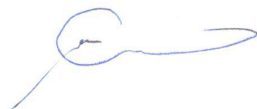


Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Уральский федеральный университет имени  
первого Президента России Б.Н. Ельцина»

На правах рукописи



**Семенов Сергей Игоревич**

**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ РАЗМЕЩЕНИЯ  
СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ВЕКТОРНЫХ  
ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ  
ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЦЕНИВАНИЯ  
СОСТОЯНИЯ ЭЭС**

05.14.02 — Электрические станции и электроэнергетические системы

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Екатеринбург — 2019

Работа выполнена на кафедре «Автоматизированные электрические системы» в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Бартоломей Пётр Иванович**

Официальные оппоненты: **Колосок Ирина Николаевна**,  
доктор технических наук, старший научный сотрудник,  
ФГБУН Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, г. Иркутск,  
ведущий научный сотрудник отдела электро-энергетических систем;

**Фишов Александр Георгиевич**,  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск,  
профессор кафедры автоматизированных электроэнергетических систем;

**Хохлов Михаил Викторович**,  
кандидат технических наук, доцент,  
Институт социально-экономических и энергетических проблем Севера Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук ФГБУН Федерального исследовательского центра «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук», г. Сыктывкар,  
заведующий лабораторией энергетических систем.

Защита состоится 19 ноября 2019 года в 13 часов на заседании диссертационного совета УрФУ 05.02.03 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19, ауд. И-420 (зал Учёного совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»:  
<https://dissovnet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=291>.

Автореферат разослан «\_\_\_» октября 2019 года.

Учёный секретарь  
диссертационного совета



Самойленко Владислав Олегович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования и степень её разработанности.** Управление электроэнергетической системой основывается на использовании информации, получаемой от телемеханики и средств измерений, к которым относятся телесигнализация и телеизмерения (ТИ). От точности, достоверности, надёжности и скорости получения ТИ напрямую зависит эффективность управления.

Настоящая работа, как и большинство исследований статического ОС не касается проблем идентификации схемы замещения, а также не затрагивает проблемы наличия нерегулярных колебаний параметров режима ЭЭС.

К концу XX века в большинстве энергосистем мира закончился перевод всех уровней диспетчерского управления на новую платформу SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition). Современные достижения в передаче информации посредством спутниковой связи GPS (США), ГЛОНАСС (Россия) привели к новому качественному скачку в совершенствовании системы ТИ в ЭЭС, позволив синхронизировать метку времени данных с точностью до одной микросекунды. Это дало возможность как более точно получать измерения традиционных параметров установленного режима (модулей напряжения  $V$  и тока  $I$ , активной  $P$  и реактивной  $Q$  мощности) с меткой времени, так и измерять новые параметры, среди которых выделяются фазные углы напряжения  $\delta$  и тока  $\phi$ . Ориентация на синхронизированные векторные измерения (СВИ) в системах диспетчерского управления и противоаварийной автоматики обусловлена рядом факторов, важнейшим из которых является существенное повышение точности измерений, так как несинхронность измерений является значимым источником погрешности в ТИ.

Отмеченное привело к созданию распределённой системы WAMS (Wide Area Measurement System) на основе устройств PMU (Phasor Measurement Unit), подключаемых к измерительным трансформаторам тока и напряжения и формирующих метку времени. В отечественной практике эта технология нашла применение в программно-аппаратном комплексе «Система Мониторинга Переходных Режимов» (СМПР).

Возрастание объёмов измерений в мировой практике обуславливает рост требований к качеству информационного обеспечения. Это приводит к необходимости расширения спектра применяемых и разработки новых быстрых алгоритмов обработки информации: проверки наблюдаемости, определения качества исходных данных, получения оценок параметров режима с учётом синхронизированных измерений.

На данный момент СВИ не являются повсеместными и, соответственно, приходится рассматривать вопросы плавного перехода к совместному

---

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», номер соглашения 075-15-2019-1214 (внутренний номер соглашения 14.578.21.0226, уникальный идентификатор проекта: RFMEFI57817X0226).

использованию СВИ и SCADA и учитывать технико-экономический аспект развития систем измерений.

В связи с тем, что в существующих энергосистемах СВИ чаще всего подключаются к электромагнитным измерительным трансформаторам тока и напряжения, эффект от их применения значительно снижен. Однако известно, что подключение их к новым оптическим трансформаторам тока и напряжения (ОТТ и ОТН) способно обеспечить более полное использование возможностей, заложенных в устройствах СВИ.

Внедрение новых технологий систем измерений не может быть реализовано моментально и в полном объёме вследствие высоких затрат временных, финансовых и трудовых ресурсов для обеспечения работоспособности вновь вводимых систем. Более того, нет гарантии, что целесообразным является именно повсеместное внедрение ОТТ, ОТН и СВИ. Из этого вытекает необходимость обоснованного выбора мест размещения новых устройств измерения, в которые входят не только РМУ, но и PDC (Phasor Data Concentrator), а также ОТТ и ОТН.

Среди большого количества исследований, связанных с расстановкой СВИ в ЭЭС следует отметить работу ИСЭМ (г. Иркутск), в которой утверждалось, что при появлении наиболее точных измерений, процедуру ОС можно заменить расчётом УР. Изысканий, подтверждающих, или опровергающих возможность такого подхода для СВИ на базе ОТТ и ОТН не проводилось и, соответственно, способы размещения СВИ, учитывающие этот подход не были определены.

В работе показывается высокая эффективность использования ОТТ и ОТН не только в SCADA, но и в системе WAMS на основе СВИ для ОС, а также, обосновывается необходимость расстановки СВИ с учётом обеспечения топологической связности элементов СВИ (измерителей узловых напряжений и измерителей токов линий) в едином «каркасе». Такая связность приводит к вычислительной устойчивости, высокой скорости выполнения ОС, а также, что наиболее важно, к снижению погрешности ОС в целом. Из анализа следует, что при произвольном размещении СВИ в ЭЭС без объединения измерителей в указанный топологический каркас результирующая погрешность ОС может оказаться неприемлемой как для задач диспетчерского, так и автоматического управления.

В то же время, следует отметить, что в некоторых американских энергосистемах пошли по пути обеспечения полной наблюдаемости при помощи РМУ, присоединённых к обычным электромагнитным измерительным трансформаторам. Благодаря этому оказалось возможным в основу достоверизации ТИ положить линейное оценивание состояния LSE (Linear State Estimation), не требующее итерационного процесса вычислений, что способствовало повышению надёжности и скорости получения решения задачи ОС. Однако это не означает, что энергосистемы России должны следовать американскому пути.

Также появились исследования, связанные с процедурой двухуровневого ОС, предполагающей выделение отдельного ОС на базе только СВИ, которое оказывается сводимым к LSE. Тем не менее существует нерешённая проблема, связанная с выбором весовых коэффициентов для учёта измерений величин электрических углов тока и напряжения как в рамках двухуровневого ОС в общем, так и в рамках LSE в частности.

**Целью** данной работы является разработка методов и подходов для оптимизации состава устройств высокоточных синхронизированных векторных (PMU) и традиционных (SCADA) систем измерений, обеспечивающих увеличение точности и скорости оценивания состояния ЭЭС и учитывающих технико-экономический характер задачи развития информационных систем.

