

УДК 621.311.001

## СРЕДСТВА МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ АДЕКВАТНОЙ НАСТРОЙКИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ФАЗНОЙ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ЗАЩИТЫ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Рубан Н.Ю.<sup>1</sup>, Гусев А.С.<sup>1</sup>, Сулайманов А.О.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия (634050, Томск, пр. Ленина, 30), e-mail: rubanny@tpu.ru

В работе представлены основные результаты разработки средств всережимного моделирования высокочастотной дифференциально-фазной защиты (ВЧДФЗ) линий электропередачи с учетом процессов во всех значимых элементах защиты различных исполнений и измерительных трансформаторах, позволяющих, используя массивы мгновенных значений конкретной первичной режимной информации, осуществлять адекватную настройку ВЧДФЗ, а также посредством анализа процессов в основных функциональных элементах этих защит выявлять причины их неправильной работы и на основе проведенного анализа разрабатывать рекомендации по минимизации или устранению этих причин, в том числе путем модификации существующих или разработки новых более совершенных ВЧДФЗ. Приведены фрагменты исследований, подтверждающие указанные свойства и возможности разработанных средств моделирования ВЧДФЗ, а также основные положения методики создания этих средств.

Ключевые слова: высокочастотная дифференциально-фазная защита линий электропередачи, математическое моделирование, оптимальная настройка, метод графов.

## SIMULATION TOOLS FOR ADEQUATE SETTING OF THE HIGH-FREQUENCY PHASE COMPARISON PROTECTION OF POWER TRANSMISSION LINES

Ruban N.Y.<sup>1</sup>, Gusev A.S.<sup>1</sup>, Sulaimanov A.O.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia (634050, Tomsk, street Lenina, 30), e-mail: rubanny@tpu.ru

The paper presents the main results of the development of tools for modeling high-frequency phase-comparison protection (HFPCP) of transmission lines, taking into account processes in all significant elements of protection in various designs and measuring transformers. These tools allow you to implement adequate protection setting using arrays of instantaneous values of the particular primary regime information, and through the analysis of processes in the basic functional elements of these defenses to identify the causes of malfunction and on the basis of the analysis to develop recommendations to minimize or eliminate these causes, including by modifying existing or developing new and improved HFPCP. The paper gives fragments of research confirming specified properties and the possibility of modeling tools developed HFPCP and a summary of methods of creating these tools.

Keywords: high-frequency phase comparison protection, mathematical simulation, optimal relay protection settings, method of graphs.

### Введение

Надежность и эффективность функционирования электроэнергетических систем (ЭЭС) в значительной мере зависят от правильности работы устройств релейной защиты. Между тем, в соответствии с [3], 25-28% тяжелых системных аварий в ЭЭС происходит из-за неправильных действий релейной защиты и противоаварийной автоматики (РЗ и ПА). Указанная статистика не включает аппаратные неисправности устройств РЗ и ПА, поэтому основной причиной такой работы РЗ и ПА следует считать неадекватную реальным условиям функционирования их настройку, причина которой заключаются в следующем:

- 1) использование при проектировании и эксплуатации указанных средств недостаточно полной и достоверной информации о возможных процессах в ЭЭС;
- 2) обобщенный учет погрешностей преобразования данными средствами первичной режимной информации, формируемых конкретными реализациями РЗ и ПА и измерительными трансформаторами (ИТ).

Появление средств адекватного моделирования, позволяющих достаточно полно и достоверно воспроизводить спектр режимов и процессов в ЭЭС [2, 4], стала возможной минимизация влияния первой причины на правильность настройки РЗ и ПА. Что касается второй причины, то программные и программно-технические комплексы, используемые для расчета настроек этих средств, не позволяют учитывать на достаточном уровне влияние на функционирование РЗ и ПА их конкретные реализации и процессы в ИТ. В связи с этим актуальной становится задача создания достаточно полных и достоверных математических моделей РЗ и ПА и средств их реализации, позволяющих осуществлять их настройку с учетом влияния конкретных исполнений и ИТ применительно к реальным условиям функционирования данных средств в ЭЭС. Поскольку в ЭЭС эксплуатируется огромное количество устройств РЗ и ПА, отличающихся по принципу действия и по типам, в данной работе решение обозначенной задачи рассматривается применительно к основной защите линий электропередачи (ЛЭП) высокого напряжения – высокочастотной дифференциально-фазной защите (ВЧДФЗ) [5].

