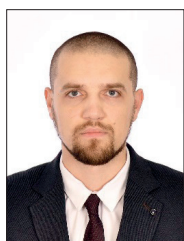


Научная статья

УДК 621.315.2.016.2:621.313.333.2

doi: 10.17122/1999-5458-2023-19-3-101-117

МЕТОДИКА ОЦЕНИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА «КАБЕЛЬНАЯ ЛИНИЯ — АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ» НА ОСНОВЕ БАЛАНСА ПОТРЕБЛЯЕМОЙ МОЩНОСТИ

*Иван Витальевич Раков**Ivan V. Rakov**инженер I категории группы внедрения инноваций
и изобретательской деятельности,
ООО «Газпром трансгаз Томск»,
Томск, Россия*

Актуальность

В Российской Федерации 82 % нефти добывается при помощи установок электроцентробежных насосов (УЭЦН), при этом всего 63 % скважин оборудовано подобными насосами. Так как больше половины эксплуатируемых скважин оборудовано УЭЦН, то разработка методов снижения затрат при эксплуатации подобных скважин является рациональной и логичной точкой приложения человеческих, материальных и финансовых ресурсов. Одним из методов повышения рентабельности добычи нефти из низко- и среднедебитных скважин является перевод скважины, оборудованной УЭЦН, с режима непрерывной эксплуатации на режим периодической эксплуатации скважины (ПЭС). При переводе на ПЭС происходит уменьшение потребления электроэнергии до 40 % и увеличение добычи нефти до 3 % за счет частичной гравитационной сепарации добываемого флюида на этапе накопления. Однако негативный эффект от перевода на технологию ПЭС проявляется в уменьшении среднего срока наработки на отказ из-за уменьшения ресурса гидрозащиты УЭЦН, ускоренного износа шайб в компоновке центробежного насоса, ускоренного износа промежуточных радиальных и упорных подшипников. Причиной появления негативных эффектов является повышенный уровень вибрации при интенсивном запуске.

Способ борьбы с обозначенными проблемами заключается в переходе с существующей скалярной разомкнутой системы на векторную бездатчиковую систему управления погружным электродвигателем (ПЭД). Для реализации указанной системы одним из этапов необходимо получить информацию о векторе переменных состояния подземной электротехнической части УЭЦН. Перспективный путь получения информации — создание наблюдателей переменных состояния на основе явных математических моделей. Для создания наблюдателя переменных состояний необходимо составить математические модели каждого компонента, входящего в исследу-

Ключевые слова

УЭЦН, периодическая эксплуатация, генетический алгоритм, асинхронный двигатель, кабельная линия, оценивание параметров схемы замещения, динамическая идентификация, GitHub

ему систему. При измерении токов и напряжений на выходе повышающего трансформатора УЭЦН исследуемой системой будет являться электротехнический комплекс «Кабельная линия — Асинхронный двигатель». Для реализации этого наблюдателя необходимо определить параметры схемы замещения исследуемого комплекса.

На основании вышеизложенного, разработка методики идентификации параметров схемы замещения электротехнического комплекса «Кабельная линия — Асинхронный двигатель» при измерении токов и напряжений на поверхности является своевременной и актуальной задачей, решение которой позволит создать предпосылки для реализации векторной системы управления ПЭД, увеличения надежности УЭЦН при ПЭС и, как следствие, увеличения рентабельности добычи нефти из низко- и среднедебитных нефтяных скважин.

Цель исследования

Разработать и экспериментально подтвердить работоспособность методики оценивания параметров электротехнического комплекса «Кабельная линия — Асинхронный двигатель» на основе баланса потребляемой мощности.

Методы исследования

Анализ литературных источников, системный анализ, математическое моделирование, экспериментальное исследование.

Результаты

Экспериментально опробована и подтверждена работоспособность методики оценивания параметров электротехнического комплекса «Кабельная линия — Асинхронный двигатель» на основе баланса потребляемой мощности.

Благодарности: Исследование выполнено 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»).

Для цитирования: 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. 101-117. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-3-101-117>.

Original article

METHODOLOGY FOR EVALUATING PARAMETERS OF THE ELECTRICAL COMPLEX «CABLE LINE — INDUCTION MOTOR» BASED ON POWER CONSUMPTION BALANCE

Relevance

In the Russian Federation, 82 % of oil is produced using Electric Submersible Pumps (ESP), while only 63 % of wells are equipped with such pumps. Since more than half of the operating wells are equipped with ESP, developing methods to reduce operating costs for these wells is a rational and logical allocation of human, material, and financial resources. One method to increase the profitability of oil production from low- and medium-flow rate wells is to transition a well equipped with ESP from continuous operation to intermittent operation, specifically cyclic operation. Intermittent operation reduces energy consumption by up to 40 % and

Keywords

ESP, intermittent operation, genetic algorithm, asynchronous motor, cable line, equivalent circuit parameter estimation, dynamic identification, GitHub

increases oil production by 3 % due to partial gravitational separation of the produced fluid during accumulation. However, the negative effect of transitioning to intermittent operation is reflected in the reduction of the average runtime before failure due to a decreased ESP hydroprotection resource, accelerated wear of the pump unit thrust bearings, and intermediate radial bearings. The cause of these negative effects is the increased vibration level during intensive startup.

One way to address these issues is transitioning from the existing scalar open-loop control system to a vector sensorless control system for the ESP. To implement such a system, it is necessary to obtain information about the vector of the ESP state variables. A promising approach to obtaining information about the ESP state involves creating observers based on explicit mathematical models. To create an observer for the state variables, mathematical models for each component of the studied system must be developed and combined into a unified system. When measuring currents and voltages at the output of the step-up transformer, the studied system will be an electric complex «Cable Line — Induction Motor». To implement this observer, it is necessary to determine the parameters of the equivalent circuit of the studied complex.

Based on the above, developing a methodology for identifying the parameters of the equivalent circuit of the electric complex «Cable Line — Induction Motor» when measuring currents and voltages on the surface is a timely and relevant task. Solving this task will create prerequisites for the implementation of a vector control system for the ESP, increasing the reliability of the ESP during intermittent operation, and consequently, increasing the profitability of oil production from low- and medium-flow rate oil wells.

Aim of research

To develop and experimentally confirm the effectiveness of a methodology for assessing the parameters of the electric complex «Cable Line — Induction Motor» based on the balance of consumed power.

Research methods

Analysis of literary sources, system analysis, mathematical modeling, experimental research.

Results

The effectiveness of the methodology for assessing the parameters of the electric complex «Cable Line — Induction Motor» based on the balance of consumed power has been experimentally tested and confirmed.

Acknowledgements: The study was carried out within the framework of the State Assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (topic No. FENG-2023-0001 «Predictive Control of Energy Flows of Electricity Generating Complexes in the Arctic and the Far North, with Stochastic Patterns of Consumption and Generation of Electrical Energy: Theory, Synthesis, Experiment»).

For citation: Rakov I. V. Metodika otsenivaniya parametrov elektrotekhnicheskogo kompleksa «Kabel'naya liniya – Asinkhronnyi dvigatel'» na osnove balansa potrebyaemoy moshchnosti [Methodology for Evaluating Parameters of the Electrical Complex «Cable Line – Induction Motor» Based on Power Consumption Balance]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy – Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, No. 3, Vol. 19, pp. 101-117 [in Russian]. <http://dx.doi.org/10.17122/1999-5458-2023-19-3-101-117>.

Введение

В связи с существенным истощением нефтеносных пластов на месторождениях России перед нефтедобывающими компаниями встает вопрос об увеличении энергетической рентабельности добычи нефти [1]. Так как в Российской Федерации 82 % нефти добывается при помощи установок электроцентробежных насосов (УЭЦН) [2], то приложение усилий для оптимизации режимов работы УЭЦН может принести большой энергетической и экономической эффект. Один из таких методов оптимизации работы УЭЦН заключается в переводе скважины с непрерывного режима на режим периодической эксплуатации.

На нескольких месторождениях западной Сибири и Урала за 3 года доля установок [3], работающих в периодическом режиме эксплуатации (ПЭС), увеличилась с 41 % до 78 %. Перевод на такую технологию дает уменьшение потребления электроэнергии до 40 % и увеличение количества добываемой нефти до 3 % [4]. Однако при изменении режима эксплуатации на ПЭС средний срок наработки на отказ снизился с 420 до 149 сут [3], т.е. перевод в большом объеме скважин на ПЭС приводит к повышению количества вышедших из строя погружных электродвигателей (ПЭД) и компонентов насоса в ограниченный промежуток времени; это, в свою очередь, может нивелировать полученные положительные эффекты от экономии электроэнергии и увеличения количества добытой нефти за счет расхода средств на ремонт ПЭД.

Первопричиной уменьшения среднего срока наработки на отказ является уменьшение времени разгона ПЭД с нескольких десятков минут до нескольких десятков секунд. Время разгона изменяется исходя из технологических требований предприятия. Это влечет за собой увеличение бросков тока / момента и, как след-

ствие, увеличение крутильных колебаний и вибраций. При увеличении вибрации происходит рост утечек через торцовые уплотнения в 5–10 раз. Объем масла уменьшается, что приводит к попаданию пластовой жидкости внутрь маслосистемы, попаданию добываемого флюида в полости ПЭД и, как следствие, ускоренному старению изоляции и межвитковым замыканиям [3].

Вариант, который обеспечит максимально интенсивный разгон при минимальных бросках тока и момента, — это переход на векторную систему управления. Основная проблема, стоящая перед реализацией векторной системы управления, — это отсутствие информации о переменных состоянии 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. Для разработки наблюдателя переменных состояний ПЭД необходимо составить математические модели каждого электротехнического компонента, входящего в силовую электрическую цепь УЭЦН, а именно «Преобразователь частоты (ПЧ) — синус-фильтр (СФ) — повышающий трансформатор (ПТ) — нефтепогружной кабель (НПК) — погружной электродвигатель (ПЭД)», затем объединить каждую отдельную модель в общую систему [5]. Если обеспечить измерение токов и напряжений на выходе ПТ, входе НПК, то достаточно будет составить только математические модели НПК и ПЭД, а затем объединить их в общую систему, получив таким образом модель «кабельная линия — асинхронный двигатель». Одной из преград для реализации наблюдателя вектора переменных состояния электротехнического комплекса «Кабельная линия

— Асинхронный двигатель» является отсутствие методик оценивания параметров схемы замещения этого комплекса на основании наземных измерений.

Методика оценивания параметров электротехнического комплекса «Кабельная линия — Асинхронный двигатель» на основе баланса потребляемой мощности

Анализ литературных источников [6–10] показал, что для задачи идентификации параметров электротехнического комплекса «Кабельная линия — Асинхронный двигатель», включенного в систему УЭЦН, может принципиально подходить только метод динамической идентификации. Этот метод подходит из-за того, что исследуемый электротехнический комплекс находится в агрессивных термохимических внешних условиях на большой глубине, где в зависимости от режима эксплуатации меняются электрические параметры системы. Для обеспечения адекватной оценки параметров необходимо в процессе эксплуатации с заданной периодичностью проводить процесс идентификации и корректировать значения параметров схемы замещения в наблюдателе. Помимо окружающей среды, также необходимо учитывать ограничение, которое исходит из специфики режима работы при ПЭС [4, 11–13], а именно: ограниченный во времени период останова (от 10 до 30 мин), за который необходимо провести процедуру оценивания параметров. Так как математическое описание электротехнического комплекса «Кабельная линия — Асинхронный двигатель» представляет собой сложную динамическую настраиваемую модель, у которой только размерность по оцениваемым параметрам равняется 9, основную работу по оценке параметров необходимо провести до того, как весь комплекс будет спущен в скважину.

Необходимо заранее оценить параметры схемы замещения небольшого участка кабельной линии и асинхронного двигателя, а затем проводить процедуру уточнения параметров, что можно реализовать за более короткий промежуток времени.

Учитывая ограничения во времени на процедуру оценивания параметров всей исследуемой системы, а также необходимость корректировки параметров в процессе работы, была сформирована методика оценивания параметров электротехнического комплекса «Кабельная линия — Асинхронный двигатель». Методика состоит из 6 пунктов:

1. Оценить параметры асинхронного двигателя, планируемого к установке;
2. Оценить параметры участка кабельной линии (не менее 200 м), планируемого к установке;
3. Смонтировать установку электротехнического комплекса «Кабельная линия — Асинхронный двигатель» с измерением токов / напряжений на входе кабельной линии;
4. Внести в ПО ранее оцененные параметры, длину участка кабельной линии и фактическую длину кабельной линии;
5. Оценить параметры электротехнического комплекса «Кабельная линия — Асинхронный двигатель»;
6. Произвести повторную оценку параметров электротехнического комплекса «Кабельная линия — Асинхронный двигатель» при увеличении невязки между полной потребляемой мощностью объекта и модели более 25 % или по условию останова исследуемого комплекса.

Математическая модель исследуемого комплекса

Электротехнический комплекс «Кабельная линия — Асинхронный двигатель» с учетом длины кабельной линии

описывается системой дифференциальных уравнений, в которой кабель представлен редуцированной математической моделью (1). Порядок редуцированной математической модели кабельной линии зависит от частоты питающей сети и длины кабельной линии [5]. При частоте питания 50 Гц количество звеньев редуцированной математической модели можно указывать из расчета 1 звено на 1 км кабельной линии. При нецелочисленной длине кабельной линии необходимо указывать количество звеньев в большую сторону, т.е. при длине кабельной линии в 3,5 км количество звеньев будет равняться 4.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_{1\alpha_каб}(t)}{dt} = \frac{(u_{1\alpha_вх}(t) - i_{1\alpha_каб}(t) \cdot R_{каб}/n - u_{1\alpha_вых}(t))}{L_{каб}/n} \\ \frac{di_{1\beta_каб}(t)}{dt} = \frac{(u_{1\beta_вх}(t) - i_{1\beta_каб}(t) \cdot R_{каб}/n - u_{1\beta_вых}(t))}{L_{каб}/n} \\ \frac{du_{1\alpha_вых}(t)}{dt} = \frac{(i_{1\alpha_каб}(t) - u_{1\alpha_вых}(t) \cdot C_{каб}/n - i_{2\alpha_каб}(t))}{C_{каб}/n} \\ \frac{du_{1\beta_вых}(t)}{dt} = \frac{(i_{1\beta_каб}(t) - u_{1\beta_вых}(t) \cdot C_{каб}/n - i_{2\beta_каб}(t))}{C_{каб}/n} \\ \vdots \\ \frac{di_{(n)\alpha_каб}(t)}{dt} = \frac{(u_{(n-1)\alpha_вых}(t) - i_{(n)\alpha_каб}(t) \cdot R_{каб}/n - u_{(n)\alpha_вых}(t))}{L_{каб}/n} \\ \frac{di_{(n)\beta_каб}(t)}{dt} = \frac{(u_{(n-1)\beta_вых}(t) - i_{(n)\beta_каб}(t) \cdot R_{каб}/n - u_{(n)\beta_вых}(t))}{L_{каб}/n} \\ \frac{du_{(n)\alpha_вых}(t)}{dt} = \frac{(i_{(n)\alpha_каб}(t) - u_{(n)\alpha_вых}(t) \cdot C_{каб}/n - i_{1\alpha}(t))}{C_{каб}/n} \\ \frac{du_{(n)\beta_вых}(t)}{dt} = \frac{(i_{(n)\beta_каб}(t) - u_{(n)\beta_вых}(t) \cdot C_{каб}/n - i_{1\beta}(t))}{C_{каб}/n} \\ \frac{di_{1\alpha}(t)}{dt} = \frac{1}{\sigma \cdot L_1} \cdot u_{(n)\alpha_вых}(t) - \frac{R_2}{\sigma \cdot L_1} \cdot i_{1\alpha}(t) + \\ + \frac{R'_2 \cdot L_m}{\sigma \cdot L_1 \cdot L_2} \cdot \Psi_{2\alpha}(t) + \frac{L_m}{\sigma \cdot L_1 \cdot L_2} \cdot z_p \cdot \omega(t) \cdot \Psi_{2\beta}(t) \\ \frac{di_{1\beta}(t)}{dt} = \frac{1}{\sigma \cdot L_1} \cdot u_{(n)\beta_вых}(t) - \frac{R_2}{\sigma \cdot L_1} \cdot i_{1\beta}(t) + \\ + \frac{R'_2 \cdot L_m}{\sigma \cdot L_1 \cdot L_2} \cdot \Psi_{2\beta}(t) - \frac{L_m}{\sigma \cdot L_1 \cdot L_2} \cdot z_p \cdot \omega(t) \cdot \Psi_{2\alpha}(t) \\ \frac{d\Psi_{2\alpha}(t)}{dt} = -\frac{R'_2}{L_2} \cdot \Psi_{2\alpha}(t) + \\ + \frac{R'_2 \cdot L_m}{L_2} \cdot i_{1\alpha}(t) - z_p \cdot \omega(t) \cdot \Psi_{2\beta}(t) \\ \frac{d\Psi_{2\beta}(t)}{dt} = -\frac{R'_2}{L_2} \cdot \Psi_{2\beta}(t) + \\ + \frac{R'_2 \cdot L_m}{L_2} \cdot i_{1\beta}(t) + z_p \cdot \omega(t) \cdot \Psi_{2\alpha}(t) \\ M_{эм}(t) = \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \times \\ \times (\Psi_{2\alpha}(t) \cdot i_{1\beta}(t) + \Psi_{2\beta}(t) \cdot i_{1\alpha}(t)) \\ \frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{1}{J} \cdot (M_{эм}(t) - M_c(t)) \end{array} \right. \quad (1)$$

где $i_{(n)\alpha_каб}(t)$ — состояние вектора тока в кабеле в звене n в момент времени t по оси α ;

$i_{(n)\beta_каб}(t)$ — состояние вектора тока в кабеле в звене n в момент времени t по оси β ;

$u_{\alpha_вх}(t)$ — проекция вектора входного измеренного напряжения в момент времени t по оси α ;

$u_{\beta_вх}(t)$ — проекция вектора входного измеренного напряжения в момент времени t по оси β ;

$u_{(n)\alpha_вых}(t)$ — состояние вектора выходного напряжения кабеля в звене n в момент времени t по оси α ;

$u_{(n)\beta_вых}(t)$ — состояние вектора выходного напряжения кабеля в звене n в момент времени t по оси β ;

$i_{1\alpha}(t)$ — состояние вектора тока статора в момент времени t по оси α ;

$i_{1\beta}(t)$ — состояние вектора тока статора в момент времени t по оси β ;

$\Psi_{2\alpha}(t)$ — состояние вектора потокосцепления ротора в момент времени t по оси α ;

$\Psi_{2\beta}(t)$ — состояние вектора потокосцепления ротора в момент времени t по оси β ;

$M_{эм}(t)$ — состояние электромагнитного момента АД;

$M_c(t)$ — состояние момента статического сопротивления на валу АД;

$\omega(t)$ — угловая скорость вращения ротора АД;

$R_{каб}$ — сопротивление токоведущих жил;

$L_{каб}$ — индуктивность токоведущих жил;

$C_{каб}$ — эквивалентная ёмкость фазы относительно двух других фаз и брони;

$G_{каб}$ — проводимость изоляции;

$L_1 = L_{1\sigma} + L_m$ — эквивалентная индуктивность обмотки статора;

$L'_2 = L'_{2\sigma} + L_m$ — эквивалентная индуктивность обмотки ротора;

$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_1 L_{2\sigma}}$ — коэффициент рассеяния;

$R_3 = R_1 + \frac{R_2' L_m^2}{L_{2\sigma}}$ — 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.

Процедура оценивания параметров схемы замещения на основе баланса потребляемой мощности

Процедура оценивания параметров схемы замещения объекта исследования на основе потребляемой мощности приведена на рисунке 1.

Основная идея динамической идентификации [14] параметров схемы замещения заключается в том, что на нестационарный динамический объект подается входное напряжение, откликом объекта является ток. Записанные значения тока и напряжения передаются в микропроцессорную систему управления. На математическую модель исследуемого

объекта подается входное воздействие в виде значений зафиксированного ранее напряжения, откликом модели является значение тока.

После того как зафиксировано напряжение, получены значения отклика объекта и модели, данные передаются на блоки вычисления потребляемой мощности объекта и модели соответственно. Потребляемая полная мощность принята в качестве критерия для оценивания параметров, во-первых, по тому, что при изменении какого-либо электрического параметра в электротехническом комплексе изменится потребляемая им активная, реактивная и полная мощность, а так как параметры в настраиваемой математической модели не изменяются, то возникает невязка между показаниями потребляемой мощности объекта и модели. Во-вторых, потребляемая полная мощность содержит в себе информацию о всех входных воздействиях и откликах объекта исследования, что отсекает необходимость дальнейшего выбора критерия построения целевой функции. Для вычисления активной и реактивной потребляемой мощности, без использования фазометра, необходимо перевести зафиксированное напряжение и токи из трехфазной системы в двухфазную $\alpha\beta$ по формуле:

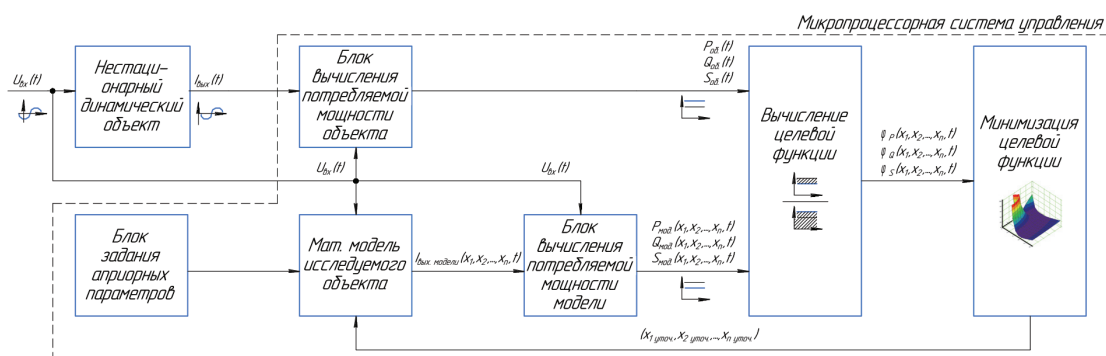


Рисунок 1. Схема процедуры оценивания параметров на основе баланса потребляемой мощности

Figure 1. Scheme of the procedure for estimating parameters based on the power balance consumption

$$\begin{aligned}
U_{\alpha}(t) &= U_A(t); \\
U_{\beta}(t) &= \frac{U_B(t) - U_C(t)}{\sqrt{3}}; \\
I_{\alpha}(t) &= I_A(t); \\
I_{\beta}(t) &= \frac{I_B(t) - I_C(t)}{\sqrt{3}},
\end{aligned} \quad (2)$$

где $I_{\alpha}(t)$ — проекция результирующего вектора тока по оси α ;

$U_{\alpha}(t)$ — проекция вектора входного измеренного напряжения по оси α ;

$I_{\beta}(t)$ — проекция результирующего вектора тока по оси β ;

$U_{\beta}(t)$ — проекция вектора входного измеренного напряжения по оси β .

Затем путем скалярного и векторного [15, 16] произведения масштабированных векторов для объекта исследования $\bar{I}\left(\frac{I_{\alpha}(t)}{\sqrt{2}}, \frac{I_{\beta}(t)}{\sqrt{2}}\right) \bar{U}\left(\frac{U_{\alpha}(t)}{\sqrt{2}}, \frac{U_{\beta}(t)}{\sqrt{2}}\right)$, для модели объекта исследования $\bar{I}\left(\frac{\hat{I}_{\alpha}(t, \hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n)}{\sqrt{2}}, \frac{\hat{I}_{\beta}(t, \hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n)}{\sqrt{2}}\right) \bar{U}\left(\frac{U_{\alpha}(t)}{\sqrt{2}}, \frac{U_{\beta}(t)}{\sqrt{2}}\right)$, заданных координатами в ортогональном базисе, необходимо вычислить

активную мощность:

$$\begin{aligned}
&\hat{P}_{\alpha\beta}(t, \hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n) = \\
&= m \left(\frac{\hat{I}_{\alpha}(t, \hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n)}{\sqrt{2}} \cdot \frac{U_{\alpha}(t)}{\sqrt{2}} + \frac{\hat{I}_{\beta}(t, \hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n)}{\sqrt{2}} \cdot \frac{U_{\beta}(t)}{\sqrt{2}} \right); \quad (3)
\end{aligned}$$

реактивную мощность:

$$\begin{aligned}
&\hat{Q}_{\alpha\beta}(t, \hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n) = \\
&= m \left(\frac{\hat{I}_{\alpha}(t, \hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n)}{\sqrt{2}} \cdot \frac{U_{\beta}(t)}{\sqrt{2}} - \frac{\hat{I}_{\beta}(t, \hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n)}{\sqrt{2}} \cdot \frac{U_{\alpha}(t)}{\sqrt{2}} \right); \quad (4)
\end{aligned}$$

после вычисляется полная мощность:

$$\begin{aligned}
&\hat{S}_{\alpha\beta}(t, \hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n) = \\
&= \sqrt{\left(\hat{P}_{\alpha\beta}(t, \hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n)\right)^2 + \left(\hat{Q}_{\alpha\beta}(t, \hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n)\right)^2} \quad (5)
\end{aligned}$$

где m — количество фаз, ед.

Следующим шагом вычисляется невязка между полной потребляемой мощностью объекта и модели. Для описания невязки между экспериментальными и модельными значениями полной потребляемой мощности составляется целевая функция с позиции метода наименьших модулей:

$$\begin{aligned}
&\Psi_{S_{mdl}}(t, \hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n) = \\
&= \int_0^t |S(t) - S_{\alpha\beta}(t, \hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n)| dt, \quad (6)
\end{aligned}$$

где $S(t)$ — полная потребляемая мощность объекта исследования;

$S_{\alpha\beta}(t, \hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n)$ — состояние вектора полной потребляемой мощности в момент времени t ;

$\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n$ — параметры математической модели.

Сформированная целевая функция передается на блок минимизации. Общая задача многомерной минимизации формулируется следующим образом [17]: необходимо найти вектор параметров $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ таким образом, чтобы обеспечить минимизацию или максимизацию выбранной целевой функции $f(X) = [f_1(X), f_2(X), \dots, f_n(X)] \rightarrow \min/\max$, определенной на n -мерном евклидовом пространстве $\mathbb{R}^n$, заданной ограничениями области $g(X) = [g_1(X), g_2(X), \dots, g_j(X)]$.

В качестве инструмента минимизации целевой функции в данной статье будет применяться генетический алгоритм (ГА). Полный пример кода представлен в файловом хранилище [18], описание работы представлено в [14]. После минимизации целевой функции оцененные параметры передаются на математическую модель объекта исследования для вычисления ошибки восстановления сигнала полной потребляемой мощности.

Описание экспериментальных установок для апробирования разработанной методики оценивания параметров электротехнического комплекса «Кабельная линия — Асинхронный двигатель»

Схемы используемых экспериментальных установок для реализации пунктов 1, 2 и 5 методики оценивания параметров электротехнического комплекса «Кабельная линия — Асинхронный двигатель» представлены на рисунке 5.

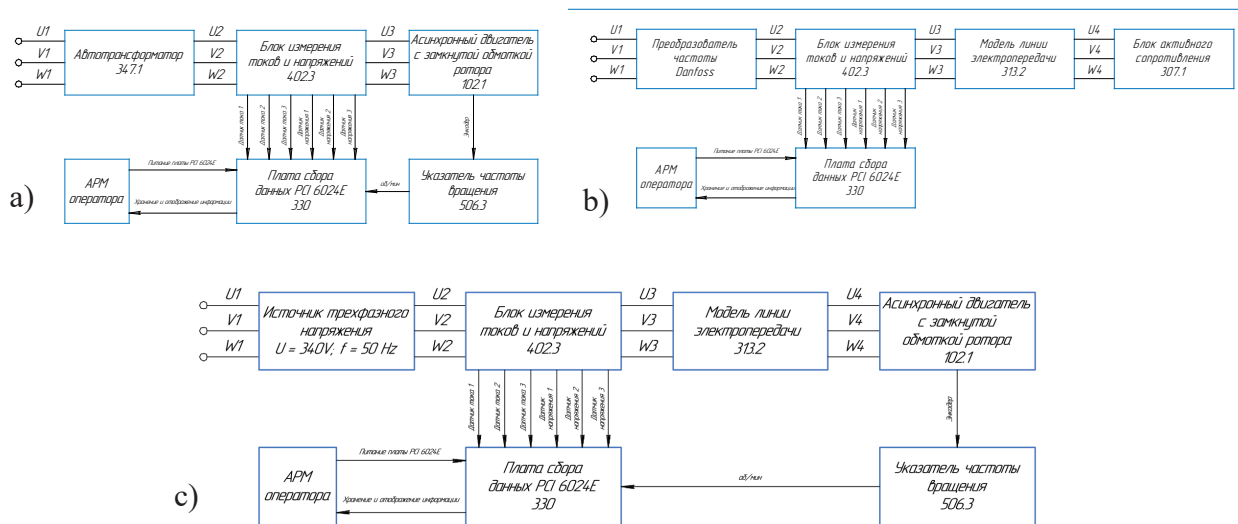


Рисунок 2. Схемы экспериментальных установок: для выполнения пункта № 1 разработанной методики (а), для выполнения пункта № 2 разработанной методики (б), для выполнения пункта № 5 разработанной методики (с)

Figure 2. Schemes of experimental setups: to carry out point No. 1 of the developed method (a), to carry out point No. 2 of the developed method (b), to carry out point No. 5 of the developed method (c)

Экспериментальная установка на рисунке 2, а состоит из регулируемого источника питания, блока датчиков тока / напряжения, платы сбора данных и асинхронного двигателя, который планируется к установке. Параметры асинхронного двигателя приведены в таблице 1.

Экспериментальная установка на рисунке 2, б состоит из преобразователя частоты *Danfoss*, блока датчиков тока / напряжения, платы сбора данных, участка кабельной линии имитирующей кабель длиной 1 км, который планируется к установке, и активной нагрузки. Пара-

метры участка кабельной линии и активной нагрузки приведены в таблице 2.

Экспериментальная установка на рисунке 2, с 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. Так как рассматриваемый объект исследования содержит в силовом канале синус-фильтр, то питание ПЭД также происходит от синусоидального напряжения. В связи с этим фактом применение в полу-

Таблица 1. Параметры асинхронного двигателя

Table 1. Parameters of the induction motor

$P_{ном}$, Вт	$n_{синх}$, об/мин	$n_{ном}$, об/мин	$I_{ном}$, А	$\eta_{ном}$, %	$\cos \varphi_{ном}$, о.е.
30	1500	1250	0,35	36	0,73

Таблица 2. Параметры участка кабельной линии и активной нагрузки

Table 2. Parameters of the cable line section and active load

R , Ом	L/R , Гн/Ом	C , мкФ	$R_{нагр}$, Ом
50	0,3 / 8	0,18	41,2

натурном экспериментальном стенде напряжения питания от промышленной сети является возможным, т.к. оно является синусоидальным.

Блок датчиков тока / напряжения во всех трех экспериментах используется один и тот же, содержит три измерительных преобразователя «ток — напряжение» типа HMS 20-P, три измерительных преобразователя «напряжение — напряжение» типа LV 25-1000. Плата сбора данных использовалась PCI 6024E компании National Instruments. Информация о метрологических характеристиках дат-

чиков и платы сбора данных представлена в работе [14].

В результате проведения трех экспериментов пуска на холостом ходу и останова выбегом были получены мгновенные значения токов / напряжений, представленные на рисунке 3.

После проведения экспериментов и фиксации данных был произведен перевод экспериментальных трехфазных мгновенных значений напряжения и тока в двухфазную систему координат $\alpha\beta$ (2), а затем выполнен расчет потребляемой активной, реактивной и полной мощности (3–5).

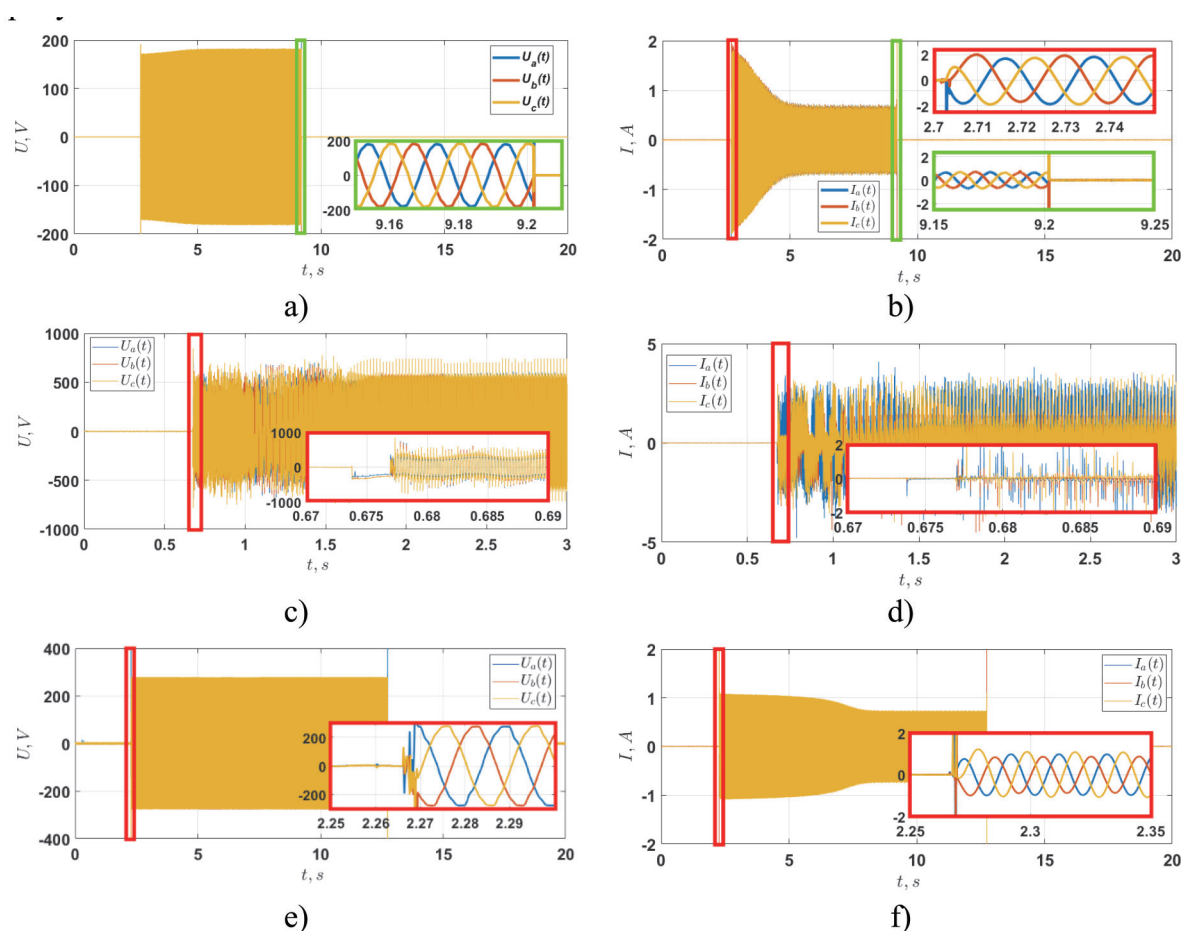


Рисунок 3. Напряжения / токи, зафиксированные при проведении экспериментальных исследований при: оценивании параметров схемы замещения АД (а, б), оценивании параметров схемы замещения участка кабельной линии (с, д), оценивании параметров схемы электротехнического комплекса «Кабельная линия — Асинхронный двигатель» (е, ф)

Figure 3. Voltages / currents recorded during experimental studies of the points of the developed technique: estimating the parameters of the induction motor equivalent circuit (a, b); estimating the parameters of the equivalent circuit of a cable line section (c, d); estimating the parameters of the electrical complex circuit «cable line — induction motor» (e, f)

Результаты расчетов

После получения экспериментальных значений потребляемой мощности в трех экспериментах были сформированы целевые функции:

$$\Psi_{S_mdl}(t, \hat{R}_1, \hat{L}_{1\delta}, \hat{L}_m, \hat{R}_2, \hat{J}) = \int_0^t |S(t) - S_{\alpha\beta}(t, \hat{R}_1, \hat{L}_{1\delta}, \hat{L}_m, \hat{R}_2, \hat{J})| dt; \quad (7)$$

$$\Psi_{S_mdl}(t, \hat{R}_{каб}, \hat{L}_{каб}, \hat{C}_{каб}, \hat{G}_{каб}) = \int_0^t |S(t) - S_{\alpha\beta}(t, \hat{R}_{каб}, \hat{L}_{каб}, \hat{C}_{каб}, \hat{G}_{каб})| dt; \quad (8)$$

$$\Psi_{S_mdl}(t, \hat{R}_{каб}, \hat{L}_{каб}, \hat{C}_{каб}, \hat{G}_{каб}, \hat{R}_1, \hat{L}_{1\delta}, \hat{L}_m, \hat{R}_2, \hat{J}) = \int_0^t |S(t) - S_{\alpha\beta}(t, \hat{R}_{каб}, \hat{L}_{каб}, \hat{C}_{каб}, \hat{G}_{каб}, \hat{R}_1, \hat{L}_{1\delta}, \hat{L}_m, \hat{R}_2, \hat{J})| dt. \quad (9)$$

В результате процесса минимизации целевых функций (7), (8) был получен итерационный процесс процедуры минимизации (рисунок 4).

Сведем полученные результаты в таблицу 3 и вычислим ошибку восстановления сигнала полной потребляемой мощности на основе идентифицированных параметров по формуле:

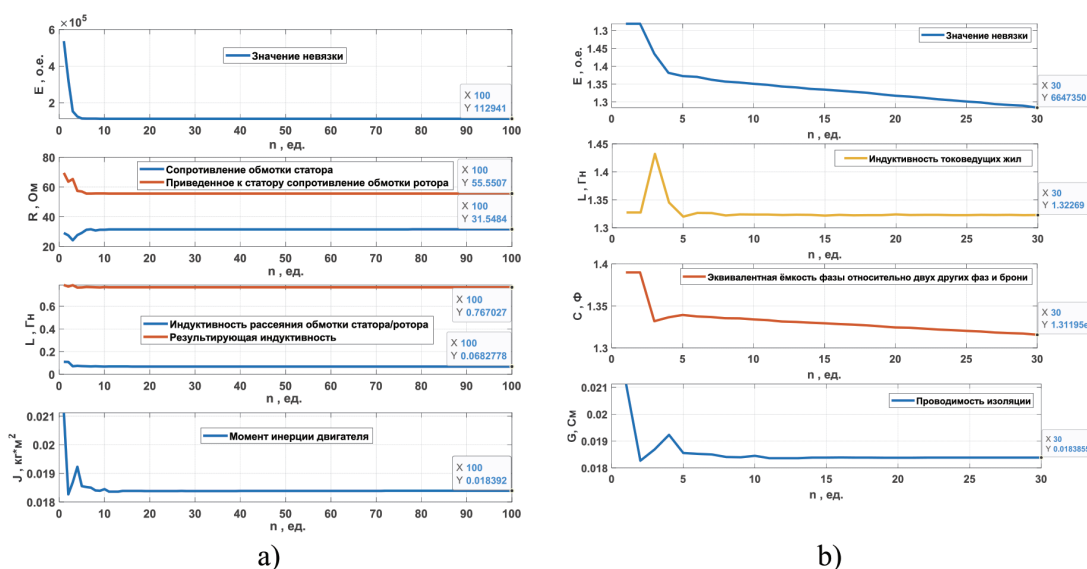


Рисунок 4. Итерационный процесс минимизации целевой функции: оценивание параметров АД (а); оценивание параметров участка кабельной линии, имитирующей кабель длиной 1 км (б)

Figure 4. Iterative process of minimizing the objective function: assessment of induction motor parameters (a); assessment of the parameters of a section of a cable line simulating a 1 km long cable (b)

Таблица 3. Сводная таблица идентифицированных параметров схемы замещения АД и участка кабельной линии

Table 3. Summary table of identified parameters of the equivalent circuit of the induction motor and the cable line section

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 длиной 1 км					
Наименование параметра	$\hat{R}_{\text{каб}}$	$\hat{L}_{\text{каб}}$	$\hat{C}_{\text{каб}}$	$\hat{G}_{\text{каб}}$	
Оцененное значение	58,70 Ом	1,30 Гн	0,13 мкФ	18,39 мкСм	
Ошибка восстановления сигнала полной потребляемой мощности	15,70 %				

$$\varepsilon_S = \frac{\int_0^t |S(t) - S_{\alpha\beta}(t, \hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n)| dt}{\int_0^t |S(t)| dt} \cdot 100. \quad (10)$$

Проследим на рисунке 5, как восстанавливается сигнал полной потребляемой мощности при использовании идентифицированных параметров относительно экспериментальных данных.

Переходим к пункту № 4 и вносим в ПО ранее оцененные параметры схемы замещения АД и участка кабельной линии, длину участка кабельной линии, а также общую длину смонтированной кабельной линии. Целевая функция, передаваемая на блок оптимизации, представлена в (9). Информация, внесенная в программное обеспечение генетического алгоритма, представлена в таблице 4 и выделена жирным шрифтом.

Основной задачей на этапе № 4 разработанной методики является ограничение поискового пространства решения целевой функции при ее минимизации с целью ускорить процесс оценивания параметров исследуемого электротехнического комплекса в сборе. В результате

процесса оптимизации целевой функции (9) с жестким ограничением поискового пространства были получены параметры схемы замещения всего комплекса. Результаты представлены в таблице 5.

Как видно в таблице 5, оцененные параметры позволяют восстановить полную потребляемую мощность с погрешностью в 3,09 %, а ошибка восстановления угловой скорости вращения (11) составляет 5,31 %:

$$\varepsilon_\omega = \frac{\int_0^t |\omega(t) - \omega(t, \hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n)| dt}{\int_0^t |\omega(t)| dt} \cdot 100. \quad (11)$$

Построим графики потребляемой полной мощности угловой скорости вращения (рисунок 6).

Обсуждение результатов

Проанализировав данные таблицы 5 и рисунка 6, можно утверждать, что разработанная методика позволяет оценивать параметры электротехнического комплекса в сборе на основании измерений токов / напряжений на входе кабельной линии. Однако перед этим необходимо

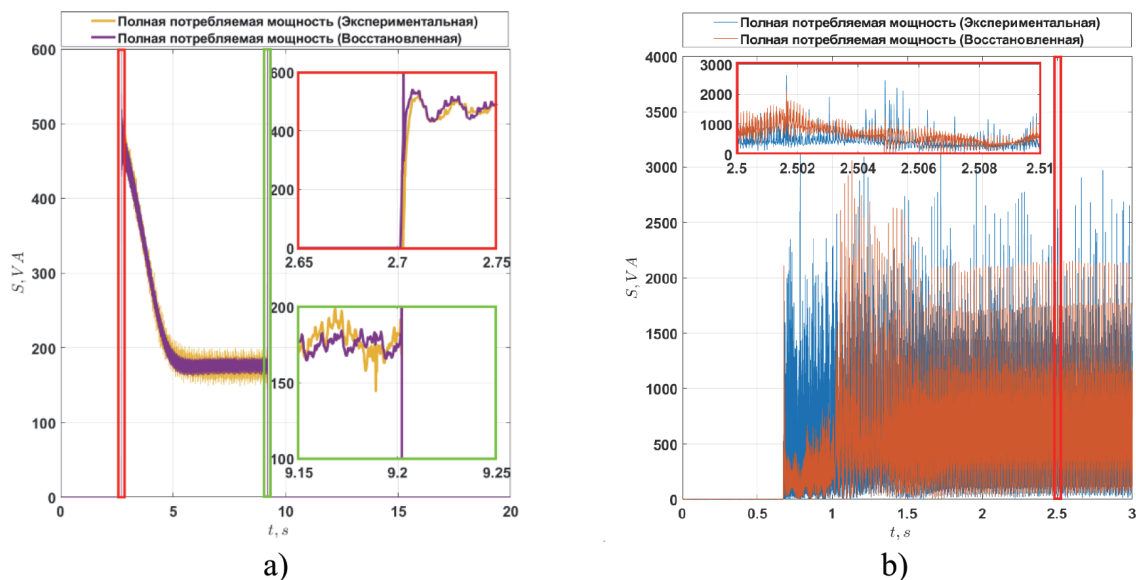


Рисунок 5. Экспериментальный и восстановленный сигналы полной потребляемой мощности АД (а) и активной нагрузки, подключенной к преобразователю частоты Danfos через участок кабельной линии (b)

Figure 5. Experimental and reconstructed signal of the total power consumption of the induction motor (a) and the active load connected to the Danfos frequency converter through the section of the cable line (b)

Таблица 4. Информация, вносимая в ПО генетического алгоритма для оценивания параметров схемы замещения электротехнического комплекса**Table 4.** Information entered into the genetic algorithm software for estimating the parameters of the equivalent circuit of an electrical complex

№, п/п	Наименование параметра и настройки	Оцененные параметры на предыдущих этапах	Нижняя граница ограничения	Верхняя граница ограничения
1	Используемые целевые функции	$\Psi_{S_mdl}(t, \hat{R}_{каб}, \hat{L}_{каб}, \hat{C}_{каб}, \hat{G}_{каб}, \hat{R}_1, \hat{L}_{1\delta}, \hat{L}_m, \hat{R}'_2, \hat{f})$		
2	Ограничение поискового пространства по параметру $\hat{R}_{каб}$, Ом	58,70	$0,8 \cdot \hat{R}_{каб}$	$2 \cdot \hat{R}_{каб}$
3	Ограничение поискового пространства по параметру $\hat{L}_{каб}$, Гн	1,30	$0,8 \cdot \hat{L}_{каб}$	$1,1 \cdot \hat{L}_{каб}$
4	Ограничение поискового пространства по параметру $\hat{C}_{каб}$, мкФ	0,13	$0,8 \cdot \hat{C}_{каб}$	$1,1 \cdot \hat{C}_{каб}$
5	Ограничение поискового пространства по параметру $\hat{G}_{каб}$, мкСм	18,39	$0,8 \cdot \hat{G}_{каб}$	$1,1 \cdot \hat{G}_{каб}$
6	Ограничение поискового пространства по параметру $\hat{R}_1$, Ом	31,54	$0,8 \cdot \hat{R}_1$	$2 \cdot \hat{R}_1$
7	Ограничение поискового пространства по параметру $\hat{L}_{1\delta}$, Гн	0,06	$0,8 \cdot \hat{L}_{1\delta}$	$1,1 \hat{L}_{1\delta}$
8	Ограничение поискового пространства по параметру $\hat{L}_m$, Гн	0,76	$0,8 \cdot \hat{L}_m$	$1,1 \hat{L}_m$
9	Ограничение поискового пространства по параметру $\hat{R}'_2$, Ом	55,55	$0,8 \cdot \hat{R}'_2$	$2 \cdot \hat{R}'_2$
10	Ограничение поискового пространства по параметру $\hat{f}$, кг·м ²	0,01	$0,8 \cdot \hat{f}$	$1,1 \cdot \hat{f}$
11	Длина участка кабельной линии, км	1		
12	Общая длина кабельной линии, км	2		

Таблица 5. Сводная таблица оцененных параметров схемы замещения электротехнического комплекса, ошибка восстановления сигнала полной потребляемой мощности и угловой скорости вращения вала асинхронного двигателя, подключенного к источнику питания через кабельную линию**Table 5.** Summary table of calculated parameters for the equivalent circuit of an electrical complex, error in restoring the signal for total power consumption and the angular speed of an induction motor connected to the power source via a cable line

Наименование параметра	Оцененное значение	Ошибка восстановления сигнала полной потребляемой мощности	Ошибка восстановления сигнала угловой скорости вращения
$\hat{R}_1$, Ом	39,77	3,09 %	5,31 %
$\hat{L}_{1\delta}$, Гн	0,04		
$\hat{L}_m$, Гн	0,50		
$\hat{R}'_2$, Ом	46,69		
$\hat{f}$, кг·м ²	0,01		
$\hat{R}_{каб}$, Ом	59,47		
$\hat{L}_{каб}$, Гн	0,30		
$\hat{C}_{каб}$, мкФ	0,16		
$\hat{G}_{каб}$, мкСм	18,39		

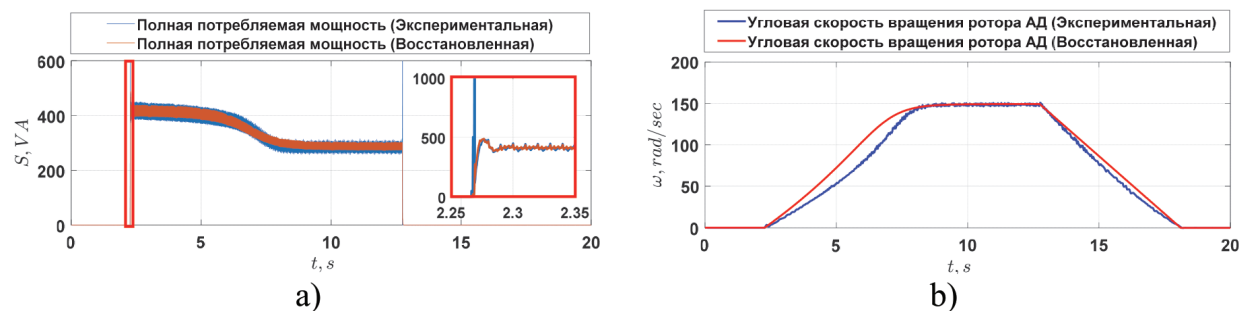


Рисунок 6. Графики экспериментального и восстановленного сигнала полной потребляемой мощности (а) и угловой скорости вращения АД с КЗ ротором подключенного к источнику питания через кабельную линию (б)

Figure 6. Graphs of the experimental and reconstructed signals for total power consumption (a) and angular speed of rotation of an induction motor with a squirrel-cage rotor connected to the power source via a cable line (b)

проводить подготовительные работы по оцениванию параметров каждого компонента исследуемого комплекса в отдельности для последующего жесткого ограничения поискового пространства решения задачи оптимизации. Подобный подход к решению задач в системном анализе называется декомпозицией — процесс разбиения сложной системы на более мелкие и управляемые части или подсистемы с целью более эффективного анализа, проектирования и управления системой в целом.

На первом этапе методики при использовании оцененных параметров схемы замещения АД ошибка восстановления сигнала полной потребляемой мощности составила 2,71 %, что является приемлемым результатом.

На втором этапе методики при использовании оцененных параметров участка кабельной линии, имитирующей кабель длиной 1 км, ошибка восстановления сигнала полной потребляемой мощности составила 15,70 %. Основной вклад в эту ошибку вносит участок с 0,7 до 1,2 с, т.е. на участке переходного процесса, затем сигнал стабилизируется, и ошибка восстановления на участке работы от 2 до 3 с составляет 4,9 %. Такую ошибку восстановленного сигнала можно обосновать тем, что схема замещения кабеля, используемая при моделировании, состоит из

одного элементарного четырехполюсника, который из-за ШИМ-модулированного напряжения на входе не позволяет достоверно отобразить переходные процессы в кабельной линии, но его достаточно для того, чтобы отобразить процессы, происходящие в кабеле при установившейся работе. Так как исследуемая кабельная линия представлена однородной, то учесть распределение температуры по длине кабельной линии возможно при ручном внесении масштабирующих коэффициентов к параметрам схемы замещения в зависимости от температуры на забое и устье скважины.

Несмотря на такую погрешность, при использовании оцененных параметров схемы замещения на этапе № 5, на котором кабельная линия увеличена в 2 раза, а математическое описание всего комплекса состоит из редуцированной математической модели кабельной линии и асинхронного двигателя, погрешность восстановления сигнала полной потребляемой мощности электротехнического комплекса «Кабельная линия — Асинхронный двигатель» составила всего 3,09 %, что является приемлемым результатом. В силу принятых допущений и некоторой погрешности в самой оценке параметров ошибка восстановления сигнала угловой скорости вращения составила 5,31 %, что является высокой

погрешностью, которая в свою очередь будет уменьшена при реализации наблюдателя полного порядка вектора переменных состояния электротехнического комплекса «Кабельная линия — Асинхронный двигатель».

Выводы

1. Разработана методика оценивания параметров электротехнического комплекса «Кабельная линия — Асинхронный двигатель» на основе баланса потребляемой мощности. Методика состоит из 6 пунктов. Основная идея разработанной методики заключается в раздельной оценке параметров АД и небольшого участка кабельной линии, а затем на основе оцененных параметров задать ограничения поискового пространства для оценивания параметров всего комплекса в сборе.

2. В качестве инструмента минимизации целевой функции применен генетический алгоритм (ГА) с ограничением поискового пространства. Применение ГА позволило отойти от классических методов решения целевой функции и,

как следствие, отойти 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. Разработанная методика станет одним из основных компонентов при реализации наблюдателя вектора переменных состояния электротехнического комплекса «Кабельная линия — Асинхронный двигатель». В свою очередь, разработанный наблюдатель ляжет в основу векторной системы управления погружным электродвигателем, что позволит правильно, с точки зрения электропривода, переводить низко- и среднедебитные скважины на периодический режим эксплуатации без существенного снижения среднего срока наработки на отказ.

Список источников

1. Nogovitsyn R., Sokolov A. Preliminary Calculation of the EROI for the Production of Gas in Russia // Sustainability. 2014. Vol. 6 (10). P. 6751–6765. doi:10.3390/su6106751.

2. Алексеев А.П. Путь навстречу // Сибирская нефть — корпоративный журнал ПАО «Газпром Нефть». 2018. № 149. С. 14–19.

3. Лихачева Е.А., Островский В.Г., Лыкова Н.А., Мусинский А.Н., Байдаров П.А. Надежность погружных нефтяных насосов при периодической эксплуатации // ПРОнефть. Профессионально о нефти. 2021. Т. 6, № 1. С. 54–58. doi: 10.51890/2587-7399-2021-6-1-54-58. EDN: BYHGJK.

4. Антипин М.Н. Результаты внедрения циклической эксплуатации УЭЦН в ОАО «Самотлорнефтегаз» // Инженерная практика. 2011. № 5. С. 74–80.

5. Глазырин А.С., Исаев Ю.Н., Кладиев С.Н., Леонов А.П., Раков И.В., Колесников С.В., Ланграф С.В., Филипас А.А., Копырин В.А., Хамитов Р.Н., Ковалев В.З. Оптимизация порядка реду-

цированной динамической модели ненагруженного нефтепогружного кабеля на основе аппроксимации амплитудно-частотной характеристики // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332, №9. С. 154–167. doi: 10.18799/24131830/2021/9/3365.

6. Буньков Д.С. Обзор методов оценивания параметров схемы замещения асинхронной электрической машины для организации векторной системы управления // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2021. Т. 17, № 3–4. С. 24–38. doi: 10.17122/1999-5458-2021-17-3-4-24-38. EDN: DDOOHW.

7. Аникин В.В. Методика и средства предварительной идентификации параметров модели послеремонтных регулируемых погружных асинхронных электродвигателей: дисс. ... канд. техн. наук. Ханты-Мансийск, 2020. 182 с.

8. Аникин В.В., Ковалев А.Ю., Кузнецов Е.М. Идентификация параметров погружных асинхронных электродвигателей установок электроцентробежных насосов для добычи нефти // Актуальные проблемы энергетики

АПК: материалы V Международной науч.-практ. конф. Саратов: Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова, 2014. С. 178–183. EDN: SDPAUN.

9. Боловин Е.В., Глазырин А.С. Метод идентификации параметров погружных асинхронных электродвигателей установок электроприводных центробежных насосов для добычи нефти // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328, № 1. С. 123–131. EDN: YGSRYP.

10. Леонов А.П., Редько В.В. Определение параметров схемы замещения кабельных изделий при испытаниях по категории «ЭИ-2» // Кабели и провода. 2014. Т. 345, № 2. С. 18–21. doi: 10.17122/1999-5458-2023-19-1-24-48.

11. Ивановский В.Н., Сабиров А.А., Якимов С.Б., Клусов А.А. Учет условий эксплуатации при проектировании периодических режимов работы скважин, оборудованных УЭЦН // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса Equipment and Technologies for oil and Gas Complex. 2013. № 6. С. 33–39. EDN: RQALCX.

12. Ивановский В.Н., Сазонов Ю.А., Сабиров А.А., Соколов Н.Н., Донской Ю.А. О некоторых перспективных путях развития УЭЦН // Территория нефтегаз. 2008. № 5. С. 24–33. EDN: KNPXVH.

13. Дроздов А.Н. Эксплуатация скважин, оборудованных УЭЦН на месторождениях с трудноизвлекаемыми запасами // Территория нефтегаз. 2008. № 10. С. 82–85. EDN: KNPXCV.

14. 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. Т. 19, № 1. С. 24–48. doi: 10.17122/1999-5458-2023-19-1-24-48.

15. Пат. 2689994 РФ, МПК G 01 R 21/06 (2006.01), G 01 R 21/08 (2006.01). Способ измерения активной мощности в трехфазной симметричной сети / В.В. Тимошкин, А.С. Глазырин, С.Н. Кладиев, О.С. Качин. 2018130953; Заявлено 27.08.2018; Опубл. 30.05.2019. Бюл. 16. 12 с.

16. Пат. 2629907 РФ, МПК G 01 R 21/06 (2006.01). Способ измерения реактивной мощности в трехфазной симметричной электрической цепи / А.С. Глазырин, В.И. Полищук, В.В. Тимошкин. 2016137424; Заявлено 19.09.2016; Опубл. 04.09.2017. Бюл. 25. 14 с.

17. Пантелеев А.В., Летова Т.А. Методы оптимизации в примерах и задачах. СПб.: Лань, 2021. 512 с. ISBN 978-5-8114-1887-9.

18. Результаты экспериментов для статьи «Генетический алгоритм в задаче динамической

идентификации параметров схемы замещения асинхронного двигателя»: Персональная страница И. В. Ракова. URL: <https://github.com/rivscience/2-Adaptive-estimation-parameters-of-induction-motor-with-using-GA.git> (дата обращения: 30.06.2022).

References

1. Nogovitsyn R., Sokolov A. Preliminary Calculation of the EROI for the Production of Gas in Russia. *Sustainability*, 2014, Vol. 6 (10), pp. 6751–6765. doi:10.3390/su6106751.

2. Alekseev A.P. Put' naverkh [Way up]. *Sibirskaya neft' — korporativnyi zhurnal PAO «Gazprom Neft'» — Siberian Oil — Corporate Magazine of PJSC Gazprom Neft*, 2018, No. 149, pp. 14–19. [in Russian].

3. Likhacheva E.A., Ostrovskii V.G., Lykova N.A., Musinskii A.N., Baidarov P.A. Nadezhnost' pogruzhnykh neftnykh nasosov pri periodicheskoi ekspluatatsii [Oil Submersible Pumps Reliability during Cyclic Operation]. *PRoneft'. Professional'no o nefti — PRoneft. Professionally about Oil*, 2021, Vol. 6, No. 1, pp. 54–58. doi: 10.51890/2587-7399-2021-6-1-54-58. EDN: BYHGJK. [in Russian].

4. Antipin M.N. Rezul'taty vnedreniya tsiklicheskoi ekspluatatsii UETsN v OAO «Samotlorneftegaz» [Results of Implantation of the Electrical Submersible Cyclic Operation Pump Units on JSC «Samotlorneftegaz»]. *Inzhenernaya praktika — Engineering Practice*, 2011, No. 5, pp. 74–80. [in Russian].

5. Glazyrin A.S., Isaev Yu.N., Kladiev S.N., Leonov A.P., Rakov I.V., Kolesnikov S.V., Langraf S.V., Filipas A.A., Kopyrin V.A., Khamitov R.N., Kovalev V.Z. Optimizatsiya poryadka redutsirovannoi dinamicheskoi modeli nena-gruzhennogo neftepogruzhnogo kabelya na osnove approksimatsii amplitudno-chastotnoi kharak-teristiki [Unloaded Oil-Submersible Cable Reduced Dynamic Model Order Optimization Based on the Frequency Response Approximation]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov — Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, Vol. 332, No. 9, pp. 154–167. doi: 10.18799/24131830/2021/9/3365. [in Russian].

6. Bun'kov D.S. Obzor metodov otsenivaniya parametrov skhemy zameshcheniya asinkhronnoi elektricheskoi mashiny dlya organizatsii vektornoj sistemy upravleniya [The Review Methods of Induction Machine Equivalent Circuit Parameters Estimation for Field Oriented Control Implementation]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2021, Vol. 17, No. 3–4, pp. 24–38. doi: 10.17122/1999-5458-2021-17-3-4-24-38. EDN: DDOOHV. [in Russian].

7. Anikin V.V. *Metodika i sredstva predvaritel'noi identifikatsii parametrov modeli posle-remontnykh reguliruemyykh pogruzhnykh asinkhronnykh elektrodvigatelyei: diss. ... kand. tekhn. nauk.* [Methods and Means of Preliminary Identification of Model Parameters after Repair of Adjustable Submersible Asynchronous Electric Motors: Cand. Engin. Sci. Diss.]. Khanty-Mansiisk, 2020. 182 p. [in Russian].
8. Anikin V.V., Kovalev A.Yu., Kuznetsov E.M. Identifikatsiya parametrov pogruzhnykh asinkhronnykh elektrodvigatelyei ustanovok elektrotsentrobezhnykh nasosov dlya dobychi nefti [Identification of parameters of submersible asynchronous electric motors of electric centrifugal pump installations for oil production]. *Materialy V Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Aktual'nye problemy energetiki APK»: materials of the V International scientific and practical. conf.* [Materials of the V International Scientific and Practical Conference «Current Problems of Energy of the Agro-Industrial Complex»]. Saratov, Saratovskii gosudarstvennyi agrarnyi universitet im. N.I. Vavilova, 2014, pp. 178–183. EDN: SDPAUN. [in Russian].
9. Bolovin E.V., Glazyrin A.S. Metod identifikatsii parametrov pogruzhnykh asinkhronnykh elektrodvigatelyei ustanovok elektroprivodnykh tsentrobezhnykh nasosov dlya dobychi nefti [Method for Identifying Parameters of Submersible Induction Motors of Electrical Submersible Pump Units for Oil Production]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring geo-resursov — Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, Vol. 328, No. 1, p. 123–131. EDN: YGSRYP. [in Russian].
10. Leonov A.P., Red'ko V.V. Opreделение parametrov skhemy zameshcheniya kabel'nykh izdelii pri ispytaniyakh po kategorii «EI-2» [Determination of the Parameters of the Equivalent Circuit of Cable Products When Tested according to Category «EI-2»]. *Kabeli i provoda — Cables and Wires*, 2014, Vol. 345, No. 2, pp. 18–21. doi: 10.17122/1999-5458-2023-19-1-24-48. [in Russian].
11. Ivanovskii V.N., Sabirov A.A., Yakimov S.B., Klusov A.A. Uchet uslovii ekspluatatsii pri proektirovanii periodicheskikh rezhimov raboty skvazhin, oborudovannykh UETsN [Accounting of Operational Conditions while Designing Periodic Operational Modes of Wells, Equipped by Electric Submersible Pumping Units]. *Oborudovanie i tekhnologii dlya neftegazovogo kompleksa — Equipment and Technologies for Oil and Gas Complex*, 2013, No. 6, pp. 33–39. EDN: RQALCX. [in Russian].
12. Ivanovskii V.N., Sazonov Yu.A., Sabirov A.A., Sokolov H.H., Donskoi Yu.A. O nekotorykh perspektivnykh putyakh razvitiya UETsN [On Some Potential Ways of ESP Development]. *Territoriya neftegaz — Neftegaz Territory*, 2008, No. 5, pp. 24–33. EDN: KNPXVH. [in Russian].
13. Drozdov A.N. Ekspluatatsiya skvazhin, oborudovannykh UETsN na mestorozhdeniyakh s trudnoizvlekaemymi zapasami [Operation of Wells Equipped with ESP in Fields with HTR Reserves]. *Territoriya neftegaz — Neftegaz Territory*, 2008, No. 10, pp. 82–85. EDN: KNPXCV. [in Russian].
14. Rakov I.V. Dinamicheskaya identifikatsiya parametrov skhemy zameshcheniya asinkhronnogo dvigatelya na osnove balansa mgnovЕННОй polnoi moshchnosti v ustanovivshemsya rezhime [Dynamic Estimation Parameters of the Elimination Circuit of Induction Motor on the Basis of Instant Full Power Balance in a Steady-State Mode]. *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy — Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2023, Vol. 19, No. 1, pp. 24–48. doi: 10.17122/1999-5458-2023-19-1-24-48. EDN: CTDOAF. [in Russian].
15. Timoshkin V.V., Glazyrin A.S., Kladiyev S.N., Kachin O.S. *Sposob izmereniya aktivnoi moshchnosti v trekhfaznoi simmetrichnoi seti* [Method of Measuring Active Power in a Three Phase Symmetrical Network]. Patent RF, No. 2689994, 2019. [in Russian].
16. Glazyrin A.S., Polishchuk V.I., Timoshkin V.V. *Sposob izmereniya reaktivnoi moshchnosti v trekhfaznoi simmetrichnoi elektricheskoi tsepi* [Method for Measuring Reactive Power in Three-Phase Symmetric Electrical Circuit]. Patent RF, No. 2629907, 2017. [in Russian].
17. Panteleev A.V., Letova T.A. *Metody optimizatsii v primerakh i zadachakh* [Optimization Methods in Examples and Tasks]. Saint-Petersburg, Lan' Publ., 2021. 512 p. ISBN 978-5-8114-1887-9. [in Russian].
18. Rezul'taty eksperimentov dlya stat'i «Geneticheskii algoritм v zadache dinamicheskoi identifikatsii parametrov skhemy zameshcheniya asinkhronnogo dvigatelya»: *Personal'naya stranitsa I. V. Rakova*. [Results of Experiments for the article «Genetic Algorithm in the Problem of Dynamic Identification of the Parameters of the Equivalent Circuit of an Induction Motor»: Personal site of I.V. Rakov]. URL: <https://github.com/rivscience/2-Adaptive-estimation-parameters-of-induction-motor-with-using-GA.git> (accessed 30.06.2022). [in Russian].

Статья поступила в редакцию 02.10.2023; одобрена после рецензирования 09.10.2023; принята к публикации 11.10.2023.

The article was submitted 02.10.2023; approved after reviewing 09.10.2023; accepted for publication 11.10.2023.