Для достижения поставленной цели решены следующие **задачи**:

1. Выявить целесообразность и возможность расчёта режима по данным смешанной системы измерений СВИ и SCADA на основе ОТТ и ОTH, решая избыточную систему уравнений.
2. Разработать алгоритмы выбора мест размещения устройств СВИ, которые позволяют модифицировать ОС для увеличения его точности и скорости, учитывая технико-экономический характер задачи развития информационных систем.
3. Исследовать предлагаемые алгоритмы расстановки и модифицированные способы достоверизации СВИ на возможность увеличения скорости выполнения алгоритмов ОС и точности получаемых параметров установившегося режима.
4. Исследовать границы применимости разработанных алгоритмов размещения СВИ и модификаций ОС; указать ситуации, в которых их действие неэффективно и найти способы решения возникающих проблем.
5. Усовершенствовать современные подходы к ОС с позиции выбора весовых коэффициентов и формирования матрицы ковариации для учёта особенностей устройств СВИ, дающих информацию о значениях не только модулей, но и электрических углов напряжений и токов.

**Научная новизна:**

1. Показана возможность безытерационного расчёта параметров режима по данным телеизмерений PMU и SCADA при условии особого выбора мест размещения СВИ и SCADA. Выявлена высокая скорость предлагаемой процедуры.
2. Предложен способ преобразования нелинейной системы уравнений установившегося режима, который позволяет решить её относительно специальных векторов известных и неизвестных параметров прямым методом без использования итераций для модели переменного тока, что может быть использовано во многих задачах электроэнергетики.
3. На основе разработанного способа преобразования системы уравнений установившегося режима сформулированы алгоритмы выбора мест размещения СВИ.
4. Исследовано влияние погрешности исходных данных на погрешность параметров состояния ЭЭС, получаемых в результате безытерационного расчёта. Обоснована область применимости предлагаемого способа.
5. Разработаны алгоритмы выбора мест размещения устройств СВИ для двухуровневого оценивания состояния, совмещающего данные, получаемые от PMU и SCADA, которые позволяют сформировать «каркас» СВИ с целью увеличения точности ОС.

6. Обоснованы возможности предлагаемых алгоритмов для увеличения как точности оценивания состояния, так и скорости выполнения расчётной процедуры.
7. Предложен метод выбора весовых коэффициентов оценивания состояния на базе метода взвешенных наименьших квадратов, позволяющий учесть в методе линейного оценивания состояния погрешности измерений комплексных величин токов и напряжений, измеряемых в форме модуля и угла.
8. Исследована точность метода выбора весовых коэффициентов и показана граница его применимости.

**Теоретическая и практическая значимость** заключается в совершенствовании методов оценки состояния ЭЭС, а также в развитии методов расстановки устройств измерений в условиях появления новых технологий в области средств измерения и управления в электроэнергетике.

**Методология и методы исследования.** В исследовании применялись модели энергосистем и средств измерений, разработанные в теории оценивания состояния в ЭЭС. Вычислительные эксперименты выполнялись с использованием метода Монте-Карло для сформированной области варьируемых независимых переменных. Анализ погрешностей средств измерений был выполнен с использованием методов и подходов статистики и метрологии. Для преобразований систем уравнений применялся математический аппарат линейной алгебры. Разработка алгоритмов выбора мест размещения основана на применении теории графов и топологического анализа электрических цепей. Предложенные методики апробировались как на традиционных тестовых моделях энергосистем, используемых в мировой практике, так и на моделях реальных энергосистем.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Разработанный способ преобразования нелинейной системы уравнений установившегося режима для модели переменного тока может быть использован для выполнения расчёта параметров состояния ЭЭС прямым (безытерационным) методом за счёт специального выбора вектора известных и неизвестных переменных.
2. Предложенный подход к выбору мест установки СВИ даёт возможность выполнить размещение СВИ, близкое к оптимальному по числу устройств, а также, позволяет выполнять расчёт режимных параметров энергетической системы за счёт совмещения измерений СВИ и классических измерений SCADA. Однако был выявлен важный недостаток предлагаемого метода, заключающийся в неудовлетворительной точности при использовании современных систем измерений в связи с высокой чувствительностью расчётных параметров режима к погрешностям измеряемых параметров.
3. При выборе мест размещения СВИ следует учитывать сопротивления элементов схемы замещения, на которых размещаются измерения. Это объясняется тем, что при малых значениях сопротивлений коротких линий значение погрешности оценки мощности на этом участке недопустимо сильно возрастает пропорционально погрешностям измерительных приборов. Такие участки, называемые в работе критическими, влияют на результирующую расстановку СВИ.

4. Формирование топологически связного каркаса СВИ позволяет нивелировать проблему возрастания погрешности ОС при наличии коротких линий между подстанциями с установленными РМУ.
5. Предложен и апробирован метод выбора мест размещения СВИ, обеспечивающий формирование системы измерений, наиболее эффективным образом увеличивающий точность измерительной системы СВИ от каждого вновь добавляемого измерительного устройства для выполнения двухуровневого оценивания состояния по измерениям СВИ и SCADA.
6. Предложен метод выбора весовых коэффициентов для учёта измерений угла в задаче линейного оценивания состояния ЭЭС на базе СВИ. Предложен подход к формированию целевой функции и системы ограничений в задаче линейного оценивания состояния ЭЭС на базе СВИ, позволяющий повысить точность результата оценивания состояния.
7. Совокупность разработанных методов и алгоритмов является новым инструментом анализа и совершенствования системы информационного обеспечения ЭЭС.

**Достоверность** полученных результатов обеспечивается за счёт использования классических расчётных процедур и алгоритмов расчёта установившегося режима электрической сети, методов математической статистики, положенных в основу предлагаемого метода. Адекватность используемой математической модели подтверждается соответствием с реальными принципами функционирования ЭЭС и систем измерений, а также согласованностью с результатами, полученными другими программными комплексами. Результаты не противоречат исследованиям, выполненным другими авторами и применяемыми на практике.

**Апробация работы.** Положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на 13 международных и российских научно-технических конференциях, а именно:

- First International Conference ENERGY QUEST, 2014, Екатеринбург;
- V международная НТК Электроэнергетика глазами молодёжи, 2014, Томск;
- IV международная НПК в рамках выставки «Энергосбережение», 2015, Екатеринбург;
- V международная научно-техническая конференция «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем» РНК CIGRE, 2015, Сочи;
- VII Международная научная конференция молодых учёных. Электротехника. Электротехнология. Энергетика.» Электротехника. Электротехнология. Энергетика, 2015, Новосибирск;
- VI международная НТК Электроэнергетика глазами молодёжи, 2015, Иваново;
- V международная НПК в рамках специализированного форума «ExpoBuildRussia», 2016, Екатеринбург;
- The 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2016, Челябинск;

- VII международная НТК Электроэнергетика глазами молодежи, 2016, Казань;
- VI международная научно-техническая конференция «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем» РНК CIGRE, 2017, Санкт-Петербург;
- VI международная НПК в рамках специализированного форума «ExpoBuildRussia», 2017, Екатеринбург;
- The 14th International Conference on Engineering of Modern Electric Systems, 2017, Орадя, Румыния;
- Международная молодёжная НТК IEEE «Релейная защита и автоматика», 2018, Москва.

**Личный вклад.** Автор продолжил исследования, выполненные на кафедре «АЭС» УрФУ в конце XX века применительно к линейным моделям сети ЭЭС постоянного тока, о преобразовании уравнений узловых напряжений к системе, содержащей треугольную подматрицу, обеспечивающую ускоренный расчёт установившегося режима и оценивания состояния ЭЭС, распространив их результаты на нелинейную модель переменного тока. Автор принимал активное участие в разработке подхода, предполагающего размещение СВИ с образованием топологически связанного каркаса в рамках двухуровневого ОС, а также алгоритмов выбора мест размещения СВИ, безытерационных процедур определения параметров режима ЭЭС. Разработал метод выбора весовых коэффициентов и преобразования систем координат для выполнения ОС на базе только СВИ. Реализовал все разработанные методы и алгоритмы в виде программного кода. Выполнил тестирование предлагаемых методов и алгоритмов для моделей энергосистем различной размерности как на международных схемах IEEE, так и на реальных схемах отечественных энергосистем.