**Цель исследований** заключается в создании средств адекватного моделирования, обеспечивающих достаточно полный учет влияния конкретных исполнений ВЧДФЗ и процессов в измерительных трансформаторах и ЭЭС в целом, необходимых для их адекватной настройки и повышения эффективности функционирования данного типа защит.

### **Материалы и методы**

Использование предлагаемых адекватных моделей ВЧДФЗ и средств их реализации позволяет задавать значение настроечных коэффициентов не обобщенно, как это делается в настоящее время, а в соответствии с реальными условиями функционирования конкретных ВЧДФЗ. Синтез и реализация необходимых для этого моделей ВЧДФЗ осуществляется согласно следующей методике:

1. Анализ принципиальной схемы ВЧДФЗ и составление полной схемы её замещения, учитывающей: взаимодействие всех значимых функциональных блоков защиты, насыщение магнитопровода различных промежуточных трансформаторов, наличие активной составляющей сопротивлений обмоток трансформаторов, дросселей и реле.
2. Получение на основе схем замещения методом направленных графов соответствующих передаточных функций (ПФ) и их анализ в частотной области.

3. Преобразование полученных ПФ в дифференциальные уравнения и их формализация в виде программного кода, необходимого для реализации разработанных моделей в средствах их применения.

4. Экспериментальные исследования разработанных моделей ВЧДФЗ в средствах их применения.

В рамках исследований в соответствии с этой методикой синтезированы модели ВЧДФЗ на электромеханической элементной базе типа ДФЗ-201 и цифровой ДФЗ различных производителей, отличающихся в основном логикой работы, но имеющих схожую измерительно-преобразовательную часть. В качестве средства реализации указанных моделей ВЧДФЗ разработана программа DPPmodels, позволяющая осуществлять детальную настройку и регулировку параметров элементов защиты в соответствии с реальными условиями ее функционирования. Программа может использоваться на персональном компьютере с введением массивов данных режимных величин защищаемого объекта в формате COMTRADE, которые могут быть получены с помощью регистраторов аварийных событий или соответствующих средств моделирования ЭЭС. Для приведенных исследований использована первичная информация (напряжения и токи по концам линии электропередачи 220 кВ), полученная с помощью разработанного в Энергетическом институте Томского политехнического университета Всережимного моделирующего комплекса реального времени ЭЭС (ВМК РВ ЭЭС) [2]. Кроме этого, ВМК РВ ЭЭС позволяет также реализовывать разработанные модели ВЧДФЗ в специализированных гибридных процессорах ЛЭП [1].

#### **Результаты исследований и обсуждение**

В ходе предварительных испытаний разработанных моделей с помощью программы MATLAB подтверждена возможность выявления погрешностей в измерительно-преобразовательной части ВЧДФЗ. В качестве примера на рисунке 1 представлены иллюстрирующие данную возможность осциллограммы выходного сигнала фильтра тока обратной последовательности (ФТОП) панели ДФЗ-201 при двухфазном коротком замыкании на защищаемой ЛЭП: идеализированного  $I(\text{идеал})$  и реального  $I(\text{реал})$  ФТОП. Отклонение реального сигнала от идеализированного составило по амплитуде  $\approx 9\%$ , по фазе  $\approx 2\%$  ( $7,2^\circ$ ).

