikroprocessornyh relejnyh zashchit v srede MATLAB* [Simulation of digital relay protection in MATLAB], *Journal of the Siberian State University. Series "Engineering and Technologies"*, 2010, vol. 3, no. 2, pp. 220–228 (in Russian)
- [24] M. Kezunovic, and Q. Chen, "A novel approach for interactive protection system simulation", in *Proc. Transmission and Distribution Conf.*, Los Angeles, USA, 1998, pp. 458–464.
- [25] S. G. A. Perez, M. S. Sachdev, and T. S. Sidhu, "Modeling relays for use in power system protection studies", in *Proc. Electrical and Computer Engineering Conf.*, Saskatoon, Canada, 2005, pp. 566–569.
- [26] A. Dysko A., J. R. McDonald, G. M. Burt, J. Goody, and B. Gwyn, "Integrated modelling environment: a platform for dynamic protection modelling and advanced functionality", in *Proc. IEEE Transmission and Distribution Conf.*, 1999, New Orleans, USA, vol. 1, pp. 406–411
- [27] D. Johnson, J. Johnson, and H. Moore, "Low-pass filters of Butterworth and Chebyshev", in *A handbook of active filters*, Englewood Cliffs, New Jersey, USA: Prentice-Hall Inc., 1980, pp. 9–20.
- [28] C. Jäschke, and P. Schegner, "Metrological frequency response analysis of a high current instrument transformer", in *Proc. Sensing Technology Conf.*, Auckland, New Zealand, 2015, pp. 640–645.
- [29] A. Cataliotti, D. Di Cara, P. A. Di Franco, A. E. Emanuel, S. Nuccio, "Frequency response of Measurement Current Transformers", in *Proc. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conf.*, Victoria, BC, Canada, 2008, pp. 1–5.
- [30] L. Erning, J. M. K. MacAlpine, and L. Yanbing, "On-line identification of frequency response of current transformers using a correlation method", in *Proc. IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, Hong Kong, Hong Kong, 1997, pp. 2701–2704.

Сведения об авторах.



Андреев Владимир Владимирович. К.т.н., заведующий лабораторией «Моделирование электроэнергетических систем» Томского политехнического университета. Область его научных интересов связана с моделированием энергосистем, систем управления и защиты.
E-mail: andreevmv@tpu.ru



Суворов Алексей Александрович. Ассистент кафедры электроэнергетических систем Томского политехнического университета. Область его научных интересов связана с верификацией средств моделирования энергосистем.
E-mail: suvorovaa@tpu.ru



Боровиков Юрий Сергеевич. Д.т.н., профессор кафедры электроэнергетических систем Томского политехнического университета. Область его научных интересов связана с моделированием энергосистем с активно-адаптивными сетями, FACTS систем.
E-mail: borovikov@tpu.ru



Сулайманов Алмаз Омурзакович. К.т.н., заведующий кафедрой электроэнергетических систем Томского политехнического университета. Область его научных интересов связана с моделированием энергосистем, систем управления и защиты. E-mail: sao@tpu.ru



Гусев Александр Сергеевич. Д.т.н., профессор кафедры электроэнергетических систем Томского политехнического университета. Область его научных интересов связана с исследованием процессов в энергосистемах с активно-адаптивными сетями, концепцией гибридного моделирования энергосистем.
E-mail: gusev_as@tpu.ru



Уфа Руслан Александрович. Старший преподаватель кафедры электроэнергетических систем Томского политехнического университета. Область его научных интересов связана с моделированием HVDC систем.
E-mail: hecn@tpu.ru



Рубан Николай Юрьевич. К.т.н., доцент кафедры электроэнергетических систем Томского политехнического университета. Область его научных интересов связана с моделированием энергосистем, систем управления, автоматики и защиты.
E-mail: rubanny@tpu.ru