

## ОТЧЕТ О НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ,

выполненных в 2018/19 г.г. по Гранту РНФ (соглашение № 17-79-10455),

научный руководитель к.т.н., м.н.с. Яблоков А.А.

«Информационная система на основе цифровых трансформаторов тока и напряжения для интеллектуальной электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью»

### Выполненные работы

1. Разработаны гибридные (полевые (с распределенными параметрами) и цепные (с сосредоточенными параметрами)) имитационные математические модели первичных преобразователей цифрового трансформатора тока и напряжения. Выполнена верификация моделей по данным физических экспериментов.
2. Разработаны алгоритмы диагностики электронных блоков цифровых трансформаторов, диагностики насыщения малогабаритного трансформатора тока, диагностики теплового состояния первичного преобразователя напряжения на основе резистивного делителя, диагностики состояния изоляции первичных преобразователей, диагностики метрологических характеристик датчика постоянного тока.
3. Разработаны компьютерные модели цифровой обработки данных в соответствии с алгоритмами диагностики в программном пакете MATLAB.
4. Выполнены исследования алгоритмов диагностики на разработанных имитационных моделях первичных преобразователей цифровых трансформаторов и моделях цифровой обработки данных. Все разработанные алгоритмы показали свою работоспособность.
5. Для исследования электромагнитных переходных процессов в электрических сетях в программном комплексе Matlab+Simulink были разработаны имитационные математические модели электрических сетей 110 – 330 кВ с односторонним питанием – упрощенные и комплексные, отражающие конфигурацию реальных районов нагрузок. Модели отличаются возможностью учета влияния различных факторов, т.е. могут содержать модели дуги, модели первичных преобразователей, различной электрической нагрузки и т.д.
6. Разработан алгоритм дистанционного определения мест повреждения (ДОМП) повышенной точности на основе замера мгновенных значений производной тока и мгновенных значений напряжения.
7. Разработана компьютерная модель цифровой обработки данных в соответствии с алгоритмом ДОМП на основе замера мгновенных значений.
8. На имитационных моделях электрических сетей были проведены исследования влияния различных искажающих замер факторов на точность ДОМП.
9. Разработан алгоритм коммерческого учета электроэнергии и определения показателей качества по выборкам тока и напряжения, учитывающий АЧХ и ФЧХ цифровых трансформаторов тока и напряжения.
10. Разработаны компьютерные модели цифровой обработки данных в соответствии с алгоритмами коммерческого учета электроэнергии и определения показателей качества в программном пакете MATLAB.
11. Выполнены исследования алгоритмов коммерческого учета электроэнергии и определения показателей качества по выборкам тока и напряжения на разработанных компьютерных моделях при несинусоидальных режимах, наличии остаточной намагниченности магнитопровода трансформатора тока, отклонениях частоты, наличии шума, провалах и прерываниях напряжений, и других воздействиях.
12. Разработаны программы для ЭВМ, выполняющие анализ данных от цифровых трансформаторов тока и напряжения (прием и обработку пакетов стандарта IEC 61850-9-2-LE, отображения формы изменения значений токов и напряжений, расчета

действующих значений и фазовых отклонений между сигналами, отображения векторных диаграмм, на основе рассчитанных значений), а также функции коммерческого учета электроэнергии и определения показателей качества электроэнергии.

13. Разработана эскизно-конструкторская документация на модули системы диагностики цифровых трансформаторов тока и напряжения.

14. Созданы модули системы диагностики. Выполнены исследования работоспособности модулей питания, их КПД и стабильности характеристик, работоспособности модулей измерения температуры и диагностики электронных блоков.

15. Изготовлены нетрадиционные первичные преобразователи и выполнены исследования цифровых трансформаторов с катушками Роговского, преобразователями на датчиках Холла, безиндуктивными шунтами и резистивными делителями.