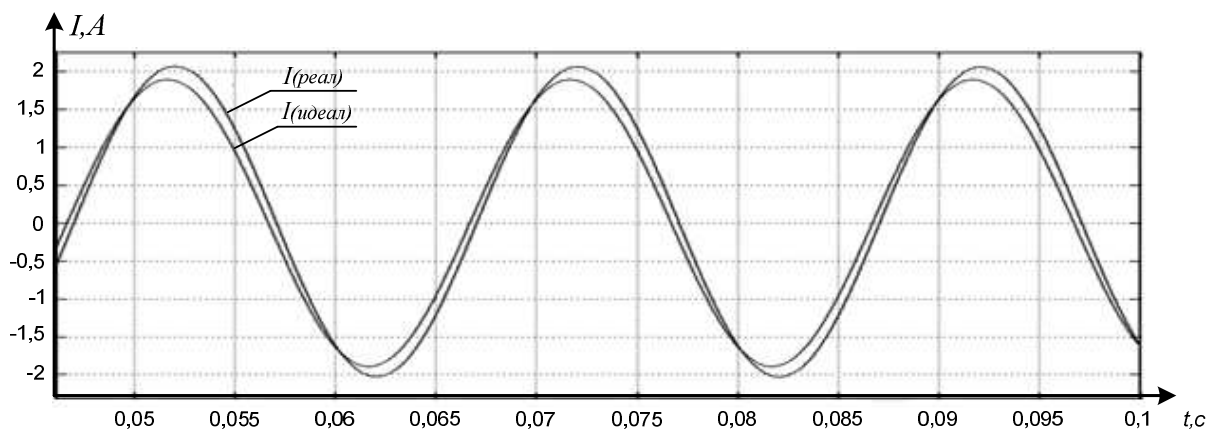


Рис. 1. Осциллограммы выходного сигнала ФТОП

Выявленное отклонение обусловлено трансреактором реального ФТОП и может быть минимизировано регулировкой зазора в магнитопроводе трансреактора или величиной нагрузочного резистора фильтра. Указанные настройки позволяют оптимизировать величину уставки электромеханической ВЧДФЗ по току обратной последовательности и увеличить чувствительность данного органа защиты. Эффективность такой дополнительной настройки применительно к панели ДФЗ-201 подтверждают результаты моделирования, представленные на рисунках 2, 3. В первом случае в связи с указанными причинами и наличием несимметрии в исходном режиме в пусковом KAZ1 и отключающем KAZ2 реле (соединены последовательно) реагирующего органа защиты возникает ток небаланса, который в нормальном режиме работы ЛЭП имеет сравнимое с величиной уставки значение и может послужить причиной преждевременного запуска ВЧ передатчика.

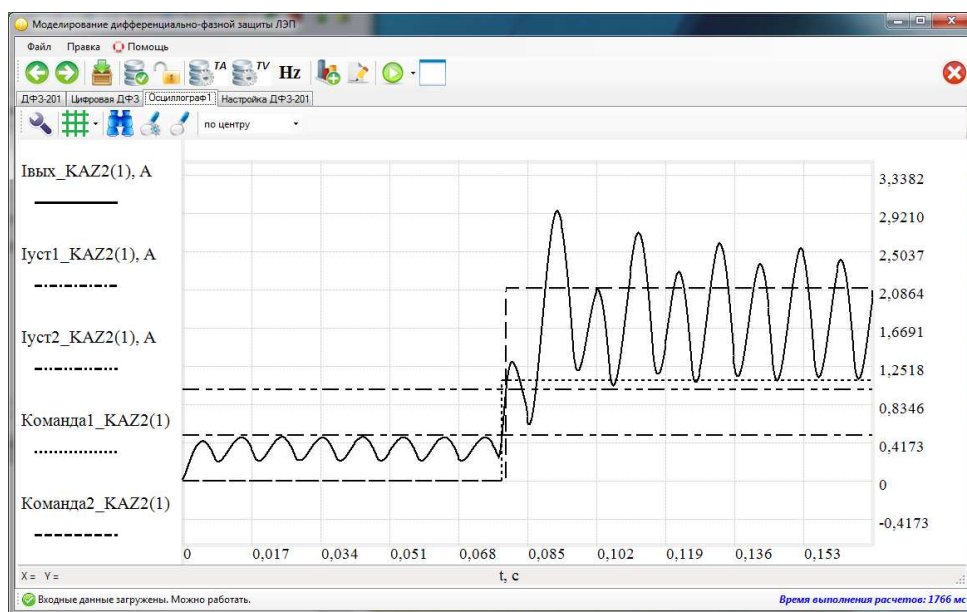


Рис. 2. Осциллограммы тока реле KAZ2, уставок по току обратной последовательности и логического сигнала о срабатывании/несрабатывании пускового и отключающего реле KAZ1 и KAZ2 1-го полукомплекта защиты без оптимизации настройки

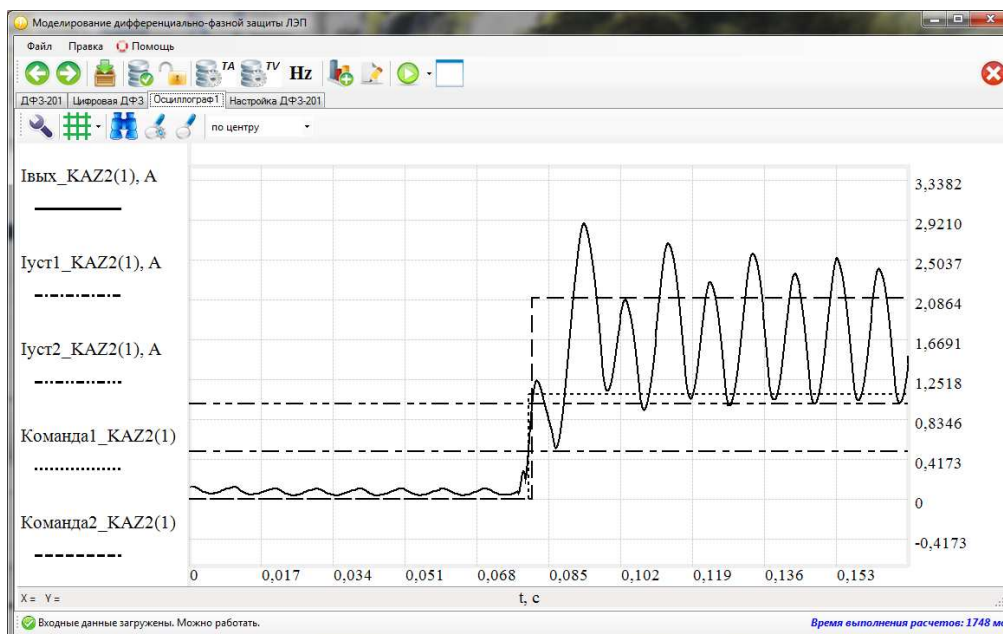


Рис. 3. Осциллограммы тока реле KAZ2, уставок по току обратной последовательности и логического сигнала о срабатывании/несрабатывании пускового и отключающего реле KAZ1 и KAZ2 1-го полукомплекта защиты с оптимизацией настройки

В результате регулировки зазора в трансреакторе и нагрузочного резистора величина тока небаланса в реле KAZ1 и KAZ2 снижается, что исключает необходимость закругления уставки и повышает чувствительность данного комплекта защиты.

Исследованиями аналогичных средств моделирования ВЧДФЗ цифрового исполнения также полностью подтверждено наличие свойств и возможностей, необходимых для их адекватной настройки.

### Выводы

В связи с сохраняющейся проблемой возможных неправильных действий устройств РЗ и ПА, в том числе ВЧДФЗ, актуальной является задача адекватной настройки этих устройств. Для надежного и эффективного решения этой задачи применительно к ВЧДФЗ разработаны средства всережимного моделирования данного вида защиты ЛЭП, позволяющие:

- осуществлять всережимное исследование ВЧДФЗ различного исполнения посредством анализа процессов во всех основных функциональных элементах этих защит, используя достоверные массивы мгновенных значений первичной режимной информации;
- настраивать ВЧДФЗ различного исполнения в соответствии с конкретными условиями их функционирования в ЭЭС с помощью разработанных программных средств моделирования ВЧДФЗ и режимной информации в виде массивов значений, в формате COMTRADE, полученных с помощью средств всережимного моделирования ЭЭС или регистраторов аварийных событий;

- выявлять причины неправильной работы ВЧДФЗ, связанные с конкретными условиями её работы, а также с функционированием отдельных её элементов или всей их совокупности в зависимости от типа исполнения, и на основе проведенного анализа разрабатывать рекомендации по минимизации или устранению этих причин, в том числе путем модификации существующих ВЧДФЗ, а также разработки новых более совершенных ВЧДФЗ.

*Работа выполнена в рамках государственного задания «Наука» 2.1318.2014 «Разработка и исследование гибридного моделирующего комплекса энергосистемы с активно-адаптивной сетью».*

### Список литературы

1. Боровиков Ю.С., Гусев А.С., Сулайманов А.О. Гибридная модель линии электропередачи // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока – 2012. - № 2. – С. 264-268.
2. Боровиков Ю.С., Гусев А.С., Сулайманов А.О. Принципы построения средств моделирования в реальном времени интеллектуальных энергосистем // Электричество – 2012. - № 6. – С. 10-13.
3. Гуревич В.И. Проблемы оценки надежности релейной защиты // Электричество – 2011. - №2. –С. 28-31.
4. Компания RTDS Technologies [Электронный ресурс]: база данных содержит информацию о комплексе реального времени RTDS. – Электрон. дан. – [2014]. – Режим доступа: <http://www.rtds.com>, свободный. – Загл. с экрана.
5. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 9. Дифференциально-фазная высокочастотная защита линий 110-330 кВ. – М.: Энергия, 1972. – 114 с., ил.

### Рецензенты:

Кабышев А.В., д.ф.-м.н., с.н.с, профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета, г. Томск.

Хрущев Ю.В., д.т.н., профессор, профессор кафедры электрических сетей и электротехники Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета, г. Томск.