ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

Раков Иван Витальевич

МЕТОДИКА ОЦЕНИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ И ПЕРЕМЕННЫХ СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА «КАБЕЛЬНАЯ ЛИНИЯ – АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ» НА ОСНОВЕ БАЛАНСА МГНОВЕННОЙ ПОЛНОЙ ПОТРЕБЛЯЕМОЙ МОЩНОСТИ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы

Томск – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель: **Глазырин Александр Савельевич**

доктор технических наук, доцент, профессор отделения электроэнергетики и электротехники, Инженерная школа энергетики, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск

Официальные оппоненты: **Нос Олег Викторович**

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры проектирования технологических машин, Механико-технологический факультет, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск

Хакимьянов Марат Ильгизович

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой электроэнергетики и электрооборудования предприятий, Институт цифровых систем, автоматизации и энергетики, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа

Защита состоится 29 мая 2024 года в 10.00 часов на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.10 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, ул. Усова, д.7, ауд. 217.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета и на сайте dis.tpu.ru при помощи QR-кода.

Автореферат разослан «____» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета ДС.ТПУ.10,
кандидат технических наук _____ Никитин Дмитрий Сергеевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. В Российской Федерации, в 2021 году, добыча нефти (без газового конденсата) составила 485 025 586 тонн. Из этого объема добытой нефти 82% или 396 849 927 тонн нефти было добыто из скважин, оборудованных электропогружными насосами в составе установок электроцентробежных насосов (УЭЦН). В связи с тем, что большая часть нефти добывается при помощи УЭЦН, разработка методов снижения затрат при эксплуатации УЭЦН является рациональной и логичной точкой приложения человеческих, материальных и финансовых ресурсов. Одним из существующих методов снижения затрат при добыче нефти из низко- и среднедебитных скважин является перевод скважины, оборудованной УЭЦН, с режима непрерывной эксплуатации на режим периодической эксплуатации скважины и в частности подтипа этого режима – циклической эксплуатации скважины (ЦЭС), которая характеризуется чередованием кратковременных периодов извлечения (до 15 минут) и накопления (до 30 минут) нефти на забое скважины.

При переводе скважины на режим ЦЭС, на основе теоретических и экспериментальных данных, доказано значительное (до 40 %) уменьшение потребления электроэнергии, а также увеличение добываемой нефти за счет гравитационной сепарации флюида в стволе скважины на этапе накопления. Однако негативным эффектом данной методики является: уменьшение ресурса гидрозащиты УЭЦН, ускоренный износ шайб в компоновке центробежного насоса, ускоренный износ промежуточных радиальных и упорных подшипников. Ресурс гидрозащиты УЭЦН снижается из-за увеличения утечек масла из нее, что приводит к попаданию во внутренние полости погружного электродвигателя (ПЭД) пластовой жидкости, а это приводит к ускоренному выходу из строя ПЭД. Причиной утечек масла из гидрозащиты является повышенный уровень вибрации компонентов УЭЦН, возникающий вследствие бросков тока и момента при интенсивном разгоне ПЭД до заданной частоты вращения. В свою очередь, износ шайб и подшипников ускоряется за счет того, что на этапе накопления флюида происходит осаждение абразива на внутренних полостях насоса, что приводит к ускорению гидроабразивного износа.

В РФ доля установок, работающих в циклическом режиме, с каждым годом растёт. Так, в 2017 году на ряде месторождений Западной Сибири и Южного Урала доля УЭЦН, работающих в непрерывном режиме составляла 58%, в циклическом – 48%, а уже в 2019 году в непрерывном – 23%, в циклическом – 78%. Подобная динамика указывает на то, что низко- и среднедебитных скважин становится все больше и эксплуатировать их в непрерывном режиме становится экономически нерентабельным. Однако с технической точки зрения перевод в большом объеме скважин на ЦЭС приведет к повышению количества вышедших из строя ПЭД и компонентов насоса, что нивелирует полученные положительные эффекты.

Перспективный способ борьбы с бросками тока и момента в переходном режиме – это разработка и внедрение векторной системы управления ПЭД. Для реализации этой системы необходимо получить информацию о векторе переменных состояния ПЭД. Один из методов получения информации, который

позволяет оценивать переменные состояния без изменения и доработки подземной части оборудования УЭЦН, – создание наблюдателей полного порядка переменных состояния электротехнической подсистемы УЭЦН на основе явных математических моделей.

Синтез наблюдателя состояния, который может оценивать переменные состояния ПЭД, позволит получить сигнал обратной связи (ОС) и на основе ОС создать замкнутые контуры управления электроприводом. Это уменьшит такие нежелательные эффекты, как броски тока и момента ПЭД, пульсации механических напряжений в подземном оборудовании и позволит переводить низко- и среднедебитные скважины на ЦЭС без резкого снижения среднего срока наработки на отказ подземной части оборудования УЭЦН.

На основании вышеизложенного разработка методики оценивания параметров и переменных состояния электротехнического комплекса «Кабельная линия – Асинхронный двигатель» на основе баланса мгновенной полной потребляемой мощности является своевременной и актуальной задачей, решение которой позволит создать предпосылки для реализации векторной системы управления ПЭД, а это позволит увеличить надежность УЭЦН при ЦЭС и увеличить рентабельность добычи нефти из низко- и среднедебитных нефтяных скважин.

Степень разработанности темы диссертации. Развитием теории нестационарных динамических систем в различных приложениях занимались отечественные учёные Егупов Н.Д., Пупков К.А., Семенов А.Д., Хакимьянов М.И., Сушков В.В и другие. Существенный вклад в развитие наблюдателей переменных состояния асинхронных электроприводов и методов идентификаций параметров схем замещения внесли такие ученые как: Панкратов В.В., Ещин Е.К., Каширских В.Г., Виноградов А.Б., Козярук А.Е, Зюзев А.М., Белов М.П., Завьялов В.М., Глазырин А.С., Baburaj Karanayil, Muhammed F. Rahman, Hongwen He, Chen Wang, Hui Jia, Xing Cui, Pavel Brandstetter, Martin Kuchar, Rudolf Kálmán, David Luenberger и другие.

Объектом исследования является асинхронный электропривод, подключенный к источнику синусоидального напряжения через кабельную линию. На входе кабельной линии установлен комплекс измерения мгновенных значений напряжения и тока по каждой фазе с микропроцессорной системой управления.

Предметом исследования является математическое и методическое обеспечение микропроцессорных систем управления, которые осуществляют оценивание параметров и вектора переменных состояния электротехнического комплекса «Кабельная линия – Асинхронный двигатель».

Идея работы заключается в оценке параметров схемы замещения и вектора переменных состояния исследуемого объекта на основе баланса мгновенной полной потребляемой мощности.

Цель работы разработать наблюдатель полного порядка вектора переменных состояния электротехнического комплекса «Кабельная линия – Асинхронный двигатель» и исследовать его работоспособность при отработке внешних воздействий.

Для достижений цели были поставлены и решены следующие **задачи:**

1. Разработать методику оценивания параметров схемы замещения электротехнического комплекса «Кабельная линия – Асинхронный двигатель» на основе баланса мгновенной полной потребляемой мощности;

2. Разработать наблюдатель полного порядка вектора переменных состояния электротехнического комплекса «Кабельная линия – Асинхронный двигатель»;

3. Разработать методику настройки масштабирующих коэффициентов в наблюдателе полного порядка вектора переменных состояния электротехнического комплекса «Кабельная линия – Асинхронный двигатель» для обеспечения параметрической робастности;

4. На математических моделях проверить работоспособность и сходимость разработанных методик оценивания параметров и вектора переменных состояния;

5. Произвести апробацию функционирования методики оценивания параметров и вектора переменных состояния электротехнического комплекса «Кабельная линия – Асинхронный двигатель» на полунатурной экспериментальной установке.

Методы исследования. В диссертационной работе при решении поставленных задач нашли применение теоретические и экспериментальные методы исследования. К теоретическим методам относятся: теория электропривода, теория автоматического управления, теория и методы оптимизации. Проверка результатов полученных с помощью теоретических методов выполнялась на полунатурной экспериментальной установке с использованием метода планирования эксперимента и метода полного факторного эксперимента.

Достоверность полученных результатов и выводов диссертационной работы подтверждается путем математического моделирования, а также результатами, полученными в ходе экспериментальных исследований.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика оценивания параметров схемы замещения электротехнического комплекса «Кабельная линия – Асинхронный двигатель» на основе баланса мгновенной полной потребляемой мощности;

2. Структура наблюдателя полного порядка вектора переменных состояний электротехнического комплекса «Кабельная линия – Асинхронный двигатель»;

3. Методика настройки масштабирующих коэффициентов наблюдателя полного порядка вектора переменных состояния электротехнического комплекса «Кабельная линия – Асинхронный двигатель» на основе баланса мгновенной полной потребляемой мощности для обеспечения повышенной параметрической робастности.

Научная новизна:

1. Развита теория оценивания параметров схем замещения электротехнических комплексов, отличающаяся от известных тем, что производится отдельно оценивание параметров схемы замещения каждого компонента, входящего в комплекс, после чего задается ограничение поискового

пространства и производится оценивание параметров схемы замещения электротехнического комплекса в сборе;

2. Предложена и апробирована структура наблюдателя полного порядка вектора переменных состояния электротехнического комплекса «Кабельная линия – Асинхронный двигатель», в которой произведено уточнение математической модели кабельной линии путем ее редуцирования;

3. Развита и экспериментально подтверждена методика настройки масштабирующих коэффициентов наблюдателя полного порядка на основе баланса мгновенной полной потребляемой мощности, обеспечивающая параметрическую робастность наблюдателя.

Теоретическая ценность работы:

1. Разработана настраиваемая математическая модель с сосредоточенными параметрами электротехнического комплекса «Кабельная линия – Асинхронный двигатель», в котором кабельная линия представлена редуцированной математической моделью;

2. Разработан алгоритм оптимизации порядка редуцированной математической модели кабельной линии в зависимости от длины кабельной линии и частоты питающей сети;

3. Разработана методика настройки масштабирующих коэффициентов наблюдателя полного порядка для обеспечения повышенной параметрической робастности на основе кросс-векторной теории мгновенной полной потребляемой мощности.

Практическая ценность работы:

1. Разработано программное обеспечение для оценивания параметров схемы замещения электротехнического комплекса на основе баланса мгновенной полной потребляемой мощности;

2. Разработано программное обеспечение для настройки масштабирующих коэффициентов наблюдателя полного порядка электротехнического комплекса «Кабельная линия – Асинхронный двигатель» с повышенной параметрической робастностью.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Рассматриваемая область исследования соответствует паспорту специальности 2.4.2 – «Электротехнические комплексы и системы» по пункту 3 «Разработка, структурный и параметрический синтез, оптимизация электротехнических комплексов, систем и их компонентов, разработка алгоритмов эффективного управления» и пункту 4 «Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов, систем и их компонентов в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях, диагностика электротехнических комплексов».

Апробация работы. Результаты исследований использованы при выполнении НИР по гранту УМНИК-20 (ЦЭ-1) №434ГУЦЭС8-D3/62067 от 05.10.2020 «Разработка нейросетевого наблюдателя угловой скорости вращения погружного асинхронного двигателя при циклической эксплуатации нефтяной скважины». Результаты исследований использованы при выполнении НИР в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования

Российской Федерации (тема № FENG-2023-0001 «Предиктивное управление потоками энергии электрогенерирующих комплексов Арктики и Крайнего Севера, при стохастических характерах потребления и генерации электрической энергии: теория, синтез, эксперимент». Результаты диссертационной работы обсуждались и получили одобрение на XV Международной научно-технической конференции «Современные проблемы машиностроения», г. Томск, 22 – 25 ноября 2022; на Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Актуальные вопросы энергетики», г. Омск, 25 – 26 мая 2023.

Реализация результатов работы. Результаты исследований внедрены в ООО «ИНТ», а также в учебную деятельность ФГАОУ ВО «НИ ТПУ», что подтверждено соответствующими актами.

Публикации. Результаты выполненных исследований отражены в 10 печатных работах, которые включают в себя 3 статьи в журналах, рекомендуемых ВАК, 3 публикации, индексируемые в реферативной базе SCOPUS, 1 программа для ЭВМ, 3 тезиса докладов в материалах конференций различного уровня.

Личный вклад автора. Все разработки и научные результаты, выносимые на защиту и изложенные в тексте диссертации, получены самим автором или при его непосредственном участии. Экспериментальные исследования и программная реализация выполнялась автором лично.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, четырёх глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 124 наименования. Диссертация изложена на 143 страницах машинописного текста, содержит 50 рисунков и 41 таблицу.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность исследования, приведены цель и задачи работы. Дается аннотация содержания работы по рассматриваемым разделам. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту. Сформулирована научная новизна и практическая ценность исследований.

В первой главе определено, что перспективным методом косвенного оценивания вектора переменных состояния ПЭД является метод, основанный на измерении мгновенных значений тока и напряжения на выходе повышающего трансформатора и входе кабельной линии с последующей оценкой вектора переменных состояния наблюдателем (рис.1). Указано, что с точки зрения электротехники исследуемую систему можно рассматривать как электротехнический комплекс «Кабельная линия – Асинхронный двигатель» («КЛ - АД»).

Рисунок 1. *Структурная схема реализации способа косвенного определения угловой скорости вращения ПЭД с измерением токов и напряжений на выходе повышающего трансформатора и на входе погружного кабеля (красный – объект исследования, синий – предмет исследования)*

Проведен анализ достоинств и недостатков пяти способов построения наблюдателей. Для решения задачи оценивания вектора переменных состояния ПЭД выбран способ построения наблюдателя на основе явной математической модели, вид наблюдателя – наблюдатель полного порядка.

Во второй главе проведен сравнительный анализ известных методов оценивания параметров схемы замещения электротехнических объектов. Основываясь на особенностях эксплуатации объекта исследования, выбран наиболее подходящий для этих условий метод идентификации, а именно метод пассивной динамической идентификации параметров с предварительным оцениванием параметров схемы замещения компонентов, входящих в исследуемую систему.

Разработана методика оценивания параметров схемы замещения электротехнического комплекса «КЛ - АД». Методика состоит из 6 пунктов:

1. Оценить параметры асинхронного двигателя, планируемого к установке;
2. Оценить параметры участка кабельной линии (длинной не менее 200 метров), планируемой к установке;
3. Смонтировать установку электротехнического комплекса «КЛ - АД» с измерением токов / напряжений на входе кабельной линии;
4. Внести в программное обеспечение (ПО) ранее оцененные параметры, длину участка кабельной линии и фактическую длину кабельной линии;
5. Оценить параметры электротехнического комплекса «КЛ-АД»;
6. Производить повторную оценку параметров электротехнического комплекса «КЛ-АД» при увеличении невязки между мгновенной полной потребляемой мощностью объекта и модели более 25% или по условию останова УЭЦН.

Разработана процедура оценивания параметров схемы замещения объекта исследования на основе мгновенной полной потребляемой мощности, в которой с помощью математического аппарата реализована динамическая идентификация (рис.2). Основная идея динамической идентификации параметров схемы замещения заключается в том, что на нестационарный динамический объект подается входное трехфазное напряжение, откликом объекта является трехфазный ток. Записанные мгновенные значения тока и напряжения передаются в микропроцессорную систему управления (МСУ). В МСУ от блока задания априорных параметров на настраиваемую математическую модель объекта исследования передается информация, заведомо известная о каком-либо параметре объекта (число пар полюсов, длина кабельной линии и т.д.).

На настраиваемую математическую модель исследуемого объекта подается входное воздействие в виде значений зафиксированного ранее мгновенного значения напряжения, откликом модели является мгновенное значение тока. После того как зафиксировано напряжение, получены значения отклика объекта и модели, данные передаются на блоки вычисления мгновенной потребляемой мощности объекта и настраиваемой модели соответственно.

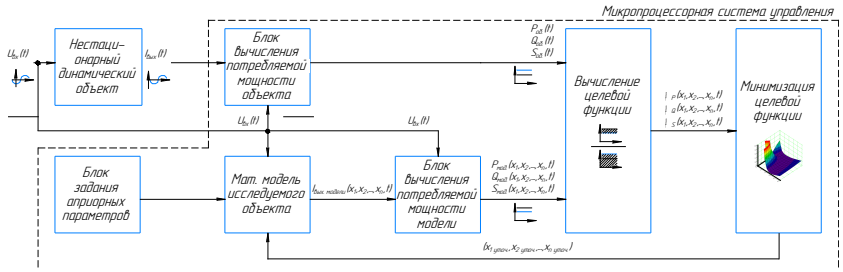


Рисунок 2. *Процедура динамической идентификации параметров схемы замещения объекта исследования на основе баланса мгновенной полной потребляемой мощности*

Для вычисления мгновенной активной и мгновенной реактивной потребляемой мощности применена кросс-векторная теория мгновенной мощности. Согласно этой теории, необходимо перевести зафиксированное мгновенное напряжение и токи из трехфазной системы в двухфазную $\alpha\beta$ (1).

$$U_\alpha(t) = U_A(t);\ U_\beta(t) = \frac{U_B(t)-U_C(t)}{\sqrt{3}};\ I_\alpha(t) = I_A(t);\ I_\beta(t) = \frac{I_B(t)-I_C(t)}{\sqrt{3}}; \quad (1)$$

где $I_\alpha(t)$ - проекция результирующего вектора тока по оси α, А; $U_\alpha(t)$ - проекция вектора входного измеренного напряжения по оси α, В; $I_\beta(t)$ –проекция результирующего вектора тока по оси β, А; $U_\beta(t)$ – проекция вектора входного измеренного напряжения по оси β, В.

Затем путем скалярного и векторного произведения масштабированных векторов, для объекта исследования $\overline{I}\left(\frac{I_\alpha(t)}{\sqrt{2}},\frac{I_\beta(t)}{\sqrt{2}}\right)$ $\overline{U}\left(\frac{U_\alpha(t)}{\sqrt{2}},\frac{U_\beta(t)}{\sqrt{2}}\right)$, для модели объекта исследования $\overline{I}\left(\frac{I_\alpha(t,\hat{x}_1,\hat{x}_2,\ldots,\hat{x}_n)}{\sqrt{2}},\frac{I_\beta(t,\hat{x}_1,\hat{x}_2,\ldots,\hat{x}_n)}{\sqrt{2}}\right)$ $\overline{U}\left(\frac{U_\alpha(t)}{\sqrt{2}},\frac{U_\beta(t)}{\sqrt{2}}\right)$, заданных координатами в ортогональном базисе, необходимо вычислить мгновенную активную (2) и мгновенную реактивную мощность (3) соответственно, после чего вычисляется мгновенная полная мощность (4).

$$P_{\alpha\beta}(t,\hat{x}_1,\hat{x}_2,\ldots,\hat{x}_n) = m\left(\frac{I_\alpha(t,\hat{x}_1,\hat{x}_2,\ldots,\hat{x}_n)}{\sqrt{2}}\cdot\frac{U_\alpha(t)}{\sqrt{2}} + \frac{I_\beta(t,\hat{x}_1,\hat{x}_2,\ldots,\hat{x}_n)}{\sqrt{2}}\cdot\frac{U_\beta(t)}{\sqrt{2}}\right); \quad (2)$$

$$Q_{\alpha\beta}(t,\hat{x}_1,\hat{x}_2,\ldots,\hat{x}_n) = m\left(\frac{I_\alpha(t,\hat{x}_1,\hat{x}_2,\ldots,\hat{x}_n)}{\sqrt{2}}\cdot\frac{U_\beta(t)}{\sqrt{2}} - \frac{I_\beta(t,\hat{x}_1,\hat{x}_2,\ldots,\hat{x}_n)}{\sqrt{2}}\cdot\frac{U_\alpha(t)}{\sqrt{2}}\right); \quad (3)$$

$$S_{\alpha\beta}(t,\hat{x}_1,\hat{x}_2,\ldots,\hat{x}_n) = \sqrt{\left(P_{\alpha\beta}(t,\hat{x}_1,\hat{x}_2,\ldots,\hat{x}_n)\right)^2 + \left(Q_{\alpha\beta}(t,\hat{x}_1,\hat{x}_2,\ldots,\hat{x}_n)\right)^2}; \quad (4)$$

где $P_{\alpha\beta}(t,\hat{x}_1,\hat{x}_2,\ldots,\hat{x}_n)$ – оценка вектора мгновенной активной потребляемой мощности, Вт; $Q_{\alpha\beta}(t,\hat{x}_1,\hat{x}_2,\ldots,\hat{x}_n)$ – оценка вектора мгновенной реактивной потребляемой мощности, Вар; $S_{\alpha\beta}(t,\hat{x}_1,\hat{x}_2,\ldots,\hat{x}_n)$ – оценка вектора мгновенной полной потребляемой мощности, ВА; $\hat{x}_1,\hat{x}_2,\ldots,\hat{x}_n$ – оцениваемые параметры схемы замещения объекта исследования; m – количество фаз, ед.

Следующим шагом вычисляется невязка между полной потребляемой мощностью объекта и модели. Для описания невязки выбран способ построения целевой функции (ЦФ) с избавлением от знака невязки взятием модуля (5)

$$F_{mdl}(t,\hat{x}_1,\hat{x}_2,\ldots,\hat{x}_n) = \int_a^b \left|S(t) - S_{\alpha\beta}(t,\hat{x}_1,\hat{x}_2,\ldots,\hat{x}_n)\right| dt \quad (5)$$

где $S(t)$ – вектор вычисленной мгновенной полной потребляемой мощности, ВА.

Здесь и далее, пределы интегрирования $[a, b]$ при формировании целевой функции и вычислении относительных ошибок восстановления / оценивания сигналов равны всему временному промежутку моделирования или эксперимента, если не указано иное. Сформированная целевая функция передается на блок

оптимизации, где при помощи методов оптимизации находится глобальный экстремум целевой функции. Общая задача многомерной оптимизации формулируется следующим образом: необходимо найти вектор параметров $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ таким образом, чтобы обеспечить минимизацию или максимизацию выбранной целевой функции $f(X) = [f_1(X), f_2(X), \dots, f_n(X)] \rightarrow min/max$, определенную на n-мерном евклидовом пространстве $\mathbb{R}^n$ в заданной ограничениями области $g(X) = \left[g_1(X), g_2(X), \dots, g_j(X)\right]$. В рамках проведенной работы, при решении задачи оптимизации целевой функции обеспечивалась минимизация целевой функции $f(X)$ при поиске вектора параметров X. Для определения глобального экстремума целевой функции использовался генетический алгоритм (ГА). После того как найдены координаты глобального экстремума целевой функции, задача оптимизации считается решенной, а процедура оценивания параметров завершенной.

После апробации методики оценивания параметров и процедуры динамической идентификации была синтезирована настраиваемая математическая модель электротехнического комплекса «КЛ-АД» (рис. 3).

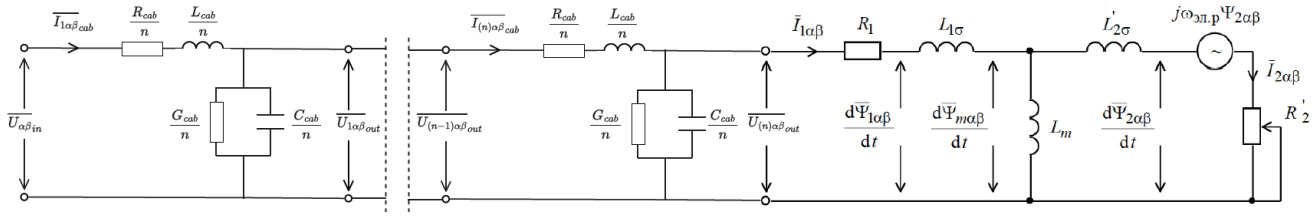


Рисунок 3. *Схема замещения электротехнического комплекса «КЛ-АД» с редуцированной математической моделью кабельной линии*

Основное отличие от известных методов описания исследуемой системы заключается в том, что кабельная линия представлена редуцированной математической моделью с сосредоточенными параметрами, количество звеньев которой оптимизировано с учетом длины кабельной линии и частоты питающей сети.

В третьей главе проведено исследование работоспособности разработанного наблюдателя полного порядка вектора переменных состояния электротехнического комплекса «КЛ-АД». Математическое описание разработанного наблюдателя вектора переменных состояния исследуемого комплекса представлено в виде системы дифференциальных уравнений (6), в котором количество переменных состояния может варьироваться в зависимости от длины кабельной линии и частоты питающей сети.

Определено, что при циклической эксплуатации скважины параметры комплекса «КЛ - АД», в составе электротехнической подсистемы УЭЦН, будут меняться при каждом цикле накопления / откачки нефти. В связи с этим необходимо настроить наблюдатель полного порядка таким образом, чтобы он, несмотря на отклонения параметров объекта исследования от ранее оцененных, стабильно, с некоторой допустимой погрешностью оценивал вектор переменных состояния объекта исследования без внесения каких-либо корректировок в процессе работы и позволял электроприводу в составе УЭЦН завершить цикл откачки нефти, т.е. обладал параметрической робастностью.

$$
\begin{cases}
\dfrac{d\hat{\imath}_{1\alpha_\text{каб}}(t)}{dt} = \dfrac{\left(u_{\alpha_\text{вх}}(t) - \hat{\imath}_{1\alpha_\text{каб}}(t)\cdot R_{\text{каб}}/n - \hat{u}_{1\alpha_{\text{вых}}}(t) + \right.}{L_{\text{каб}}/n} \\
\qquad \left. + k_1\cdot(R_{\text{каб}}+R_{\text{э}})\cdot\left(i_{\alpha_\text{каб}}(t) - \hat{\imath}_{1\alpha_\text{каб}}(t)\right)\right) \\
\dfrac{d\hat{\imath}_{1\beta_\text{каб}}(t)}{dt} = \dfrac{\left(u_{\beta_\text{вх}}(t) - \hat{\imath}_{1\beta_\text{каб}}(t)\cdot R_{\text{каб}}/n - \hat{u}_{1\beta_\text{вых}}(t) + \right.}{L_{\text{каб}}/n} \\
\qquad \left. + k_1\cdot(R_{\text{каб}}+R_{\text{э}})\cdot\left(i_{\beta_\text{каб}}(t) - \hat{\imath}_{1\beta_\text{каб}}(t)\right)\right) \\
\dfrac{d\hat{u}_{1\alpha_\text{вых}}(t)}{dt} = \dfrac{\left(\hat{\imath}_{1\alpha_\text{каб}}(t) - \hat{u}_{1\alpha_\text{вых}}(t)\cdot G_{\text{каб}}/n - \hat{\imath}_{2\alpha_\text{каб}}(t)\right)}{C_{\text{каб}}/n} \\
\dfrac{d\hat{u}_{1\beta_\text{вых}}(t)}{dt} = \dfrac{\left(\hat{\imath}_{1\beta_\text{каб}}(t) - \hat{u}_{1\beta_\text{вых}}(t)\cdot G_{\text{каб}}/n - \hat{\imath}_{2\beta_\text{каб}}(t)\right)}{C_{\text{каб}}/n} \\
\vdots \\
\dfrac{d\hat{\imath}_{(n)\alpha_\text{каб}}(t)}{dt} = \dfrac{\left(\hat{u}_{(n-1)\alpha_{\text{вых}}}(t) - \hat{\imath}_{(n)\alpha_{\text{каб}}}(t)\cdot R_{\text{каб}}/n - \hat{u}_{(n)\alpha_\text{вых}}(t)\right)}{L_{\text{каб}}/n} \\
\dfrac{d\hat{\imath}_{(n)\beta_\text{каб}}(t)}{dt} = \dfrac{\left(\hat{u}_{(n-1)\beta_\text{вых}}(t) - \hat{\imath}_{(n)\beta_\text{каб}}(t)\cdot R_{\text{каб}}/n - \hat{u}_{(n)\beta_\text{вых}}(t)\right)}{L_{\text{каб}}/n} \\
\dfrac{d\hat{u}_{(n)\alpha_\text{вых}}(t)}{dt} = \dfrac{\left(\hat{\imath}_{(n)\alpha_\text{каб}}(t) - \hat{u}_{(n)\alpha_\text{вых}}(t)\cdot G_{\text{каб}}/n - \hat{\imath}_{1\alpha}(t)\right)}{C_{\text{каб}}/n} \\
\dfrac{d\hat{u}_{(n)\beta_\text{вых}}(t)}{dt} = \dfrac{\left(\hat{\imath}_{(n)\beta_\text{каб}}(t) - \hat{u}_{(n)\beta_\text{вых}}(t)\cdot G_{\text{каб}}/n - \hat{\imath}_{1\beta}(t)\right)}{C_{\text{каб}}/n} \\
\dfrac{d\hat{u}_{\alpha_\text{доб}}(t)}{dt} = \dfrac{(R_{\text{каб}}+R_{\text{э}})\cdot\left(i_{\alpha_\text{каб}}(t) - \hat{\imath}_{1\alpha_\text{каб}}(t)\right)}{k_2} \\
\dfrac{d\hat{u}_{\beta_\text{доб}}(t)}{dt} = \dfrac{(R_{\text{каб}}+R_{\text{э}})\cdot\left(i_{\beta_\text{каб}}(t) - \hat{\imath}_{1\beta_\text{каб}}(t)\right)}{k_2} \\
\dfrac{d\hat{\imath}_{1\alpha}(t)}{dt} = \\
= \dfrac{1}{\sigma\cdot L_1}\cdot\hat{u}_{(n)\alpha_\text{вых}}(t) - \dfrac{R_{\text{э}}}{\sigma\cdot L_1}\cdot\hat{\imath}_{1\alpha}(t) + \dfrac{R_2'\cdot L_m}{\sigma\cdot L_1\cdot L_2^2}\cdot\hat{\Psi}_{2\alpha}(t) + \\
+ \dfrac{L_m}{\sigma\cdot L_1\cdot L_2}\cdot z_p\cdot\hat{\omega}(t)\cdot\hat{\Psi}_{2\beta}(t) + \hat{u}_{\alpha_{\text{доб}}}(t) \\
\dfrac{d\hat{\imath}_{1\beta}(t)}{dt} = \\
= \dfrac{1}{\sigma\cdot L_1}\cdot\hat{u}_{(n)\beta_\text{вых}}(t) - \dfrac{R_{\text{э}}}{\sigma\cdot L_1}\cdot\hat{\imath}_{1\beta}(t) + \dfrac{R_2'\cdot L_m}{\sigma\cdot L_1\cdot L_2^2}\cdot\hat{\Psi}_{2\beta}(t) - \\
- \dfrac{L_m}{\sigma\cdot L_1\cdot L_2}\cdot z_p\cdot\hat{\omega}(t)\cdot\hat{\Psi}_{2\alpha}(t) + \hat{u}_{\beta_\text{доб}}(t) \\
\dfrac{d\hat{\Psi}_{2\alpha}(t)}{dt} = -\dfrac{R_2'}{L_2}\cdot\hat{\Psi}_{2\alpha}(t) + \dfrac{R_2'\cdot L_m}{L_2}\cdot\hat{\imath}_{1\alpha}(t) - \\
- z_p\cdot\hat{\omega}(t)\cdot\hat{\Psi}_{2\beta}(t); \\
\dfrac{d\hat{\Psi}_{2\beta}(t)}{dt} = -\dfrac{R_2'}{L_2}\cdot\hat{\Psi}_{2\beta}(t) + \dfrac{R_2'\cdot L_m}{L_2}\cdot\hat{\imath}_{1\beta}(t) + \\
+ z_p\cdot\hat{\omega}(t)\cdot\hat{\Psi}_{2\alpha}(t); \\
\hat{M}_{\text{эм}}(t) = \dfrac{3}{2}\cdot\dfrac{L_m}{L_2}\cdot z_p\cdot \\
\left(\hat{\Psi}_{2\alpha}(t)\cdot\hat{\imath}_{1\beta}(t) - \hat{\Psi}_{2\beta}(t)\cdot\hat{\imath}_{1\alpha}(t)\right); \\
\dfrac{d\hat{M}_c(t)}{dt} = \left(\dfrac{1}{k_4\cdot T_2}\cdot\dfrac{3}{2}\cdot\dfrac{L_m}{L_2}\cdot z_p + \dfrac{3}{2}\cdot\dfrac{L_m}{L_2}\cdot z_p\cdot k_3\right)\cdot \\
\cdot\begin{pmatrix}\hat{\Psi}_{2\alpha}(t)\cdot\left(i_{\beta_\text{каб}}(t) - \hat{\imath}_{1\beta_\text{каб}}(t)\right) - \\ -\hat{\Psi}_{2\beta}(t)\cdot\left(i_{\alpha_\text{каб}}(t) - \hat{\imath}_{1\alpha_\text{каб}}(t)\right)\end{pmatrix}; \\
\dfrac{d\hat{\omega}(t)}{dt} = \dfrac{1}{J}\cdot\left(\hat{M}_{\text{эм}}(t) - \hat{M}_c(t)\right);
\end{cases}
\tag{6}
$$

где $u_{\alpha_\text{вх}}(t)$ – проекция вектора входного измеренного напряжения в момент времени t по оси α; $u_{\beta_\text{вх}}(t)$ – проекция вектора входного измеренного напряжения в момент времени t по оси β; $i_{\alpha_\text{каб}}(t)$ – проекция вектора измеренного тока на входе кабельной линии в момент времени t по оси α; $i_{\beta_\text{каб}}(t)$ – проекция вектора измеренного тока на входе кабельной линии в момент времени t по оси β; $\hat{\imath}_{(n)\alpha_\text{каб}}(t)$ – оценка состояния вектора тока в кабеле в звене n в момент времени t по оси α; $\hat{\imath}_{(n)\beta_\text{каб}}(t)$ – оценка состояния вектора тока в кабеле в звене n в момент времени t по оси β; $\hat{u}_{(n)\alpha_\text{вых}}(t)$ – оценка состояния вектора выходного напряжения кабеля в звене n в момент времени t по оси α; $\hat{u}_{(n)\beta_\text{вых}}(t)$ – оценка состояния вектора выходного напряжения кабеля в звене n в момент времени t по оси β; $\hat{\imath}_{1\alpha}(t)$ – оценка состояния вектора тока статора в момент времени t по оси α; $\hat{\imath}_{1\beta}(t)$ – оценка состояния вектора тока статора в момент времени t по оси β; $\hat{\Psi}_{2\alpha}(t)$ – оценка состояния вектора потокосцепления ротора в момент времени t по оси α; $\hat{\Psi}_{2\beta}(t)$ – оценка состояния вектора потокосцепления ротора в момент времени t по оси β; $\hat{M}_{\text{эм}}(t)$ – оценка состояния электромагнитного момента АД; $\hat{M}_c(t)$ – оценка состояния момента сопротивления на валу АД; $\hat{\omega}(t)$ – оценка угловой скорости вращения ротора АД; $R_{\text{каб}}$ – сопротивление токоведущих жил; $L_{\text{каб}}$ – индуктивность токоведущих жил; $C_{\text{каб}}$ – эквивалентная ёмкость фазы относительно двух других фаз и брони; $G_{\text{каб}}$ – проводимость изоляции; $L_1 = L_{1\sigma} + L_m$ – эквивалентная индуктивность обмотки статора; $L_2' = L_{2\sigma}' + L_m$ – эквивалентная индуктивность обмотки ротора; $\sigma = 1 - \dfrac{L_m^2}{L_1\cdot L_{2\sigma}'}$ – коэффициент рассеяния; $R_{\text{э}} = R_1 + \dfrac{R_2'\cdot L_m^2}{L_{2\sigma}'}$ – эквивалентное активное сопротивление цепей статора; R_1 – сопротивление обмотки статора; R_2' – приведенное к статору сопротивление обмотки ротора; $L_{1\sigma}$ – индуктивность рассеяния обмотки статора; $L_{2\sigma}'$ – приведенная к статору индуктивность рассеяния обмотки ротора; J – момент инерции одномассовой механической системы электропривода; z_p – число пар полюсов; k_1, k_2, k_3, k_4 – масштабирующие коэффициенты.

Также в третьей главе проведено исследование разработанной методики настройки масштабирующих коэффициентов наблюдателя полного порядка вектора переменных состояний электротехнического комплекса «КЛ-АД» на основе баланса мгновенной полной потребляемой мощности для обеспечения повышенной параметрической робастности.

Этапы методики:

1. Уменьшить оцененные параметры схемы замещения исследуемого объекта в 0.9 раз;
2. Ввести полученные значения параметров схемы замещения в наблюдатель;
3. Сформировать ЦФ на основе на основе баланса мгновенной полной потребляемой мощности. Аргументами ЦФ являются масштабирующие коэффициенты наблюдателя;
4. Минимизировать ЦФ и определить масштабирующие коэффициенты наблюдателя;
5. Ввести найденные масштабирующие коэффициенты в наблюдатель;
6. Вернуть оцененные параметры схемы замещения исследуемого объекта к номинальным значениям;
7. Контролировать невязку между вычисленной и оцененной полной потребляемой мощностью. Если ошибка оценивания мгновенной полной потребляемой мощности больше 25 %, то произвести повторную оценку параметров схемы замещения объекта исследования.

В четвертой главе экспериментально подтверждена работоспособность методики оценивания параметров на основе баланса мгновенной полной потребляемой мощности и наблюдателя полного порядка вектора переменных состояния электротехнического комплекса «КЛ-АД». Первоначально проводилась экспериментальная апробация методики оценивания параметров. Схемы используемых экспериментальных установок для реализации пунктов 1, 2 и 5 методики оценивания параметров электротехнического комплекса «КЛ-АД» представлены на рисунке 4.

Экспериментальная установка (рис. 4а) состоит из регулируемого источника питания, блока датчиков тока / напряжения, платы сбора данных и асинхронного двигателя мощностью 30 Вт, $n_{синх}$, об/мин = 1500 об/мин, который планируется к установке. Экспериментальная установка (рис. 4б) состоит из преобразователя частоты Danfoss VLT HVAC Drive, блока датчиков тока / напряжения, платы сбора данных, участка кабельной линии имитирующей кабель длиной 1 км, который планируется к установке, и активной нагрузки $R_{нагр}$ = 41.2 Ом. Экспериментальная установка (рис. 4в) состоит из источника питания, блока датчиков тока / напряжения, платы сбора данных, двух участков кабельной линии, имитирующих кабель длиной 2 км, асинхронного двигателя и датчика угловой скорости вращения. Информация о метрологических характеристиках датчиков и платы сбора данных представлена в работе. В результате проведения трех экспериментов, были получены мгновенные значения напряжений и токов.

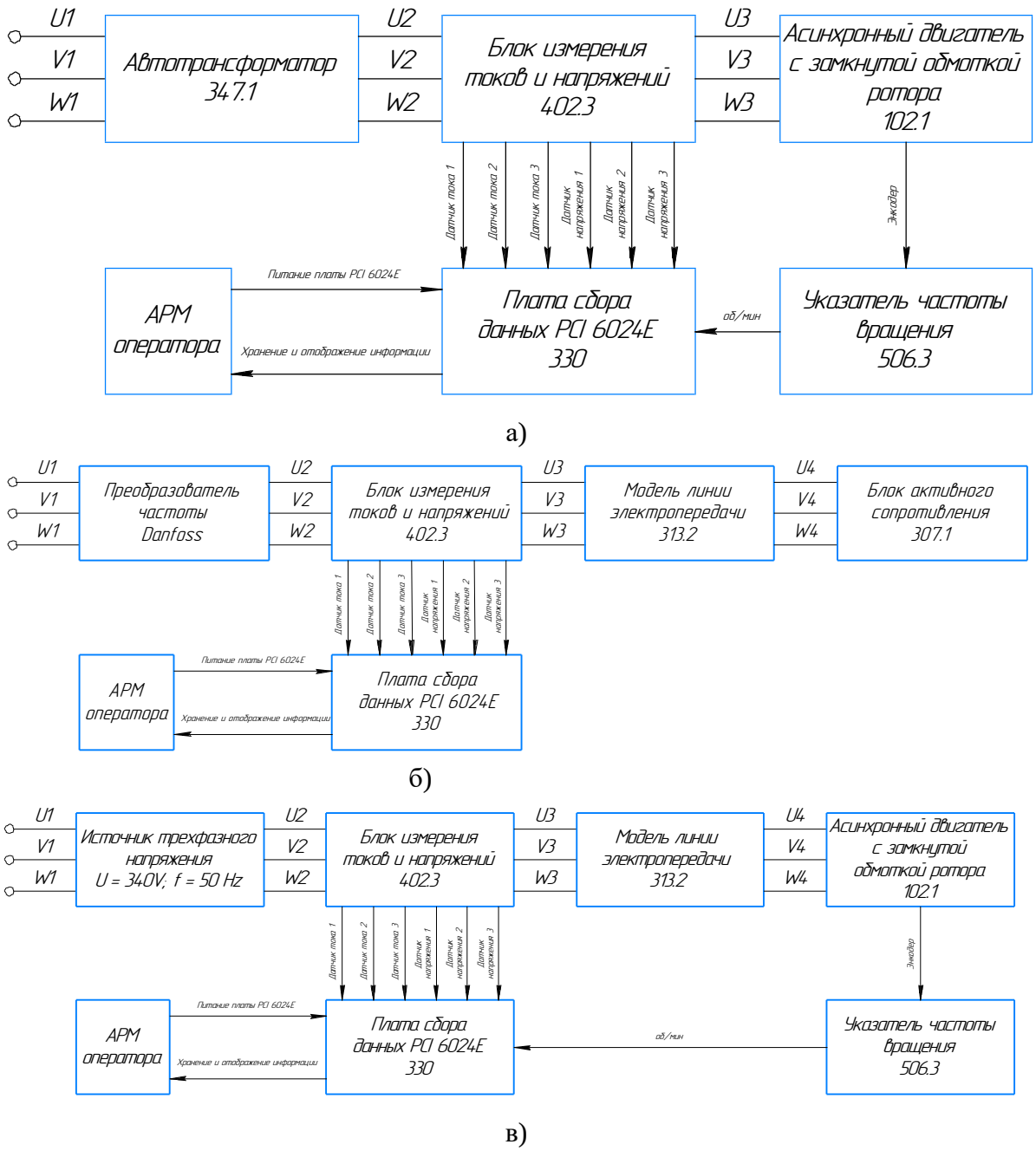


Рисунок 4. *Схемы экспериментальных установок, а) – для выполнения пункта №1 разработанной методики, б) – для выполнения пункта №2 разработанной методики, в) – для выполнения пункта №5 разработанной методики*

Затем был произведен перевод экспериментальных трехфазных мгновенных значений напряжения и тока в двухфазную систему координат αβ (1), а затем выполнен расчет потребляемой мгновенной активной, реактивной и полной мощности (2 - 4). После получения экспериментальных значений мгновенной потребляемой мощности в трех экспериментах были сформированы ЦФ (7 - 9).

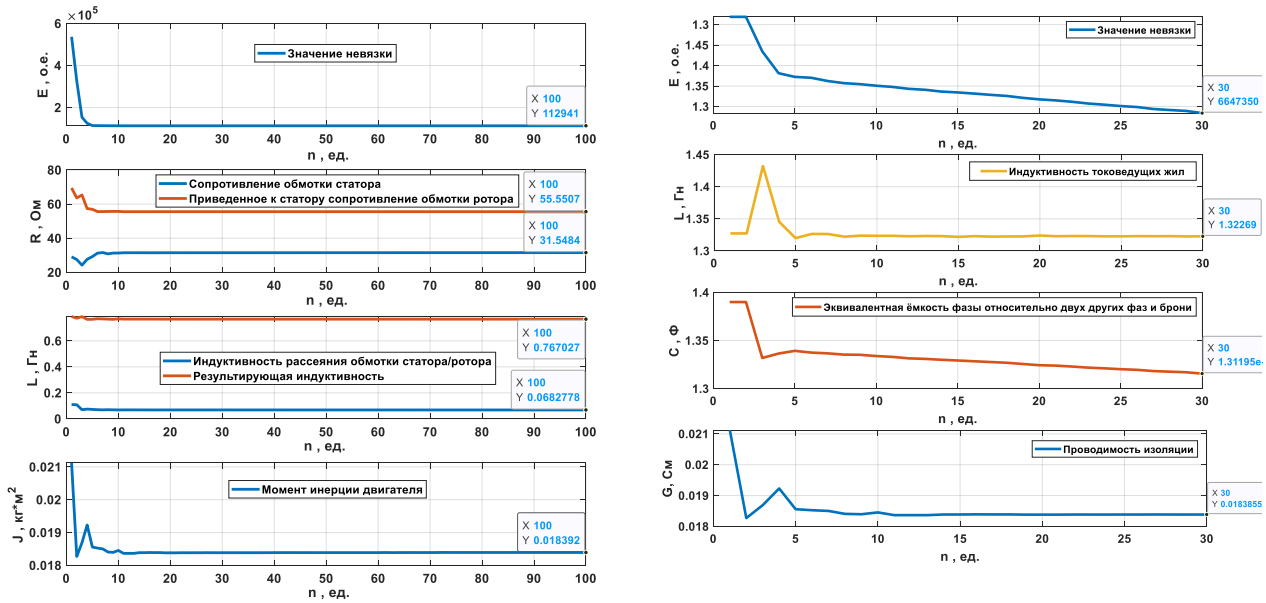
$$F_{mdl}\left(t,\hat{R}_1,\hat{L}_{1\delta},\hat{L}_m,\hat{R'}_2,\hat{J}\right)=\int_a^b\left|S(t)-S_{\alpha\beta}\left(t,\hat{R}_1,\hat{L}_{1\delta},\hat{L}_m,\hat{R'}_2,\hat{J}\right)\right|dt; \quad (7)$$

$$F_{mdl}\left(t,\hat{R}_{\text{каб}},\hat{L}_{\text{каб}},\hat{C}_{\text{каб}},\hat{G}_{\text{каб}}\right)=\int_a^b\left|S(t)-S_{\alpha\beta}\left(t,\hat{R}_{\text{каб}},\hat{L}_{\text{каб}},\hat{C}_{\text{каб}},\hat{G}_{\text{каб}}\right)\right|dt; \quad (8)$$

$$F_{mdl}\left(t,\hat{R}_{\text{каб}},\hat{L}_{\text{каб}},\hat{C}_{\text{каб}},\hat{G}_{\text{каб}},\hat{R}_1,\hat{L}_{1\delta},\hat{L}_m,\hat{R'}_2,\hat{J}\right)= \int_a^b\left|S(t)-S_{\alpha\beta}\left(t,\hat{R}_{\text{каб}},\hat{L}_{\text{каб}},\hat{C}_{\text{каб}},\hat{G}_{\text{каб}},\hat{R}_1,\hat{L}_{1\delta},\hat{L}_m,\hat{R'}_2,\hat{J}\right)\right|dt; \quad (9)$$

В результате процесса минимизации целевых функций (7, 8) был получен итерационный процесс процедуры минимизации (рис.5). Результаты оценивания параметров схемы замещения АД и участка КЛ сведены в таблицу 1 и вычислена ошибка восстановления сигнала мгновенной полной потребляемой мощности с использованием оцененных параметров (10).

$$\varepsilon_S = \frac{\int_a^b \left| S(t) - S_{\alpha\beta}(t, \hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n) \right| dt}{\int_a^b |S(t)|\, dt} \cdot 100; \qquad (10)$$



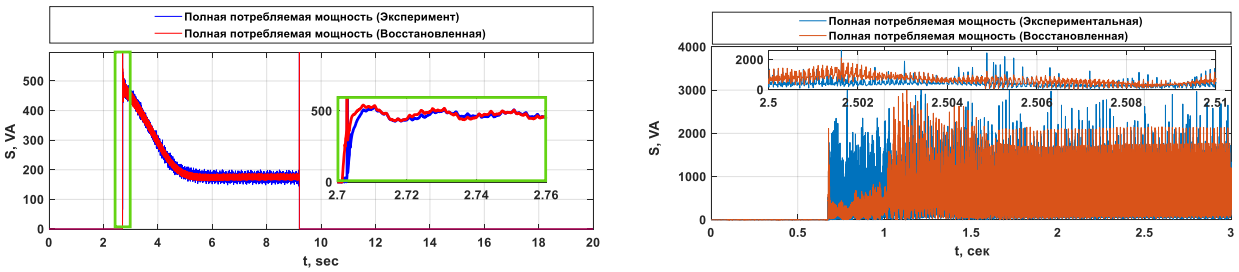
а) б)

Рисунок 5. *Итерационный процесс минимизации целевой функции; (а) – оценивание параметров АД; (б) – оценивание параметров участка кабельной линии, имитирующей кабель длинной 1 км*

Таблица 1. *Оцененные параметры схемы замещения АД и участка кабельной линии, ошибка восстановления сигнала мгновенной полной потребляемой мощности*

Асинхронный двигатель					
Наименование параметра	$\hat{R}_1$, Ом	$\hat{L}_{1\delta}$, Гн	$\hat{L}_m$, Гн	$\hat{R}'_2$, Ом	$\hat{J}$, кг·м^2
Оцененное значение	31.54	0.06	0.76	55.55	0.01
Ошибка восстановления сигнала полной потребляемой мощности	2.71 %				
Участок кабельной линии, имитирующий кабель длинной 1 км					
Наименование параметра	$\hat{R}_{\text{каб}}$, Ом	$\hat{L}_{\text{каб}}$, Гн	$\hat{C}_{\text{каб}}$, мкФ	$\hat{G}_{\text{каб}}$, мкСм	
Оцененное значение	58.70	1.30	0.13	18.39	
Ошибка восстановления сигнала полной потребляемой мощности	15.70 %				

На рисунке 6 представлен восстановленный сигнал мгновенной полной потребляемой мощности при использовании оцененных параметров относительно экспериментальных сигналов.



а) б)

Рисунок 6. *Экспериментальный и восстановленный сигнал полной потребляемой мощности (а) АД и (б) активной нагрузки подключенной к преобразователю частоты Danfoss через участок кабельной линии*

В пункте №4 вносим в ПО ГА ранее оцененные параметры схемы замещения АД и участка кабельной линии, длину участка кабельной линии, а также общую длину смонтированной кабельной линии. ЦФ, передаваемая на блок оптимизации представлена в (9). Информация, внесенная в программное обеспечение ГА представлена в таблице 2 и выделена жирным шрифтом.

Таблица 2. *Информация, вносимая в ПО ГА для оценивания параметров схемы замещения электротехнического комплекса «КЛ-АД»*

№, п/п	Наименование параметра настройки ГА	Оцененные параметры на предыдущих этапах	Нижняя граница поиска	Верхняя граница поиска
1	ЦФ	$\Psi_{S_mdl}\left(t, \hat{R}_{\text{каб}}, \hat{L}_{\text{каб}}, \hat{C}_{\text{каб}}, \hat{G}_{\text{каб}}, \hat{R}_1, \hat{L}_{1\delta}, \hat{L}_m, \hat{R'}_2, \hat{J}\right)$		
2	Огран. поиска по $\hat{R}_{\text{каб}}$, Ом	**58.70**	$0.8\cdot\hat{R}_{\text{каб}}$	$2\cdot\hat{R}_{\text{каб}}$
3	Огран. поиска по $\hat{L}_{\text{каб}}$, Гн	**1.30**	$0.8\cdot\hat{L}_{\text{каб}}$	$1.1\cdot\hat{L}_{\text{каб}}$
4	Огран. поиска по $\hat{C}_{\text{каб}}$, мкФ	**0.13**	$0.8\cdot\hat{C}_{\text{каб}}$	$1.1\cdot\hat{C}_{\text{каб}}$
5	Огран. поиска по $\hat{G}_{\text{каб}}$, мкСм	**18.39**	$0.8\cdot\hat{G}_{\text{каб}}$	$1.1\cdot\hat{G}_{\text{каб}}$
6	Огран. поиска по $\hat{R}_1$, Ом	**31.54**	$0.8\cdot\hat{R}_1$	$2\cdot\hat{R}_1$
7	Огран. поиска по $\hat{L}_{1\delta}$, Гн	**0.06**	$0.8\cdot\hat{L}_{1\delta}$	$1.1\cdot\hat{L}_{1\delta}$
8	Огран. поиска по $\hat{L}_m$, Гн	**0.76**	$0.8\cdot\hat{L}_m$,	$1.1\cdot\hat{L}_m$,
9	Огран. поиска по $\hat{R'}_2$, Ом	**55.55**	$0.8\cdot\hat{R'}_2$	$2\cdot\hat{R'}_2$
10	Огран. поиска по $\hat{J}$, кг·м^2	**0.01**	$0.8\cdot\hat{J}$	$1.1\cdot\hat{J}$
11	Длина участка кабельной линии, км	**1**		
12	Общая длина кабельной линии, км	**2**		

Основной задачей на этапе №4 разработанной методики является ограничение поискового пространства при минимизации ЦФ, с целью ускорить процесс оценивания параметров схемы замещения исследуемого электротехнического комплекса в сборе.

В результате процесса оптимизации ЦФ (9) с жестким ограничением поискового пространства были получены параметры схемы замещения всего комплекса (табл.3). Как видно в таблице 3 оцененные параметры позволяют восстановить полную потребляемую мощность с погрешностью в 3.09%.

Таблица 3. *Сводная таблица оцененных параметров схемы замещения электротехнического комплекса «КЛ-АД», ошибка восстановления сигнала мгновенной полной потребляемой мощности*

Наименование параметра	Оцененное значение	Ошибка восстановления сигнала мгновенной полной потребляемой мощности (10)
$\hat{R}_1$, Ом	39.77	3.09%
$\hat{L}_{1\delta}$, Гн	0.04	
$\hat{L}_m$, Гн	0.50	
$\hat{R}'_2$, Ом	46.69	
$\hat{J}$, кг·м^2	0.01	
$\hat{R}_{cab}$, Ом	118.94	
$\hat{L}_{cab}$, Гн	2.60	
$\hat{C}_{cab}$, мкФ	0.32	
$\hat{G}_{cab}$, мкСм	36.78	

Анализируя таблицу 3, можно утверждать, что разработанная методика позволяет оценивать параметры комплекса в сборе на основании измерений токов и напряжений на входе кабельной линии. Однако перед этим необходимо проводить подготовительные работы по оцениванию параметров каждого компонента исследуемого комплекса в отдельности для последующего жесткого ограничения поискового пространства при решении задачи оптимизации.

После оценивания параметров схемы замещения полунатурного экспериментального стенда была проведена апробация разработанного наблюдателя. Внешний вид стенда для апробации наблюдателя полного порядка вектора переменных состояния электротехнического комплекса «КЛ-АД» представлен на рис. 7.

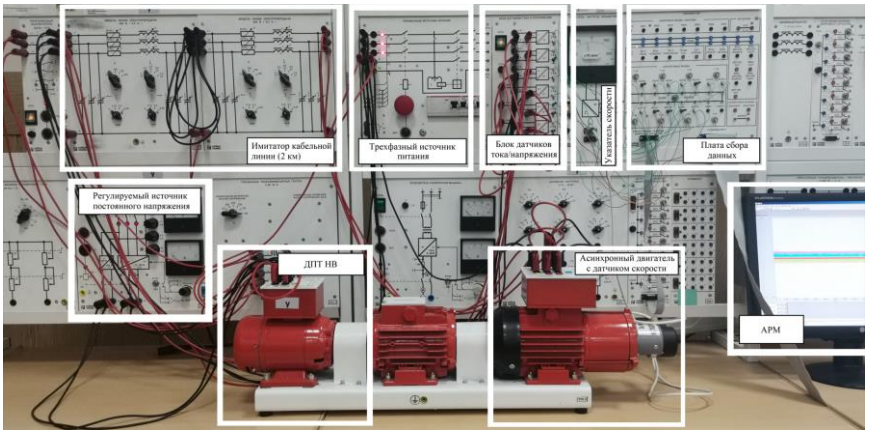


Рисунок 7. *Внешний вид экспериментальной установки*

Экспериментальная установка (рис. 7) состоит из источника питания, блока датчиков тока/напряжения, платы сбора данных, двух блоков модели кабельной линии, имитирующих кабель длиной 2 км, асинхронного двигателя мощностью 30 Вт, $n_{\text{синх}}$ = 1500 об/мин, двигателя постоянного тока мощностью 90 Вт, $n_{\text{синх}}$ = 1500 об/мин, регулируемого источника постоянного напряжения и датчика угловой скорости вращения. Система измерения использовалась такая же, как и в предыдущих экспериментах. В результате проведения эксперимента были получены мгновенные значения токов, напряжений и угловой скорости вращения в режимах работы пуск под нагрузкой/наброс дополнительной нагрузки/сброс дополнительной нагрузки/реверс/останов. После проведения эксперимента и фиксации данных был произведен перевод экспериментальных трехфазных мгновенных значений напряжения и тока в двухфазную систему координат αβ (1) и выполнен расчет потребляемой активной, реактивной и полной мощности по методике, описанной в

(2-4). После вычисления экспериментального значения мгновенной потребляемой полной мощности и первоначальной оценки потребляемой мощности наблюдателем электротехнического комплекса «КЛ-АД» была сформирована целевая функция (11) при заниженных параметрах $0.9 \cdot \hat{R}_{\text{каб}}, 0.9 \cdot \hat{L}_{\text{каб}}, 0.9 \cdot \hat{C}_{\text{каб}}, 0.9 \cdot \hat{G}_{\text{каб}}, 0.9 \cdot \hat{R}_1, 0.9 \cdot \hat{L}_{1\delta}, 0.9 \cdot \hat{L}_m, 0.9 \cdot \hat{R'}_2$.

$$F_{mdl}(t, \hat{k}_1, \hat{k}_2, \hat{k}_3, \hat{k}_4) = \int_a^b \left| S(t) - S_{\alpha\beta}(t, \hat{k}_1, \hat{k}_2, \hat{k}_3, \hat{k}_4) \right| dt; \quad (11)$$

Затем проведена оптимизация целевой функции с помощью ГА. В результате процесса минимизации целевой функции (11) был получен итерационный процесс процедуры минимизации, представленный на рисунке 8.

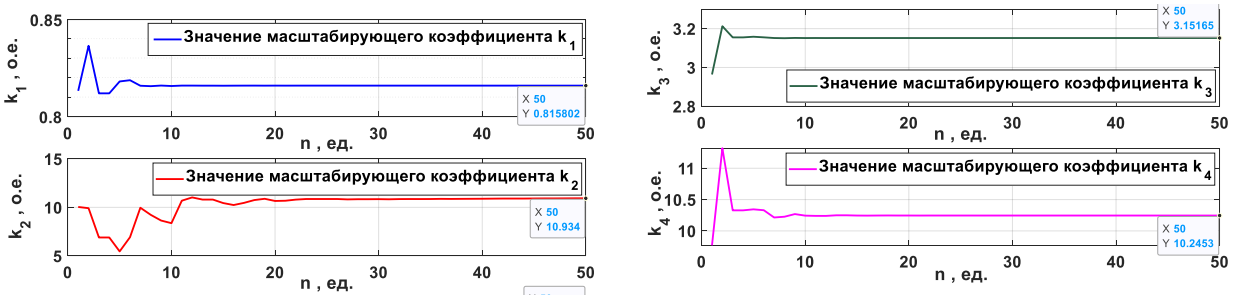


Рисунок 8. *Итерационный процесс минимизации целевой функции для определения значений масштабирующих коэффициентов наблюдателя полного порядка электротехнического комплекса «КЛ-АД»*

Оцененные значения масштабирующих коэффициентов k_1, k_2, k_3, k_4 и ошибку оценивания сигнала угловой скорости вращения (12) приведены в (табл.4).

$$\varepsilon_\omega = \frac{\int_a^b \left| \left(\omega(t) - \hat{\omega}(t)\right) \right| dt}{\int_a^b |(\omega(t))| \, dt} \cdot 100\% \quad (12)$$

где $\omega(t)$ – вектор вычисленной угловой скорости вращения, рад/сек; $\hat{\omega}(t)$ – вектор оцененной угловой скорости вращения, рад/сек.

Таблица 4. *Значения масштабирующих коэффициентов наблюдателя полного порядка и ошибка оценивания наблюдателем угловой скорости вращения ротора АД при найденных коэффициентах*

Масштабирующий коэффициент, о.е.	Значение	Ошибка оценивания угловой скорости вращения	Значение
k_1	0.815	ε_ω, %	11.37
k_2	10.934		
k_3	3.151	ε_ω, % на участке 5–25 сек	4.51
k_4	10.245		

Оцененный сигнал угловой скорости вращения ротора АД при использовании найденных масштабирующих коэффициентов (табл.4) и при номинальных параметрах схемы замещения (табл.3) представлен на рис. 9.

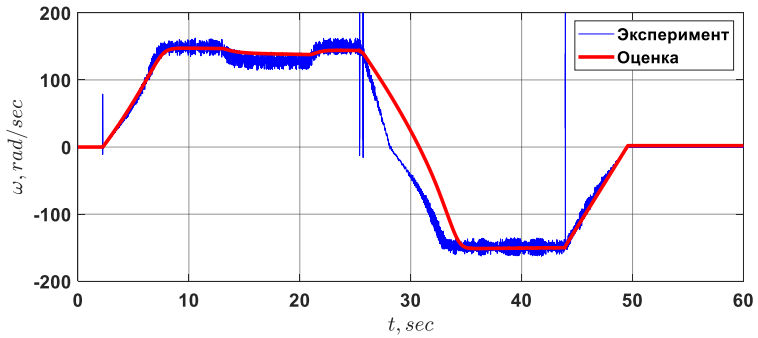


Рисунок 9. *Экспериментальный и оцененный сигнал угловой скорости вращения ротора АД, подключенного к источнику питания через кабельную линию*

Для проверки параметрической робастности настроенного наблюдателя был проведен полный факторный анализ 256 комбинаций электрических параметров схемы замещения экспериментального электротехнического комплекса «КЛ-АД» в диапазоне изменения от 0.9 до 1.1 номинальных значений каждого электрического параметра настраиваемой математической модели в наблюдателе (6) (рис.10). Ошибка оценивания угловой скорости вращения (12) вычислялась на участке работы 5–25 сек. Ошибка оценивания полной потребляемой мощности на участке работы 5–25 сек вычислялась по (10).

Таблица 5. *Сводная таблица ошибки оценивания угловой скорости вращения и полной потребляемой мощности при изменении электрических параметров (изменение параметров кодируется в бинарном виде)* $k_1 = 0.815$, $k_2 = 10.934$, $k_3 = 3.151$, $k_4 = 10.245$

№ опыта	Величина изменения электрического параметра от номинального, о.е.								ε_s, %	ε_ω, %
	$R_{\text{каб}}$, Ом	$L_{\text{каб}}$, Гн	$C_{\text{каб}}$, Ф	$G_{\text{каб}}$, См	R_1, Ом	R_2', Ом	$L_{1\sigma}$, Гн	L_m, Гн		
0	$0.9{\cdot}R_{\text{каб}}$	$0.9{\cdot}L_{\text{каб}}$	$0.9{\cdot}C_{\text{каб}}$	$0.9{\cdot}G_{\text{каб}}$	$0.9{\cdot}R_1$	$0.9{\cdot}R_2'$	$0.9{\cdot}L_{1\sigma}$	$0.9{\cdot}L_m$	16.15	6.13
17	$0.9{\cdot}R_{\text{каб}}$	$0.9{\cdot}L_{\text{каб}}$	$0.9{\cdot}C_{\text{каб}}$	$1.1{\cdot}G_{\text{каб}}$	$0.9{\cdot}R_1$	$0.9{\cdot}R_2'$	$0.9{\cdot}L_{1\sigma}$	$1.1{\cdot}L_m$	16.56	5.22
34	$0.9{\cdot}R_{\text{каб}}$	$0.9{\cdot}L_{\text{каб}}$	$1.1{\cdot}C_{\text{каб}}$	$0.9{\cdot}G_{\text{каб}}$	$0.9{\cdot}R_1$	$0.9{\cdot}R_2'$	$1.1{\cdot}L_{1\sigma}$	$0.9{\cdot}L_m$	6.13	6.62
51	$0.9{\cdot}R_{\text{каб}}$	$0.9{\cdot}L_{\text{каб}}$	$1.1{\cdot}C_{\text{каб}}$	$1.1{\cdot}G_{\text{каб}}$	$0.9{\cdot}R_1$	$0.9{\cdot}R_2'$	$1.1{\cdot}L_{1\sigma}$	$1.1{\cdot}L_m$	6.88	6.53
68	$0.9{\cdot}R_{\text{каб}}$	$1.1{\cdot}L_{\text{каб}}$	$0.9{\cdot}C_{\text{каб}}$	$0.9{\cdot}G_{\text{каб}}$	$0.9{\cdot}R_1$	$1.1{\cdot}R_2'$	$0.9{\cdot}L_{1\sigma}$	$0.9{\cdot}L_m$	20.75	5.75
85	$0.9{\cdot}R_{\text{каб}}$	$1.1{\cdot}L_{\text{каб}}$	$0.9{\cdot}C_{\text{каб}}$	$1.1{\cdot}G_{\text{каб}}$	$0.9{\cdot}R_1$	$1.1{\cdot}R_2'$	$0.9{\cdot}L_{1\sigma}$	$1.1{\cdot}L_m$	21.20	5.71
102	$0.9{\cdot}R_{\text{каб}}$	$1.1{\cdot}L_{\text{каб}}$	$1.1{\cdot}C_{\text{каб}}$	$0.9{\cdot}G_{\text{каб}}$	$0.9{\cdot}R_1$	$1.1{\cdot}R_2'$	$1.1{\cdot}L_{1\sigma}$	$0.9{\cdot}L_m$	6.47	6.41
119	$0.9{\cdot}R_{\text{каб}}$	$1.1{\cdot}L_{\text{каб}}$	$1.1{\cdot}C_{\text{каб}}$	$1.1{\cdot}G_{\text{каб}}$	$0.9{\cdot}R_1$	$1.1{\cdot}R_2'$	$1.1{\cdot}L_{1\sigma}$	$1.1{\cdot}L_m$	6.51	6.78
136	$1.1{\cdot}R_{\text{каб}}$	$0.9{\cdot}L_{\text{каб}}$	$0.9{\cdot}C_{\text{каб}}$	$0.9{\cdot}G_{\text{каб}}$	$1.1{\cdot}R_1$	$0.9{\cdot}R_2'$	$0.9{\cdot}L_{1\sigma}$	$0.9{\cdot}L_m$	16.77	8.08
153	$1.1{\cdot}R_{\text{каб}}$	$0.9{\cdot}L_{\text{каб}}$	$0.9{\cdot}C_{\text{каб}}$	$1.1{\cdot}G_{\text{каб}}$	$1.1{\cdot}R_1$	$0.9{\cdot}R_2'$	$0.9{\cdot}L_{1\sigma}$	$1.1{\cdot}L_m$	17.24	7.12
170	$1.1{\cdot}R_{\text{каб}}$	$0.9{\cdot}L_{\text{каб}}$	$1.1{\cdot}C_{\text{каб}}$	$0.9{\cdot}G_{\text{каб}}$	$1.1{\cdot}R_1$	$0.9{\cdot}R_2'$	$1.1{\cdot}L_{1\sigma}$	$0.9{\cdot}L_m$	6.09	4.96
187	$1.1{\cdot}R_{\text{каб}}$	$0.9{\cdot}L_{\text{каб}}$	$1.1{\cdot}C_{\text{каб}}$	$1.1{\cdot}G_{\text{каб}}$	$1.1{\cdot}R_1$	$0.9{\cdot}R_2'$	$1.1{\cdot}L_{1\sigma}$	$1.1{\cdot}L_m$	6.63	5.17
204	$1.1{\cdot}R_{\text{каб}}$	$1.1{\cdot}L_{\text{каб}}$	$0.9{\cdot}C_{\text{каб}}$	$0.9{\cdot}G_{\text{каб}}$	$1.1{\cdot}R_1$	$1.1{\cdot}R_2'$	$0.9{\cdot}L_{1\sigma}$	$0.9{\cdot}L_m$	20.21	9.20
221	$1.1{\cdot}R_{\text{каб}}$	$1.1{\cdot}L_{\text{каб}}$	$0.9{\cdot}C_{\text{каб}}$	$1.1{\cdot}G_{\text{каб}}$	$1.1{\cdot}R_1$	$1.1{\cdot}R_2'$	$0.9{\cdot}L_{1\sigma}$	$1.1{\cdot}L_m$	20.16	9.22
238	$1.1{\cdot}R_{\text{каб}}$	$1.1{\cdot}L_{\text{каб}}$	$1.1{\cdot}C_{\text{каб}}$	$0.9{\cdot}G_{\text{каб}}$	$1.1{\cdot}R_1$	$1.1{\cdot}R_2'$	$1.1{\cdot}L_{1\sigma}$	$0.9{\cdot}L_m$	6.86	7.07
255	$1.1{\cdot}R_{\text{каб}}$	$1.1{\cdot}L_{\text{каб}}$	$1.1{\cdot}C_{\text{каб}}$	$1.1{\cdot}G_{\text{каб}}$	$1.1{\cdot}R_1$	$1.1{\cdot}R_2'$	$1.1{\cdot}L_{1\sigma}$	$1.1{\cdot}L_m$	6.85	7.35

Рисунок 10. *Результаты полного факторного эксперимента при исследовании ошибки оценивания угловой скорости вращения АД (красная) и мгновенной полной потребляемой мощности (синяя)*

В результате разработки НПП удалось косвенно, только на основании измерения токов и напряжений на входе кабельной линии, оценить угловую скорость вращения вала АД в составе экспериментальной установки и обеспечить параметрическую робастность разработанного наблюдателя полного порядка.

Основные результаты работы

В диссертации изложены новые научно обоснованные технические решения в виде методики оценивания параметров и вектора переменных состояния электротехнического комплекса «КЛ-АД». Разработанная методика оценивания параметров стала одним из основных компонентов при реализации наблюдателя полного порядка вектора переменных состояния электротехнического комплекса «КЛ-АД». В свою очередь, разработанный наблюдатель ляжет в основу векторной системы управления погружным электродвигателем, что позволит правильно, с точки зрения специалистов в области электропривода, переводить низко- и средне-дебитные скважины на циклический режим эксплуатации без существенного снижения среднего срока наработки на отказ погружного оборудования. Выполненные в диссертационной работе научные исследования представлены следующими новыми результатами:

1. Разработана методика оценивания параметров электротехнического комплекса «КЛ-АД» на основе баланса мгновенной полной потребляемой мощности. Методика состоит из 6 пунктов. Основная идея разработанной методики заключается в поэтапной оценке параметров схемы замещения АД и участка кабельной линии для задания ограничения поискового пространства в процедуре оценивания параметров электротехнического комплекса «КЛ-АД» в сборе.
2. В качестве инструмента минимизации целевой функции применен ГА с ограничением поискового пространства. Применение ГА позволило отойти от классических методов решения целевой функции и избавиться от проблемы, связанной с появлением разрывов первого и второго рода при взятии производных от зашумленного сигнала.

3. В результате экспериментальной апробации разработанной методики были получены параметры схемы замещения исследуемого комплекса, которые позволили, основываясь только на данных полученных на входе кабельной линии, восстановить сигнал полной потребляемой мощности с приемлемой точностью.

4. Разработан наблюдатель полного порядка вектора переменных состояния электротехнического комплекса «КЛ-АД» с оперативным мониторингом момента сопротивления, отличающийся от известных тем, что кабельная линия представлена редуцированной моделью с сосредоточенными параметрами. Даны рекомендации по определению количества звеньев редуцированной математической модели кабельной линии. Обеспечена погрешность оценивания угловой скорости вращения на участке «пуск под нагрузкой/наброс дополнительной нагрузки/сброс дополнительной нагрузки» менее 5 %.

5. Разработана методика настройки масштабирующих коэффициентов в наблюдателе полного порядка вектора переменных состояния электротехнического комплекса. Основная идея заключается в том, что в процессе минимизации целевой функции $F\left(t, \hat{k}_1, \hat{k}_2, \hat{k}_3, \hat{k}_4\right)$ и поиска значений масштабирующих коэффициентов $\hat{k}_1, \hat{k}_2, \hat{k}_3, \hat{k}_4$ наблюдателя полного порядка необходимо заведомо занизить оцененные параметры схемы замещения $R_{\text{каб}}, L_{\text{каб}}, C_{\text{каб}}, G_{\text{каб}}, R_1, L_{1\delta}, L_m, R'_2, J$ электротехнического комплекса «КЛ-АД» в 0.9 раз. Разработанная методика настройки масштабирующих коэффициентов обеспечила работоспособность наблюдателя при изменении каждого электрического параметра схемы замещения исследуемого комплекса на 10 % в большую и меньшую сторону.

6. Проведен полный факторный эксперимент для восьми факторов. Выполнено 2^8=256 опытов, по результатам которых выявлено, что при любой комбинации значений электрических параметров схемы замещения электротехнического комплекса «КЛ-АД», изменённых в диапазоне от 0.9 до 1.1 от номинальных значений, наблюдатель оценивает угловую скорость вращения на таком участке с погрешностью не более 10 %. На основании данных, полученных в ходе полного факторного эксперимента, можно сделать вывод о том, что методика настройки масштабирующих коэффициентов разработанного наблюдателя вектора переменных состояния электротехнического комплекса «КЛ-АД», позволяет обеспечить параметрическую робастность оценки вектора переменных состояния.

7. Подтверждена адекватность настраиваемой математической модели электротехнического комплекса «КЛ–АД» с помощью критерия Фишера. Проведен корреляционный анализ данных, полученных при проведении ПФЭ. Определено, что параметры схемы замещения $R_{\text{каб}}$, $L_{\text{каб}}$ и R_1 показывают значительную положительную корреляцию с ε_ω, тогда как параметр L_m имеет значительную отрицательную корреляцию с ε_ω.

Основные публикации по теме диссертации

Публикации в журналах, входящих в перечень ВАК

1. **Раков И.В.** Экспериментальное исследование работоспособности методики адаптивной идентификации электрических параметров асинхронной машины с разомкнутой обмоткой ротора в установившемся режиме на основе баланса мощностей // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2022. № 1. Т. 18. С. 63-76.
2. **Раков И.В.** Динамическая идентификация параметров схемы замещения асинхронного двигателя на основе баланса мгновенной полной мощности в установившемся режиме // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2023. № 1. Т. 19. С. 24-48.
3. **Раков И.В.** Методика оценивания параметров электротехнического комплекса «Кабельная линия – Асинхронный двигатель» на основе баланса потребляемой мощности // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2023. № 3. Т. 19. С. 101-117.

Публикации, индексируемые в реферативной базе данных SCOPUS

4. **И.В. Раков, А.С. Глазырин, С.Н. Кладиев** Разработка и настройка наблюдателя полного порядка для электротехнического комплекса «Кабельная линия – Асинхронный двигатель» // Известия Томского политехнического университета [Известия ТПУ]. Инжиниринг георесурсов. — 2023. — Т. 334, № 10. — С. 219-231.
5. **С.С. Шубин, В.У. Ямалиев, А.С. Глазырин, Д.С. Буньков, С.Н. Кладиев, И.В. Раков, Е.В. Боловин, В.З. Ковалев, Р.Н. Хамитов** Определение параметров схемы замещения погружного электродвигателя на основании данных испытаний // Известия Томского политехнического университета [Известия ТПУ]. Инжиниринг георесурсов. — 2021. — Т. 332, № 1. — С. 204-214.
6. **А.С. Глазырин, Ю.Н. Исаев, С.Н. Кладиев, А.П. Леонов, И.В. Раков, С.В. Колесников, С.В. Ланграф, А.А. Филипас, В.А. Копырин, Р.Н. Хамитов, В.З. Ковалев** Оптимизация порядка редуцированной динамической модели ненагруженного нефтепогружного кабеля на основе аппроксимации амплитудно-частотной характеристики // Известия Томского политехнического университета [Известия ТПУ]. Инжиниринг георесурсов. — 2021. — Т. 332, № 9. — С. 154-167.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

7. **Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2023689113.** Федеральная служба по интеллектуальной собственности. Программа для ЭВМ для оценивания параметров схемы замещения электротехнического комплекса «Кабельная линия Асинхронный двигатель» / Раков И.В. Дата регистрации: 26 декабря 2023 года.

Публикации в трудах конференций

8. **Раков И.В., Сунцов В.О.** Генетический алгоритм в задаче настройки наблюдателя вектора переменных состояния двигателя постоянного тока с пропорциональным принципом компенсации невязки по току // Современные проблемы машиностроения: Сборник трудов XV Международной научно-технической конференции, Томск, 22 – 25 ноября 2022, С. 67-69.

9. **Раков И.В.** Разработка наблюдателя Люенбергера полного порядка вектора переменных состояния участка кабельной линии с повышенной параметрической робастностью // Актуальные вопросы энергетики. – 2023. – Т. 5, № 1.

10. **Раков И.В.** Генетический алгоритм в задаче оценивания параметров асинхронного двигателя с короткозамкнутой обмоткой ротора на основе баланса мгновенной полной потребляемой мощности // Актуальные вопросы энергетики. – 2023. – Т. 5, № 1.