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации изложены в 18 печатных публикациях, 8 из которых опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК, 10 — в тезисах докладов.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения. Полный объём диссертации составляет 119 страниц, включая 23 рисунка и 7 таблиц. Список литературы содержит 109 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Первая глава** посвящена использованию топологических свойств энергосистемы для обеспечения ускоренной оценки текущего режима по данным СВИ и SCADA.

Современные технологии векторных измерений в ЭЭС открывают новые возможности в повышении скорости расчёта установившегося режима и оценивания состояния электрической системы.

Важнейшее достижение в использовании Phasor Measurement Unit (PMU), состоит в высокой точности измерений параметров режима в различных точках протяжённой электрической системы. Измерение мгновенных величин напряжения и тока позволяет определить фазы напряжения



и тока в местах установки РМУ с точностью до 1 мкс, что и обусловило возможность говорить о векторном измерении параметров режима ЭЭС.

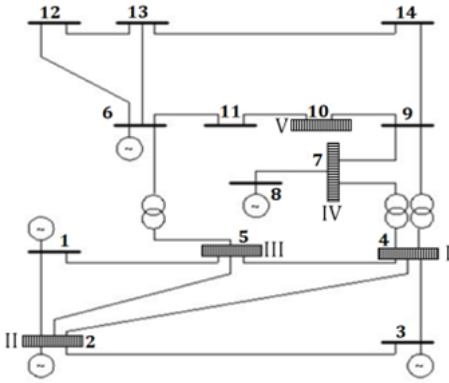
В связи с тем, что в существующих энергосистемах устройства СВИ чаще всего подключаются к электромагнитным измерительным трансформаторам тока и напряжения, эффект от их применения значительно снижен. Однако известно, что подключение их к новым ОТТ и ОТН способно обеспечить более полное использование возможностей, заложенных в устройствах СВИ, например, погрешность измерения модуля комплексных напряжения и тока может быть снижена до  $\pm 0,02\%$ , что даёт возможность существенно снизить погрешность результирующей ОС. При этом, производители утверждают, что погрешность измерения электрического угла может быть равной  $\pm 0,1^\circ$ . Хотя серийные ОТТ и ОТН до 110 кВ появились на рынке лишь несколько лет назад, по данным компании «Про-Лайн» уже сейчас заметна явная тенденция на конкурентное замещение электромагнитных ТТ и ТН оптическими вплоть до 500 кВ. Разработчики утверждают, что высоковольтные оптические измерительные трансформаторы вскоре будут дешевле электромагнитных.

Важной задачей проектирования и развития систем телеметрии является выбор мест размещения устройств измерений. В настоящее время, проблема выбора мест размещения РМУ по-прежнему является актуальной, ввиду того, что процесс замены средств измерений на более современные является крайне инертным и не может быть выполнен за малое время. Кроме того, сами устройства СВИ являются дорогостоящими, что также замедляет процесс обновления измерительных систем. Решение указанных проблем привело к необходимости решения задачи оптимальной расстановки СВИ в ЭЭС.

В работах ИСЭМ СО РАН (г. Иркутск) отмечалась необходимость исследования возможности совместного использования информации от SCADA и СВИ. Введён дополнительный термин «оценивание текущего установившегося режима по данным телеметрии», определение для которого формулируется, как расчёт установившегося режима, существующего в электрической сети на текущий момент времени по измерениям без обеспечения достоверизации данных. Сформулирован тезис, что при наличии достоверных СВИ процедуру оценивания состояния можно заменить таким оцениванием установившегося режима.

В связи с этим в первой главе решалась задача определения целесообразности и возможности расчёта режима по данным СВИ и SCADA напрямую, без использования избыточных измерений и процедуры ОС. При этом необходимо было подтвердить теоретическое обоснование, что при соответствующей расстановке РМУ скорость получения параметров установившегося режима будет максимальной, но, тем не менее, возникает проблема точности получаемых расчётных значений. Именно поэтому особое внимание уделено исследованию проблемы точности результата и скорости его получения.

В основу положен топологический подход, использующий матрично-блочное преобразование линейной системы уравнений установившегося режима в форме баланса токов. Разработанные алгоритмы осуществляют



а)

	4	2	5	7	10	3	1	6	9	8	11	14	13	12
2	•	○	•			•	•							
8				•										
11					•			•			○			
12								•					•	○
13								•				•	○	•
3	•	•				○								
1	•	•					○							
5	•	•	○			•	•	•						
4	○	•	•	•		•	•	•						
7			○			•	•	•						
10				○		•	•	•						
9	•		•	•				○						
14												○	•	
6			•					○			•	•	•	

б)

Рис. 1 — (а) Расстановка РМУ в сети IEEE-14, (б) матрица  $\dot{Y}$ ,

преобразованная по алгоритму выделения треугольной подматрицы

перестановку строк и столбцов матрицы проводимостей  $\dot{Y}$  и формирование новых векторов напряжений  $\bar{U}$  и токов  $\bar{I}$ , отражающих подмножества узлов, содержащих и не содержащих векторные измерения. Во всех алгоритмах в предлагается решать систему уравнений

$$\begin{pmatrix} \dot{Y}_{ap} & \dot{Y}_{aq} \\ \dot{Y}_{bp} & \dot{Y}_{T} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{U}_p \\ \dot{U}_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \end{pmatrix}. \quad (1)$$

где  $\dot{Y}_T$  — блок матрицы проводимостей, зависящий от алгоритма выбора зависимых и независимых переменных. Поставлено условие, в соответствии с которым последовательно решается одно уравнение с одной неизвестной комплексной переменной. Найденное решение подставляется в нижестоящие уравнения. Пример результата работы алгоритма выделения треугольной подматрицы применительно к модели сети IEEE-14 представлен на рисунке 1. Такая перестановка позволяет перейти от решения симметричной системы линейных уравнений (СЛУ) к решению СЛУ

$$\dot{Y}_T \cdot \dot{U}_q = \dot{I}_b - \dot{Y}_{bp} \cdot \dot{U}_p, \quad (2)$$

в которой на рисунке 1 имеется треугольный блок, что, по сути, обеспечивает пошаговое решение одного уравнения с одной неизвестной переменной на основании СВИ напряжений  $\dot{U}_p$  в узлах множества  $p$ , что и обеспечивает эффект ускоренного расчёта электрического режима ЭЭС. В узлы, в которых согласно алгоритму выделения треугольной подматрицы должно было быть известным комплексное напряжение, предлагается установить РМУ. В узлы же, для которых требуется информация о комплексном токе, предполагается установка SCADA.

Если учесть, что РМУ измеряют не только напряжения шин, но и токи инцидентных линий и выполнять расстановку концентраторов Phasor Data Concentrator (PDC), устанавливая РМУ на всех присоединениях к узлам с PDC, то алгоритм размещения может быть переформулирован. В

этом случае результирующая расстановка СВИ в энергосистеме IEEE-14 показана на рисунке 2.

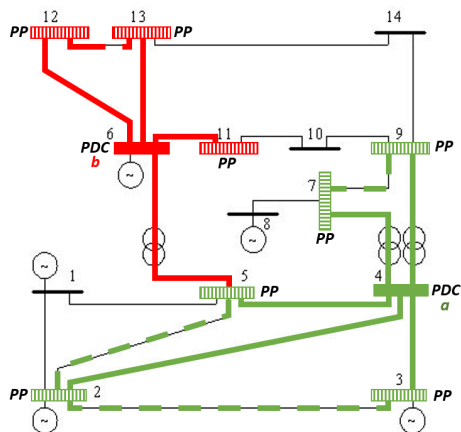


Рис. 2 — Сеть IEEE-14 с указанием мест расположения PDC (узлы 4 и 6) и расчётных напряжений (PP)

Выполнено сравнение результатов работы предложенных алгоритмов расстановки с результатами ряда зарубежных исследований, представленное в таблице 1. Получившееся количество PMU в обоих алгоритмах не уступает, а в ряде случаев даже оказывается меньшим, чем в лучших результатах зарубежных алгоритмов. Также данный алгоритм был протестирован на находящихся в открытом доступе схемах польской энергосистемы: CASE2383WP (2000г., зимний пик, 2383 узла, получено 352 PMU), CASE2736SP (2004г., летний пик, 2736 узлов, получено 389 PMU), CASE3120SP (2008г., летний пик, 3120 узлов, получено 436 PMU).

Таблица 1 — Сопоставление результатов алгоритмов размещения PMU для тестовых задач IEEE

Электрическая сеть	Количество узлов	Количество PMU	
		по первому алгоритму	лучшее из результатов
IEEE-14	14	4	3
IEEE-96	24	5	10
NewEngland 39	39	8	8
IEEE-57	57	9	12
IEEE-118	118	28	32

Таким образом, можно заключить, что алгоритмы, предложенные в работе, успешно способны выполнить минимизацию количества PMU и обеспечение наблюдаемости и ускоренного оценивания установившегося режима сети без решения какой-либо системы уравнений для моделей

ЭЭС, заданных в форме систем линейных комплексных уравнений баланса токов.

**Вторая глава** посвящена учёту нелинейности систем уравнений при оценивании режима ЭЭС на основе векторных измерений.

Для того, чтобы преобразования в главе 1 учитывали измерения мощности, а не тока, их требуется переформулировать применительно к нелинейной постановке задачи расчёта режима и ОС. Следовательно, для реализации рассмотренного алгоритма необходимо перейти от линейной модели электрического режима к нелинейной модели.

Показан переход от системы уравнений (1) к нелинейной системе:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{Y}}_{ap} \cdot \bar{U}_p + \dot{\mathbf{Y}}_{aq} \cdot \bar{U}_q = \text{diag}(\bar{U}_a)^{-1} \cdot \bar{S}_a, \\ \dot{\mathbf{Y}}_{bp} \cdot \bar{U}_p + \dot{\mathbf{Y}}_T \cdot \bar{U}_q = \text{diag}(\bar{U}_b)^{-1} \cdot \bar{S}_b. \end{cases} \quad (3)$$

Рассмотрим напряжения подвектора  $\bar{U}_p$  как независимые параметры и запишем нелинейную систему уравнений, которые потребуется решить для нахождения зависимых переменных подвектора  $\bar{U}_q$ :

$$\dot{\mathbf{Y}}_{bp} \cdot \bar{U}_p + \dot{\mathbf{Y}}_T \cdot \bar{U}_q = \text{diag}(\bar{U}_b)^{-1} \cdot \bar{S}_b. \quad (4)$$

Указанный приём деления на узлы типов  $p$  и  $q$  с последующим заданием независимых напряжений полезно использовать и при итерационном решении нелинейных уравнений узловых напряжений, например, методом Ньютона. Как и ранее, большое влияние на решение получаемых систем уравнений оказывает матрица  $\dot{\mathbf{Y}}_T$ . Её выявленные особые специфические свойства обеспечивают не только высокую скоростную эффективность решения нелинейных систем, но и **прямое алгебраическое решение систем уравнений в целом, не предполагающее использования итерационных методов решения систем нелинейных уравнений.**

При решении полученной нелинейной системы уравнений может встречаться два типа уравнений с одной неизвестной. Ввиду тривиальности решения линейного типа уравнений, оно здесь не приводится. В работе рассматривается следующее уравнение нелинейного типа:

$$\hat{U}_{\beta_i} \cdot \left( \sum_{j=1}^{i-1} (\dot{\mathbf{Y}}_{\beta_i, \beta_j} \cdot \dot{U}_{\beta_j}) + \dot{\mathbf{Y}}_{\beta_i, \beta_i} \cdot \dot{U}_{\beta_i} \right) = \hat{S}_{\beta_i}, \quad (5)$$

где известны все параметры, кроме  $\dot{U}_{\beta_i}$ . В серии зарубежных работ автора А. Триас высказана идея решения такого алгебраического уравнения, через сведение его к квадратному уравнению. Применительно к рассматриваемой постановке задачи решение можно записать как:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{\beta_i} &= \frac{(b - \hat{b} - \hat{a} \cdot \hat{a}) + \sqrt{D}}{2 \cdot \hat{a}}, \quad \text{где } D = (b - \hat{b} - \hat{a} \cdot \hat{a})^2 - 4 \cdot \hat{a} \cdot \hat{a} \hat{b} \geq 0, \\ \hat{a} &= - \frac{\sum_{j=1}^{i-1} (\dot{\mathbf{Y}}_{\beta_i, \beta_j} \cdot \dot{U}_{\beta_j})}{\dot{\mathbf{Y}}_{\beta_i, \beta_i}}, \quad \hat{b} = - \frac{\hat{S}_{\beta_i}}{\dot{\mathbf{Y}}_{\beta_i, \beta_i}}. \end{aligned} \quad (6)$$

Таблица 2 — Сопоставление точности оценок состояния ЭЭС при различных способах подключения РМУ

Сеть		IEEE 14	IEEE RTS96	IEEE 30	IEEE 57	IEEE 118	IEEE 300	Реальная ЭЭС
Число узлов		14	24	30	57	118	300	1414
Число РМУ		5	6	9	11	27	48	157
Время расчета УР (RastrWin)		1810 мкс	3650 мкс	2209 мкс	2740 мкс	5214 мкс	6111 мкс	23354 мкс
Время расчета одного режима с использованием $\dot{Y}_T$		9 мкс	25 мкс	37 мкс	104 мкс	180 мкс	392 мкс	1287 мкс
$\Delta P_L^{max}$	при $\Delta U = 0.1\%$ $\Delta \delta = 0.5^\circ$	342 МВт	35 МВт	75 МВт	517 МВт	613 МВт	878 МВт	325 МВт
	при $\Delta U = 0.1\%$ $\Delta \delta = 0.1^\circ$	103 МВт	11 МВт	16 МВт	210 МВт	85 МВт	78 МВт	192 МВт
	при $\Delta U = 0.1\%$ $\Delta \delta = 0.01^\circ$	7 МВт	9 МВт	5 МВт	4 МВт	11 МВт	5 МВт	10 МВт

Такой подход позволяет получать напряжение узла без применения каких-либо итерационных процедур. Это является одним из важных факторов обеспечения ускоренного оценивания режима на основе телеизмерений. В работе приведено несколько следствий и способов использования полученного преобразования, которые могут быть использованы в целом ряде нелинейных электроэнергетических задач.

Для сравнения результатов оценивания установившегося режима на основе телеизмерений в качестве критерия была выбрано максимальное отклонение перетока мощности в линии по сравнению с эталоном

$$\Delta P_L^{max} = \max_{L=1 \dots N_L} \{P_L^{OC} - P_L^{\exists}\}, \quad (7)$$

где  $N_L$  — количество всех линий,  $L$  — номер линии,  $P_L^{\exists}$  — мощность перетока начала линии  $L$  в эталонном режиме,  $P_L^{OC}$  — мощность перетока начала линии  $L$  в результате оценки состояния. Эталонный режим для каждой тестовой сети получался в результате решения уравнений узловых напряжений по ПК RastrWin. К измеряемым параметрам эталонного режима добавлялась случайная погрешность с целью определения изменения рассчитанных параметров и выявления закономерностей по методу Монте-Карло.

С целью оценки точности и скорости получения результатов определения параметров установившегося режима, а также робастности самой процедуры получения этих результатов, была проведена серия расчётов на схемах IEEE различной размерности и одна схема реальной сети (1414 узлов). Результаты расчёта представлены в таблице 2.

Согласно таблице 2 получающееся ускорение является не только заметным, но и очень существенным. Качественно это объясняется тем, что в предлагаемом расчёте нет решения системы уравнений, но есть последовательное решение отдельных уравнений с одной комплексной переменной.

Однако если взглянуть на ту часть таблицы, в которой рассматривается влияние погрешности измерения на погрешность расчётных

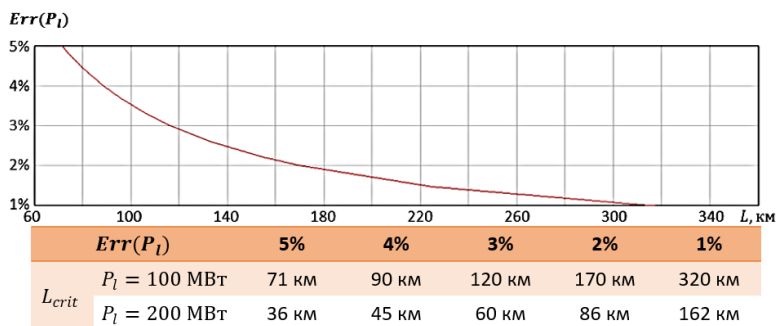


Рис. 3 — Экспериментальная проверка влияния длины линии на погрешность измерения фазы  $\delta$

параметров  $\Delta P_L^{max}$ , то можно видеть, что погрешность расчётных данных, чаще всего, оказывается недопустимой. **Дальнейший анализ показал, что наибольшая погрешность наблюдается в линиях, у которых СВИ напряжений имеются в обоих узлах.**

В связи с этим был выполнен эксперимент для двухузловой задачи 220 кВ с целью выявления влияния погрешности электрического угла напряжения на точность определения перетока мощности.

Под **критической длиной** понимается такая длина  $L_{crit}$ , при превышении которой погрешность  $\Delta P$  перетока мощности  $P_{i,j}$ , определяемая через падение напряжения по данным РМУ начала ( $i$ ) и конца ( $j$ ) линии, оказывается меньше, чем при непосредственном измерении  $P_{i,j}$  с соответствующей погрешностью SCADA.

Вычислительные эксперименты позволяют сделать вывод, что приведённый метод выполнения оценивания установившегося режима, хотя и обладает высокой скоростью, но результаты расчёта оказываются очень чувствительными к погрешностям исходных данных. **Значит, устройства РМУ недостаточно точны для использования их данных без доверификации при использовании в рассматриваемой задаче.**

**Третья глава** посвящена исследованию двухуровневого оценивания состояния на базе измерений РМУ и SCADA.

В главе 2 был сделан вывод о том, что погрешность устройств СВИ может приводить к недопустимо большим ошибкам определения параметров режимов ЭЭС. Из этого следует, что требуется либо размещать СВИ особым образом, с тем, чтобы избежать обозначенной выше проблемы коротких линий, либо заведомо выполнять размещение устройств СВИ таким образом, чтобы система измерений, включающая в себя как РМУ, так и SCADA, выполняла доверификацию режимной информации, получаемой от всего комплекса измерительных приборов. Это наталкивает на необходимость исследования возможности верификации данных от РМУ.

Хорошо известно, что для доверификации данных в современных ЭЭС применяется зарекомендовавшая себя на практике процедура ОС, предложенная в 1970 году и широко применяющаяся в настоящее время. Соответственно, в данной работе целесообразно перейти к рассмотрению способа включения СВИ в существующую процедуру ОС, или выполнению

ОС на базе только СВИ и исследовать проблему выбора мест размещения СВИ для улучшения качества ОС в целом.

Для совмещения данных СВИ и SCADA при выполнении ОС методом наименьших квадратов напрашивается классический подход, предполагающий формулирование единой оптимизационной задачи, где достоверизации подвергается информация как от устройств СВИ, так и от SCADA:

$$\begin{aligned} \Phi(\bar{x}) = & \sum_{i=1}^{M^{\text{ТИ}}} \alpha_i^{\text{ТИ}} \cdot (y_i^{\text{ТИ}}(\bar{x}) - \tilde{y}_i^{\text{ТИ}})^2 + \\ & + \sum_{i=1}^{M^{\text{СВИ}}} \alpha_i^{\text{СВИ}} \cdot (y_i^{\text{СВИ}}(\bar{x}) - \tilde{y}_i^{\text{СВИ}})^2 \rightarrow \min_{\bar{x}}, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\{ h_j(\bar{x}) = 0, j = 1 \dots K \ ,$$

где индекс «ТИ» отмечает объекты, относящиеся только к традиционным измерениям SCADA, а «СВИ» – только к СВИ.

Однако при этом появляется ранее не решённая важная проблема определения весовых коэффициентов для параметров фазового угла напряжения  $\delta$  и фазового угла тока  $\psi$ , не участвующих в качестве измерений в классической постановке ОС, а также параметров действительной и мнимой составляющих токов и напряжений.

Кроме того, эта задача имеет высокую размерность, определяемую общим количеством измерений СВИ и SCADA. Более того, она является нелинейной, поэтому по-прежнему требуется итерационная процедура с хорошей сходимостью к искомому результату. Указанные недостатки объясняют необходимость рассмотрения альтернативных способов совмещения данных СВИ и данных SCADA.

Рассматриваемая процедура двухуровневого ОС исключает формирование общей целевой функции для разнотипных и разнородных измерений. В нем на первом этапе выполняется процедура ОС для данных СВИ, где решается **линейная** оптимизационная задача

$$\Phi^{\text{СВИ}}(\bar{x}^{\text{СВИ}}) = \sum_{i=1}^{M^{\text{СВИ}}} \alpha_i^{\text{СВИ}} \cdot (y_i^{\text{СВИ}}(\bar{x}^{\text{СВИ}}) - \tilde{y}_i^{\text{СВИ}})^2 \rightarrow \min_{\bar{x}^{\text{СВИ}}}, \quad (9)$$

с тем, чтобы на втором этапе выполнять ОС на базе системы измерений SCADA, при условии, что оценённые в (9) параметры  $\bar{x}_*^{\text{СВИ}}$  принимаются как абсолютно точные и учитываются в системе ограничений:

$$\begin{aligned} \Phi^{\text{ТИ}}(\bar{x}^{\text{ТИ}}) = & \sum_{i=1}^{M^{\text{ТИ}}} \alpha_i^{\text{ТИ}} \cdot (y_i^{\text{ТИ}}(\bar{x}^{\text{ТИ}}) - \tilde{y}_i^{\text{ТИ}})^2 \rightarrow \min_{\bar{x}^{\text{ТИ}}}, \quad (10) \\ & \left\{ \begin{array}{l} h_j(\bar{x}^{\text{ТИ}}) = 0, j = 1 \dots K, \\ \bar{x}^{\text{СВИ}} = \bar{x}_*^{\text{СВИ}}. \end{array} \right. \end{aligned}$$

Однако следует отметить, что при неудачном выборе мест размещения СВИ, может оказаться, что описанный подход к декомпозиции не только не улучшает точность ОС, но, вместо этого, значительно ее ухудшает. Как было показано во второй главе, этот эффект может проявляться при размещении СВИ таким образом, что не обеспечивается связность участков сети с СВИ. Для устранения этого недостатка был разработан алгоритм выбора мест размещения устройств СВИ, в котором формируется «каркас» СВИ, в котором обеспечивается связность элементов с СВИ.