16. Выполнены исследования уровня выходного сигнала катушки Роговского, малогабаритного трансформатора тока, резистивного делителя, преобразователей на датчиках Холла в различных режимах работы для формирования требований к входным цепям вторичных преобразователей.

17. На основе выполненных экспериментальных исследований и оценки необходимой производительности микропроцессорных устройств были выбраны и обоснованы методы и средства реализации алгоритмов, разработанных в первый год выполнения проекта, на микропроцессорной элементной базе.

18. Разработана эскизно-конструкторская документация на устройства разрабатываемой информационной системы, предназначенные для экспериментальных исследований разработанных алгоритмов.

Эскизно-конструкторская документация включает сборочный и габаритный чертеж информационной системы, чертежи первичных преобразователей и системы питания электронных блоков, схемы электрические принципиальные и чертежи печатных плат электронных блоков.

19. Создан экспериментальный образец информационной системы для исследования разработанных алгоритмов диагностики, коммерческого учета электроэнергии, определения показателей качества и дистанционного определения мест повреждений.

20. Выполнено программирование разработанных алгоритмов диагностики, коммерческого учета электроэнергии, определения показателей качества и ДОМП в устройства разрабатываемой системы.

21. Разработана программа экспериментальных исследований разработанных алгоритмов.

22. Выполнены экспериментальные исследования разработанных алгоритмов диагностики теплового состояния резистивного делителя, диагностики электронных блоков, диагностики насыщения и остаточной намагниченности магнитопровода трансформатора тока, диагностики состояния изоляции первичного преобразователя напряжения цифрового трансформатора, диагностики метрологических характеристик безиндуктивного шунта, алгоритмов коммерческого учета электроэнергии и определения показателей качества и алгоритма дистанционного определения места повреждения.

### Полученные результаты

1. Трехмерные распределенные гибридные математические модели тепловых и электромагнитных полей цифровых трансформаторов тока и напряжения и методики их создания.

2. Математические имитационные модели кабельных и воздушных сетей различных классов напряжений в программном комплексе Matlab+Simulink: упрощенные и комплексные, отличающиеся возможностью учета различных искажающих замер факторов.

3. Алгоритм диагностики насыщения и остаточной намагниченности магнитопроводов трансформаторов тока в режиме реального времени.

4. Алгоритм диагностики электронных блоков цифровых трансформаторов в режиме реального времени.
5. Алгоритм диагностики теплового состояния первичного преобразователя напряжения цифрового трансформатора на основе резистивного делителя в режиме реального времени и методика выбора мест установки датчиков температуры для системы тепловой диагностики резистивного делителя.
6. Алгоритм диагностики состояния изоляции первичных преобразователей в режиме реального времени.
7. Алгоритм диагностики метрологических характеристик датчика постоянного тока цифровых трансформаторов в режиме реального времени.
8. Компьютерные модели цифровой обработки данных в соответствии с разработанными алгоритмами диагностики.
9. Способ дистанционного определения мест повреждений (ДОМП) на основе одностороннего замера параметров аварийного режима при различных видах КЗ с использованием производной тока от пояса Роговского.
10. Модель цифровой обработки данных для реализации алгоритма ДОМП на основе использования сигналов первичных величин с нетрадиционных датчиков цифровых трансформаторов тока и напряжения.
11. Алгоритм ДОМП, обладающий повышенной точностью и устойчивостью функционирования в условиях влияния различных искажающих замер факторов, с использованием входных величин с цифровых трансформаторов тока и напряжения.
12. Алгоритм коммерческого учета электроэнергии и определения показателей качества по выборкам тока и напряжения от цифровых трансформаторов тока и напряжения, работающие в режиме реального времени.
13. Программа для ЭВМ, выполняющая функции коммерческого учета электроэнергии и определения показателей качества по выборкам тока и напряжения, формируемым в соответствии с протоколом IEC 61850-9-2LE, а также программа для ЭВМ, выполняющая анализ данных от цифровых трансформаторов тока и напряжения.
14. Модули системы диагностики цифровых трансформаторов тока и напряжения для проверки разработанных алгоритмов. Исследования алгоритмов диагностики электронных блоков цифровых трансформаторов тока и напряжения подтвердили их работоспособность в режиме реального времени и показали, что их использование позволяет обеспечить практически непрерывную работу цифровых трансформаторов тока и напряжения (потеря сигнала будет составлять меньше четверти периода основной частоты).
15. Выполненные исследования цифровых трансформаторов тока и напряжения с разными нетрадиционными первичными преобразователями позволили выявить факторы, влияющие на их метрологические характеристики на промышленной частоте, факторы, влияющие на их амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики, и факторы, влияющие на их переходные характеристики.
16. Выполненные исследования характеристик цифровых трансформаторов тока и напряжения с нетрадиционными преобразователями тока и напряжения и имеющийся опыт в создании цифровых трансформаторов позволили разработать эскизно-конструкторскую документацию на новый вид энергетического оборудования – информационную систему на основе цифровых трансформаторов тока и напряжения с функциями коммерческого учета электроэнергии, определения показателей качества электроэнергии, определения места повреждения и функциями самодиагностики.
17. Экспериментальный образец информационной системы на основе цифровых трансформаторов тока и напряжения, позволяющий выполнить проверку разработанных способов и алгоритмов диагностики, коммерческого учета электроэнергии, определения места повреждения и др.