**В этом случае преимуществами двухуровневого ОС, использующего линейное ОС на базе СВИ являются:**

- отсутствие риска снижения точности измерительной системы на базе СВИ за счёт плохих данных SCADA.
- разбиение большой по размерности задачи на два этапа меньшей размерности.
- при правильном выборе мест размещения СВИ удаётся добиться декомпозиции процедур ОС на большое количество подпроцедур.
- возможность переформулирования задачи ОС в линейной форме позволяет, во-первых, существенно ускорить процедуру ОС, и, во-вторых, сделать процедуру ОС для участка, наблюдаемого СВИ безытерационной.
- режим каркаса оценивается самостоятельно только по векторным измерениям, при этом негативное влияние коротких линий полностью исключается, так как в каркасе отсутствуют расчёты по разности потенциалов узлов и, тем самым, объясняется робастность метода.

Приведённый в работе метод расстановки СВИ обладает следующими достоинствами:

- позволяет выполнять процедуру двухуровневого ОС, так как, ввиду свойств алгоритма, измерительная система СВИ, полученная в результате, охватывает именно связную область сети,
- при его выполнении на каждом шаге максимально используются возможности увеличения точности каждого вновь устанавливаемого и дорогого PDC,
- предлагаемый способ выбора мест размещения РМУ позволяет выполнять данное размещение максимально экономично, ввиду исключения лишних РМУ, дублирующих измерения (при сохранении избыточности системы измерений в целом),
- данный алгоритм позволяет учитывать уже установленные в сети средства СВИ, что потенциально даёт возможность использовать алгоритм для выбора мест размещения дополнительных СВИ в сети с заведомо установленными СВИ.

Результат работы алгоритма по выбору и размещению средств СВИ проиллюстрируем на примере топологии тестовой сети IEEE-14, содержащей 14 узлов и 20 линий (рисунок 4).

В таблице 3 показано влияние типа измерительных трансформаторов на точность оценки состояния в системе СВИ+SCADA на примере тестовой сети IEEE-30.



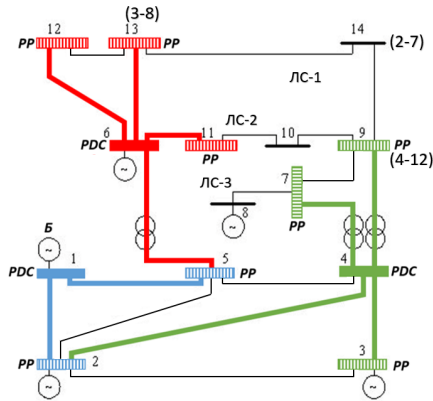


Рис. 4 — Каркас сети IEEE-14 для двухуровневого ОС. Жирным отмечен каркас СВИ

Таблица 3 — Сопоставление точности оценок состояния ЭЭС при различных способах подключения PMU для сети IEEE-30

Количество измерений при помощи PMU		Трансформаторы для PMU в каркасе	Критерий $Err(P_L)$	Максимальная ошибка в перетоке по линии, МВт
$U_i$	$I_{ij}$			
0	0	Нет PMU	6,3566	2,008
11	29	ЭМТТ и ЭМТН (0,5 %)	5,4173	1,267
		ЭМТТ и ЭМТН (0,2 %)	2,8600	0,918
		ОТТ и ОТН (0,03 %)	0,1031	0,179

В таблице 4 представлено сопоставление точности оценок состояния ЭЭС при различных способах формирования каркаса PMU для сети IEEE-30.

Для проверки предложенного метода были проведены следующие проверочные расчёты на тестовых сетях IEEE (таблица 5) методами М0 (каркаса вообще нет, и всё ОС базируется только на классических измерениях), М1 (PMU за ЭМТТ и ЭМТН) и М2 (PMU за ОТТ и ОТН). Из таблицы видно, что установка ОТТ и ОТН в базовых узлах приводит к существенному увеличению точности и скорости ОС.

Таким образом, экспериментально обосновывается необходимость учёта современной тенденции снижения стоимости ОТТ и ОТН в концепции развития информационного обеспечения ЭЭС.

В **четвёртой** главе приведено описание нового метода выбора весовых коэффициентов и матрицы ковариации в ОС при интеграции СВИ и измерений SCADA.

Таблица 4 — Сопоставление точности оценок состояния ЭЭС при различных способах формирования каркаса СВИ для сети IEEE-30

№	Количество измерений при помощи PMU		Трансформаторы для PMU в каркасе	Критерий $Err(P_L)$	Максимальная ошибка в перетоке по линии, МВт
	$U_i$	$I_{ij}$			
	0	0			
1	6	24	ОТТ и ОТН	5,3131	2,008
2	7	25	ОТТ и ОТН	0,9536	0,527
3	7	11	ОТТ и ОТН	1,7417	0,527
4	7	14	ОТТ и ОТН	1,6230	0,527

Таблица 5 — Результаты вычислительных экспериментов для сетей IEEE

№	Пояснение	Погрешности		$Err(P_L)$				
		SCADA	СВИ	IEEE	IEEE	IEEE	IEEE	IEEE
				14	24	30	57	118
M0	ПК RastrWin	$5\%P_{i,j}, Q_{i,j}$	нет	2,2445	35,661	6,3566	3,4808	9,826
M1	PMU за ЭМТТ и ЭМТН	$5\%P_{i,j}, Q_{i,j}$	согласно данным ЭМТТ и ЭМТН	0,2976	5,1363	1,2938	0,8793	1,1845
M2	PMU за ОТТ и ОТН	$5\%P_{i,j}, Q_{i,j}$	согласно данным ОТТ и ОТН	0,0036	0,0950	0,0144	0,0053	0,0128
	Относительное ускорение (во сколько раз M1 и M2 быстрее M0)			24,7	15,2	24,9	18,1	21,3

Как известно, наиболее распространённые методы ОС используют весовые коэффициенты измерений, которые рассчитываются на основе погрешностей измерительных устройств. Поэтому все величины, входящие в классическое ОС, имеют данные об относительной погрешности. **Однако для фазных углов токов и напряжений, которые появились в системе СВИ, невозможно записать относительную погрешность ввиду их природы.**

Особенно актуально этот вопрос проявляется в задаче комплексного линейного ОС, в котором для модулей комплексных величин имеются данные об относительной погрешности, а для фазных углов такие данные

принципиально не могут быть заданы. Следовательно, важным является вопрос о совместном использовании измерений фазных углов и остальных классических измерений.

От выбора коэффициентов  $\alpha_i$  напрямую зависит эффективность процедуры ОС. Коэффициенты  $\alpha_i$  выбираются каждый раз исходя из опыта эксплуатации (эмпирически), экспертом, на основании рекомендаций по их выбору (эвристически). До недавнего момента эти методы выбора весовых коэффициентов эффективно справлялись с поставленной задачей, предположительно, за счёт накапливаемого опыта эксплуатации соответствующих программных комплексов.

В связи с тем, что для всех измерений паспортом приборов нормируется относительная погрешность  $\theta_i$ , традиционно в методе наименьших квадратов весовые коэффициенты рекомендуется выбирать как

$$\alpha_i = \frac{1}{(\theta_i \cdot m_i)^2}, \quad (11)$$

где  $m_i$  — масштабирующий коэффициент измерения, который выбирается исходя из номинальных значений измеряемой величины, которые не всегда однозначно определены. Строго говоря, основная проблема описанной методики заключается в том, что она полностью применима только при условии, что  $\theta_i$  является не относительной, а абсолютной погрешностью, но обычно она применяется к относительным погрешностям.

Эта проблема не проявлялась до настоящего времени, ввиду того, что все измерения были нормированы по относительной погрешности. **Однако относительно недавнее появление СВИ привело к возможности измерять величины, которые принципиально могут нормироваться только по абсолютной погрешности, а именно, фазовые углы электрических величин.**

**В настоящей работе предлагается заменить традиционный метод выбора весовых коэффициентов с тем, чтобы учесть разнородность параметров, которая, в первую очередь, проявляется при совместном использовании модулей и фазных углов электрических величин.**

Суть предлагаемого метода состоит в том, что следует разделить все измерения на  $M_\Theta$  измерений с нормируемой абсолютной погрешностью  $\Theta_i$ ,  $i = 1 \dots M_\Theta$  и  $M_\theta$  измерений с нормируемой относительной погрешностью  $\theta_i$   $i = 1 + M_\Theta \dots M$ . Для измерений параметров с нормируемой абсолютной погрешностью предлагается рассчитывать весовой коэффициент как

$$\alpha_i = \frac{1}{\Theta_i^2}, \quad (12)$$

а для измерений параметров с нормируемой относительной погрешностью как

$$\alpha_i = \frac{1}{(\theta_i \cdot y_i^{\text{ТИ}})^2}. \quad (13)$$

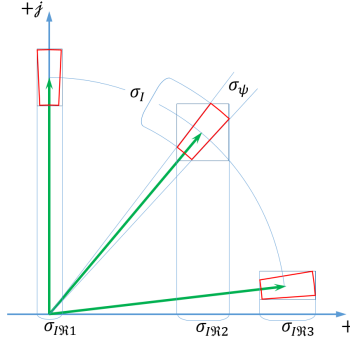


Рис. 5 — Демонстрация проблемы зависимости величины погрешности от фазного угла

В работе рассматриваются два подхода к формированию целевых функций для задачи ОС. Первый подход основан на формировании квадратичной целевой функции и линейной системы ограничений. Если в рассматриваемой энергосистеме имеется полная наблюдаемость при помощи только РМУ, то такой подход приводит к решению систем **линейных** уравнений. Но серьёзным недостатком такого подхода является зависимость дисперсий и весовых коэффициентов измерений от режимных параметров (рисунок 5), так как он предполагает, что для измеряемых параметров измеряются действительные и мнимые значения, при условии, что погрешности задаются для модулей и углов.

Второй подход предполагает классический учёт параметров, что даёт в результате квадратичную целевую функцию при нелинейной системе ограничений. Этот подход, несмотря на корректность записи, обладает важным недостатком по сравнению с первым подходом, так как он основан на итерационном решении системы нелинейных уравнений вне зависимости от того, какого типа измерения (SCADA или СВИ) используются.

Для того, чтобы совместить достоинства линейного и статистически корректного подходов, предлагается следующая формулировка для фрагмента целевой функции:

$$\begin{aligned} \phi_{PMU}(Y) = & \alpha_V (y_V - y_V^{ТИ})^2 + \alpha_\delta (y_\delta - y_\delta^{ТИ})^2 + \\ & + \alpha_I (y_I - y_I^{ТИ})^2 + \alpha_\psi (y_\psi - y_\psi^{ТИ})^2; \end{aligned} \quad (14)$$

и для системы ограничений:

$$\left\{ \begin{array}{l} -g_{ss} \cdot U'_s + b_{ss} \cdot U''_s + g_{st} \cdot U'_t - b_{st} \cdot U''_t = I'_{st}, \\ -b_{ss} \cdot U'_s - g_{ss} \cdot U''_s + b_{st} \cdot U'_t + g_{st} \cdot U''_t = I''_{st}, \\ y_V - u'_s = 0, \quad V_\delta - \frac{1}{y_V^{ТИ}} \cdot u'_s = 0, \\ u'_s = U'_s \cdot \cos y_\delta^{ТИ} - U''_s \cdot \sin y_\delta^{ТИ}, \\ u''_s = U'_s \cdot \sin y_\delta^{ТИ} + U''_s \cdot \cos y_\delta^{ТИ}, \\ y_I - i'_{st} = 0, \quad V_\psi - \frac{1}{y_I^{ТИ}} \cdot i'_{st} = 0, \\ i'_{st} = I'_{st} \cdot \cos y_\psi^{ТИ} - I''_{st} \cdot \sin y_\psi^{ТИ}, \\ i''_{st} = I'_{st} \cdot \sin y_\psi^{ТИ} + I''_{st} \cdot \cos y_\psi^{ТИ}. \end{array} \right. \quad (15)$$

Суть метода, указанного в (14) – (15), состоит в комплексном оценивании состояния, где уравнениям в качестве весового коэффициента даются комплексные значения самих измерений. Это дало основание назвать его как «линейный метод оценивания состояния взвешенный по измерениям» (Measurements Weighted Linear State Estimation), который сокращенно будем называть «MWLSE». Вычислительными экспериментами на различных энергосистемах, в том числе на модели ОЭС Урала (201 узел), показаны работоспособность и точность предлагаемого метода.

В **Заключении** приведены основные результаты работы:

1. Выполнен анализ современных тенденций в развитии информационного обеспечения задач ОС. Выявлена тенденция перехода от классических электромагнитных измерительных трансформаторов к ОТТ и ОТН. Показано, что оптические трансформаторы открывают новые возможности в совершенствовании информационного обеспечения и решения задач ОС.
2. Выполнено исследование возможности осуществления измерений параметров режима и получения их достоверных значений при помощи совместного использования СВИ и SCADA без выполнения ОС. Показана высокая скорость получения расчётных параметров при условии специальной расстановки измерительных устройств РМУ по разработанным алгоритмам, основывающимся на топологическом анализе электрической сети и в скрытом виде минимизирующих соответствующие затраты. При этом результирующее число РМУ, оказывается сопоставимым, а в некоторых случаях меньшим, чем в соответствующих методах, изложенных в зарубежной литературе.
3. Выявлено, что, несмотря на преимущества предлагаемого метода получения параметров установившегося режима, у него существуют границы применимости. Было показано, что данный метод не может быть применён в современных энергосистемах, ввиду относительно высокой погрешности современных измерительных приборов и выявленной высокой чувствительности погрешности параметров режима к погрешности измеренных данных. Однако, сделан вывод о возможном применении разработанных алгоритмов определения параметров установившегося режима в будущем, если сохраниться тенденция к уменьшению погрешности измерения как модуля, так и фазы напряжения. Сделан вывод об основном источнике высокой погрешности рассчитываемых параметров установившегося режима, а именно, о сильном влиянии наличия коротких линий между узлами с изолированными СВИ на получающуюся точность метода расчёта в целом.
4. Из выявленного факта недостаточной точности метода определения параметров потокораспределения сделан важный вывод о целесообразности выбора мест размещения СВИ таким образом, чтобы обеспечивался «каркас» из топологически связанных элементов, в которых установлен СВИ. Соответствующее двухуровневое ОС основывается на выполнении отдельного линейного ОС на базе СВИ и отдельного ОС на базе традиционных систем измерений

SCADA. Предложен способ выбора мест размещения СВИ для двухуровневого ОС, учитывающий выявленные особенности ОС для СВИ.

5. Для решения проблемы выбора мест размещения СВИ разработан метод преобразования систем нелинейных комплексных уравнений установившегося режима со специальным выбором измеряемых и рассчитываемых параметров, позволяющий свести решение системы уравнений к последовательному решению одного уравнения с одной переменной прямым методом без использования итераций. Показаны альтернативные способы применения указанного метода, в частности, это относится к возможности модернизации методов расчёта установившегося режима, с целью повышения скорости решения в особо крупных энергообъединениях, а также для определения их статической устойчивости.
6. Предложен способ выбора весовых коэффициентов и матрицы ковариации для учёта измерений электрического угла в рамках процедуры ОС с целью увеличения точности линейной ОС. Показано увеличение точности ОС при применении указанного метода выбора весовых коэффициентов для энергосистем различной размерности. Сделан вывод об эффективности предлагаемого метода выбора весовых коэффициентов. Предложенный в данной работе метод оценивания состояния, названный MWLSE, предназначен для сетей, наблюдаемых при помощи PMU в системе информационного обеспечения WAMS. Он является таким же робастным и вычислительно быстрым, как и метод линейного оценивания состояния LSE, используемый в зарубежных энергосистемах, но оказался более точным во всех рассмотренных случаях.
7. При выборе мест размещения и количества СВИ для двухуровневого ОС в условиях ограниченных экономических возможностей целесообразно проводить анализ возможных вариантов и оптимизацию плана развития информационно-измерительных систем, которые могут быть автоматизированы с использованием разработанных методов и алгоритмов. Эти методы и алгоритмы рекомендуется рассматривать как новый инструмент анализа и совершенствования системы информационного обеспечения ЭЭС.
8. Высокая эффективность всех алгоритмов подтверждена большим объёмом тестовых вычислительных экспериментов на моделях сетей IEEE(14, 24, 30, 57, 118, 300 узлов), польских энергосистем, находящихся в открытом доступе (2383 узла, 2736 узлов, 3120 узлов), а также отечественных энергосистем (201 и 1414 узел).

## ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определённых ВАК:

1. **Семененко, С.И.** Оптимизация состава традиционных и высокоточных синхронизированных векторных измерений для ускоренной оценки состояния ЭЭС / С. И. Семененко, П. И. Бартоломей

- // ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение. – 2019. – Т. 52, № 1. – С. 66–71. 0,43 п.л. / 0,22 п.л.
2. **Семенов, С.И.** Развитие метода оценивания состояния для интеграции СВИ и измерений SCADA в ЭЭС / С. И. Семенов, П. И. Бартоломей // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. – 2019. – № 3-4. – С.1–9. 0,68 п.л. / 0,34 п.л.
  3. P. I. Bartolomey and **S. I. Semenenko**, "Power Systems State Estimation Acceleration on the Basis of the Synchronized Phasor Measurements in the Power System Steady State Control Tasks,"2018 International Youth Scientific and Technical Conference Relay Protection and Automation (RPA), Moscow, 2018, pp. 1-10. 0,50 п.л. / 0,25 п.л. (индексирована в Scopus).
  4. K. I. Aprosina and **S. I. Semenenko**, "New Transmission Line Capability Assessment Method in Emergency Control Tasks,"2018 International Youth Scientific and Technical Conference Relay Protection and Automation (RPA), Moscow, 2018, pp. 1-19. 1,12 п.л. / 0,60 п.л. (индексирована в Scopus).
  5. P. Bartolomey and **S. Semenenko**, "Super-accelerated power systems power flow and state estimation calculations within the WAMS environment,"2017 14th International Conference on Engineering of Modern Electric Systems (EMES), Oradea, 2017, pp. 55-58. 0,19 п.л. / 0,10 п.л. (индексирована в Scopus).
  6. P. Bartolomey, E. Kotova, **S. Semenenko** and E. Lebedev, "Phasor measurements impact on the a priori data filtration and power systems state estimation,"2017 14th International Conference on Engineering of Modern Electric Systems (EMES), Oradea, 2017, pp. 51-54. 0,20 п.л. / 0,05 п.л. (индексирована в Scopus).
  7. P. Bartolomey and **S. Semenenko**, "Accelerated power systems power flow calculations using phasor measurements,"2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Chelyabinsk, 2016, pp. 1-5. 0,32 п.л. / 0,17 п.л. (индексирована в Scopus).
  8. Bartolomey, P. I. ; Eroshenko, S. A. ; **Semenenko, S. I.** ; Suvorov, A. A. / PMU-based informational support of power system control tasks. In: WIT Transactions on Ecology and the Environment. 2014 ; Vol. 190 VOLUME 1. pp. 307-318. 0,69 п.л. / 0,17 п.л. (индексирована в Scopus).

Другие публикации:

9. Бартоломей, П. И. Априорная фильтрация телеметрии и оценка состояния электроэнергетической системы с помощью векторных измерений / П. И. Бартоломей, **С. И. Семенов** // Эффективное и качественное снабжение и использование электроэнергии, ЭСКИЭ-06: Сб. докл. 6-ой междунар. Науч.-практ. Конф. в рамках спец. форума «ExpoBuildRussia». — 2017. 0,51 п.л. / 0,26 п.л.
10. Бартоломей, П. И. Разработка алгоритмов ускоренного расчета режима ЭЭС по данным телеметрии в системе WAMS / П. И. Бартоломей, **С. И. Семенов** // Научные труды международной научно-технической конференции «Энергетика глазами

- молодёжи-2016», Казань. Т. 2. — 2016. — С. 58—60. 0,35 п.л. / 0,18 п.л.
11. Бартоломей, П. И. Использование синхронизированных векторных измерений для ускоренных расчетов режимов ЭЭС / П. И. Бартоломей, **С. И. Семененко** // Эффективное и качественное снабжение и использование электроэнергии, ЭСКИЭ-05: Сб. докл. 5-ой междунар. Науч.-практ. Конф. В рамках специализир. форума «ExproBuildRussia». — 2016. 0,21 п.л. / 0,11 п.л.
  12. Бартоломей, П. И. Размещение РМУ в электрической сети для ускоренных расчетов установившихся режимов / П. И. Бартоломей, **С. И. Семененко** // VII Международная научная конференция молодых учёных «Электротехника. Электротехнология. Энергетика»: сборник тезисов. — 2015. 0,31 п.л. / 0,16 п.л.
  13. Бартоломей, П. И. Совершенствование алгоритма противоаварийной автоматики ЭЭС на основе векторных измерений / П. И. Бартоломей, **С. И. Семененко** // Эффективное и качественное снабжение и использование электроэнергии: сб. докл. 4-й междунар. науч.-практ. конф. науч. ред. Ф. Н. Сарапулов. — УМЦ УПИ, 2015. — С. 38—41. 0,25 п.л. / 0,13 п.л.
  14. Бартоломей, П. И. Расстановка РМУ для ускорения расчета режимов ЭЭС в задачах противоаварийного управления в среде WAMS / П. И. Бартоломей, **С. И. Семененко** // Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем: сборник статей. — 2015. — С. 2—9. 0,43 п.л. / 0,26 п.л.
  15. Bartolomey, P. Phasor Measurements Application in Power Systems for Accelerated Power Flow Calculations in Emergency Control / P. Bartolomey, **S. Semenenko** // Energy Systems, Materials and Designing in Mechanical Engineering. Т. 792. — Trans Tech Publications, 10.2015. — pp. 286—292. — (Applied Mechanics and Materials). 0,38 п.л. / 0,18 п.л.
  16. Бартоломей, П. И. Минимизация количества векторных измерений для ускоренных расчетов режимов ЭЭС / П. И. Бартоломей, **С. И. Семененко** // Научные труды международной научно-технической конференции «Энергетика глазами молодёжи-2015», Иваново. Т. 1. — Ноябрь.2015. — С. 259—264. 0,31 п.л. / 0,16 п.л.
  17. Бартоломей, П. И. Совершенствование алгоритма противоаварийной автоматики ЭЭС на основе векторных измерений / П. И. Бартоломей, **С. И. Семененко** // Эффективное и качественное снабжение и использование электроэнергии. — 2015. 0,25 п.л. / 0,13 п.л.
  18. Бартоломей, П. И. Расстановка РМУ для ускоренных расчетов режима ЭЭС по критерию минимизации затрат / П. И. Бартоломей, **С. И. Семененко** // Научные труды международной научно-технической конференции «Энергетика глазами молодёжи-2014», Томск. Т. 1. — Ноябрь.2014. — С. 359—362. 0,19 п.л. / 0,10 п.л.