Разработанная информационная система обладает всеми преимуществами цифровых трансформаторов, решает проблему учета электроэнергии на границе балансовой принадлежности и обладает дополнительным функционалом:

- обеспечивает учет электроэнергии в любой точке сети (может быть установлена на анкерную опору);
- исключает дополнительные затраты на землеотвод и инженерные изыскания, позволяет отказаться от создания фундаментов и применения тяжелой грузоподъемной техники (пункт учета при использовании информационной системы становится в два раза дешевле по сравнению с традиционным);
- сокращает сроки реализации проектов (монтаж и наладка могут быть выполнены за одну рабочую смену);
- выполняет самодиагностику, а, соответственно, повышает надежность эксплуатации;
- определяет расстояние до места повреждения на основе зарегистрированных токов и напряжений во время коротких замыканий на линии;
- имеет широкодиапазонное исполнение по току (номинальный ток от 200 до 1000 А);
- на результаты измерений тока не оказывает влияния эффект остаточной намагниченности благодаря используемым датчикам и разработанным алгоритмам;
- питание системы от напряжения линии позволяет обеспечить её работоспособность в большинстве режимов работы линии, в том числе в режиме холостого хода;
- при эксплуатации системы не возникнет явлений феррорезонанса благодаря применению безиндуктивных преобразователей;
- система является взрыво- и пожаробезопасной за счет применения твердотельной изоляции;
- не происходит искажения формы кривой тока при коротких замыканиях за счет использования ненасыщающихся преобразователей тока, что позволяет с достаточной точностью определять место до замыкания.

18. В результате исследований экспериментального образца информационной системы с разработанными алгоритмами получены экспериментально апробированные и доработанные по результатам экспериментальных исследований алгоритмы диагностики цифровых трансформаторов тока и напряжения, коммерческого учета и показателей качества электроэнергии, дистанционного определения мест повреждений.

19. Четыре заявки на получение свидетельств на программы для ЭВМ и одна заявка на изобретение.

20. Написаны семь статей по результатам выполненных разработок и исследований в изданиях, индексируемых в базах данных «Сеть науки» (Web of Science Core Collection) и (или) «Скопус» (Scopus), три опубликованы, две приняты к публикации и две находятся на рецензировании.

21. Написано семь статей по результатам выполненных разработок и исследований в изданиях, учитываемых РИНЦ.

22. Написана монография «Информационная система на основе цифровых трансформаторов тока и напряжения для интеллектуальной электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью».