

## Идентификация электромагнитных параметров схемы замещения пакетов ротора погружного электродвигателя.

### Определение рациональных схем

*В.З. Ковалев, М.А. Крохалев, О.В. Архипова*

*Югорский государственный университет, г. Ханты-Мансийск*

**Аннотация:** В статье рассматриваются особенности использования и применимость методов идентификации параметров схем замещения погружных электрических двигателей. Оцениваются возможности технической реализации при заданной точности для определения параметров схем замещения погружных электрических двигателей в условиях различных внешних воздействий, а также при проектировании погружных электрических двигателей, как неотъемлемой части электротехнического комплекса установок электроприводного центробежного насоса.

**Ключевые слова:** погружной электродвигатель, установка электроприводного центробежного насоса, идентификация параметров схемы замещения асинхронной электрической машины, математическое моделирование, добыча нефти.

Решение задач энергоэффективного управления погружными электродвигателями (далее ПЭД) нефтедобычи и другими электроэнергетическими объектами требует определения параметров схем замещения (далее СЗ) их силовых элементов [1] при различных условиях эксплуатации и различных внешних воздействиях [2 – 4]. Рассмотрим существующие подходы, на примере идентификации параметров СЗ асинхронных электродвигателей (далее АД). Анализ литературы показал, что в настоящее время наиболее часто используются следующие подходы: проведение опытов холостого хода (далее х. х) и короткого замыкания (далее к. з.) и определение, по их результатам, параметров соответствующей СЗ АД;

- определение, на основе характеристик, указанных в паспортной документации, параметров СЗ АД;

- получение данных экспериментальным путем, при вариативной нагрузке в рабочем режиме и определение на их основе параметров СЗ АД;

- определение электромагнитных параметров СЗ АД, питающегося от полигармонического источника (далее ПИЭ) электродвижущей силы (далее ЭДС);

- совместное применение фильтров Калмана (далее ФК) с итерационными методами,

а также идентификация электромагнитных параметров СЗ АД иными методами, при помощи:

- нейросети;
- переходных и частотных характеристик (далее ЧХ).

Целью работы является сравнительный анализ вышеуказанных методов с позиции необходимой точности, исходя из имеющихся материальных и нематериальных ресурсов, применительно к задачам идентификации параметров СЗ ПЭД асинхронного типа (далее ПЭД АД):

- непосредственно на объектах нефтедобычи;
- эксплуатации ПЭД на рабочей глубине скважины;
- при проектировании ПЭД, как неотъемлемой части электротехнического комплекса установок электроприводного центробежного насоса (далее УЭЦН).

**Идентификация по опыту х. х. и к. з.** [5 – 7]. Существующие нормативные документы (ГОСТ 7217-87 «Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные. Методы испытаний», а также IEEE standart test procedure for polyphase induction motors and generator), регламентируют следующую методику проведения испытаний АД по вышеуказанному методу [8 – 10].

Параметры СЗ АД определяются по данным, полученным при проведении опытов х. х., при скольжении  $s = 0$ , и к. з., при  $I_{ном}$  испытуемого АД. Необходимость в регулирующем оборудовании (синхронный двигатель / преобразователь частоты) и дополнительной подготовке ПЭД к

---

эксперименту, препятствует применению данной методики непосредственно на объектах нефтедобычи при проведении ремонтных работ. Стоит обратить внимание, что при эксплуатации ПЭД на рабочей глубине скважины, применение данной методики, для определения параметров СЗ погружного электродвигателя АД, не представляется возможным.

**Идентификация по паспортным данным** [11 – 13]. Как правило, характеристики, указанные в паспорте АД, отражают:

–  $M_{\text{ном.}}$  – номинальный момент (Н × м);

–  $K_M = \frac{M_{\text{пуск.}}}{M_{\text{max}}}$  – кратность пускового и максимального

моментов (о. е.);

–  $I_{\text{ном.}}$  – номинальный ток (А);

–  $K_I$  – кратность номинального ток (о. е.);

–  $\cos\varphi_0$  – коэффициент мощности (о. е.);

–  $\eta$  – к. п. д. для номинальной ( $k=1$ ) и вариативных нагрузок ( $k=0,25$  и  $k=0,5$ ) (о. е.).

Стоит обратить внимание, что производители ПЭД АД, как правило, не предоставляют информацию о СЗ ПЭД, однако в технических условиях отечественных ПЭД № 3631-025-21945400-97 «Двигатели асинхронные погружные унифицированные серии ПЭД модернизации» (далее ТУ) приводятся результаты опытов х. х. и к. з., определенных при заводских испытаниях, проведенных в рамках электромонтажных работ [14,15]. Нужно обозначить, что при температуре 20 °С и питании постоянным током, также измеряется сопротивление фаз обмотки статора  $r_1$ . Данное значение указывается в ТУ, так как измерение сопротивления обмотки статора является обязательным пунктом программы проводимых на заводе-изготовителе испытаний при сдаче-приемке электромонтажных работ.

Параметры, определяемые опытом х. х.:

- $I_0$  – ток (А);
- $\cos\varphi_0$  – коэффициент мощности (о. е.);
- $P_0$ ; – потери х. х. (Вт);
- $P_{\text{мех.}}$  – механические потери (Вт);
- $P_{\text{ст.}}$  – электрические потери в стали (Вт);
- $P_{\text{м}}$  – суммарные потери в обмотке статора (Вт).

Вышеописанное позволяет смоделировать потери в стали контура намагничивания и вычислить индуктивность намагничивания и его сопротивление ( $L_m$  и  $R_m$  соответственно) [16]. При проведении опыта к. з. величина напряжения питания  $U_k$  задается необходимой для обеспечения номинальных значений токов статора и ротора, как правило это 25-50% от номинального  $U_{\text{ном}}$ . В конструкторской документации указываются значение напряжения к. з.  $U_k$  для каждого, отдельно взятого, ПЭД АД. Заводы-изготовители, по результатам опыта к. з. определяют параметры к. з. – ток  $I_k$ , мощность  $P_k$ , напряжение  $U_k$ . Далее можно вычислить следующие параметры упрощенной СЗ: «приведенное сопротивление обмотки ротора  $r_2'$  и индуктивность  $L_k$ ». Стоит отметить, что задача непосредственного деления индуктивностей рассеяния на  $L_1$  и  $L_2'$  в опытах х. х. и к. з. остается не решенной.

Недостаток метода – низкая точность полученных данных. Это объясняется различием реальных величин (которые всегда индивидуальны для каждого конкретного объекта) от величин, полученных в ходе проектирования ПЭД. Отметим, что от температуры непосредственно зависит значение активного сопротивления обмотки статора и ротора. Значит, при моделировании необходимо учитывать зависимость значений параметров СЗ от теплового состояния ПЭД АД. Что касается ротора, то на величину его активного сопротивления  $r_2$ , кроме температуры, влияет также

---

и эффект вытеснения тока. Стоит отметить, что СЗ погружного электродвигателя АД с параметрами идентифицированными по паспортным данным или из опытов х. х. и к. з., как правило, не учитывается явление вытеснения тока, а также явления насыщения магнитных цепей. Это, в свою очередь, существенно отражается на отклонениях расчетных характеристик ПЭД АД от экспериментальных.

**Идентификация параметров СЗ погружного электродвигателя АД при вариативной нагрузке [17 – 19].** Осуществляя режим прямого пуска и работы ПЭД при вариативной нагрузке, экспериментально получают технические характеристики  $I_{\text{фазн.}}$  (А),  $U$  (В),  $s$  (о. е.),  $P$  (Вт) в зависимости от величины нагрузки. Данный метод обеспечивает возможность определения параметров модели ротора и ветви намагничивания при известных или приближенно вычисленных параметрах обмотки статора [20 – 21].

Минусы данного метода:

- значительные погрешности в расчетах, связанные с отклонением истинных значений от параметров, условно принимаемых известными;
- невозможность прямого измерения реальной скорости вращения ротора ПЭД АД и вала электроприводного центробежного насоса, посредством существующих систем погружной телеметрии, соответственно, регистрация значений скольжения ПЭД АД без наличия дополнительного оборудования невозможна.

**Идентификация параметров СЗ погружного электродвигателя АД при использовании ПИЭ ЭДС.** Особенности применения ПИЭ ЭДС к определению параметров СЗ погружного электродвигателя АД показаны в работах [22 – 24]. От данного источника питается обмотка статора испытуемой электрической машины. Далее, с определенным шагом мгновенные значения фазных токов и напряжений. Это позволяет вычислить спектр мгновенных значений мощности и соответственно идентифицировать

---

параметры СЗ погружного электродвигателя АД. Применение ПИЭ на реальных объектах нефтедобычи затруднено высокой стоимостью ПИЭ, что практически исключает применение данного метода непосредственно на объектах нефтедобычи и при эксплуатации ПЭД АД на рабочей глубине скважины.

**Идентификация параметров СЗ погружного электродвигателя АД на основе ФК и генетических алгоритмов.** Особенности применения ФК к определению параметров СЗ погружного электродвигателя АД показаны в работах [25 – 27]. Выполнение оценки параметров СЗ погружного электродвигателя АД выполняется поисковыми способами оценивания параметров. В реальном времени становится возможно идентифицировать значения параметров математической модели АД ( $r_1, x_1, r_2, x_2, x_m, M_{эм}, \omega, \psi_1, \psi_2$ ) [28 – 30]. По предварительной идентификации электрических и магнитных параметров АД «выполняется его параметрическое описание для неадаптивных методов на основе фильтра Калмана» [31]. Адаптивные (замкнутые) методы, применяют математическое описание асинхронной машины, основываясь на оценках алгоритмов поиска, с применением ФК (рис. 1.) и затем сравнивая их с полученными измерениями электрических параметров АД. По итогам данных сопоставлений производится предварительная идентификация параметров СЗ погружного электродвигателя АД с внедрением различных коррекций в целевую функцию.

В работе [28] производится измерение тока статора АД (рис. 2.), и по результатам данных измерений формируется вектор тока статора АД  $i_1$ .

Одновременно формируется вектор тока статора  $\vec{i}_1$  по математической модели АД с ранее принятыми значениями параметров СЗ погружного электродвигателя АД. Для начала расчета используются следующие входные сигналы:

---

- $\omega$  – скорость вращения ротора (об/мин);
- $u_1$  – входное напряжение (В).

Отклонения между рассчитанными и измеренными траекториями вектора тока статора  $i_1$  будут являться функцией для поиска «точных значений» параметров СЗ погружного электродвигателя АД.

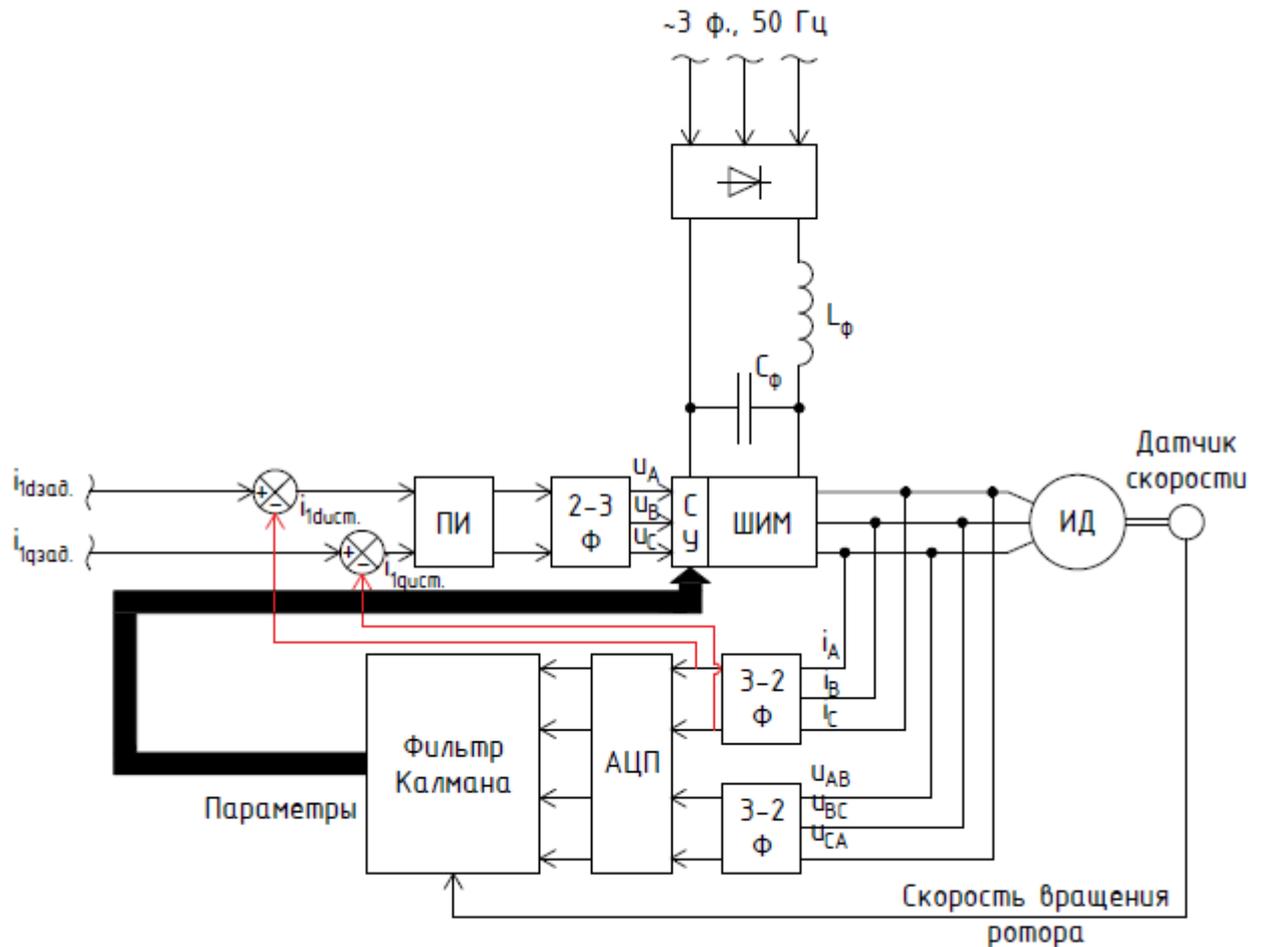


Рис. 1. – Определение характеристик АД с применением адаптивного метода в реальном времени, на базе ФК

Для достижения минимального расхождения в полученных значениях, отклонения корректируется рядом итераций при помощи идентификационно-поискового алгоритма, например методом градиентного спуска.

Практика применения методов идентификации, построенных на базе ФК, показала их сильную зависимость от качества используемых статистических данных и соответственно от уровня шума в векторе измеренных величин.

Все вышперечисленное приводит к ухудшению процессов оценивания характеристик АД, определяемых численно, и может вызвать существенные погрешности в определении характеристик или неустойчивость в поисковых методах оценивания.

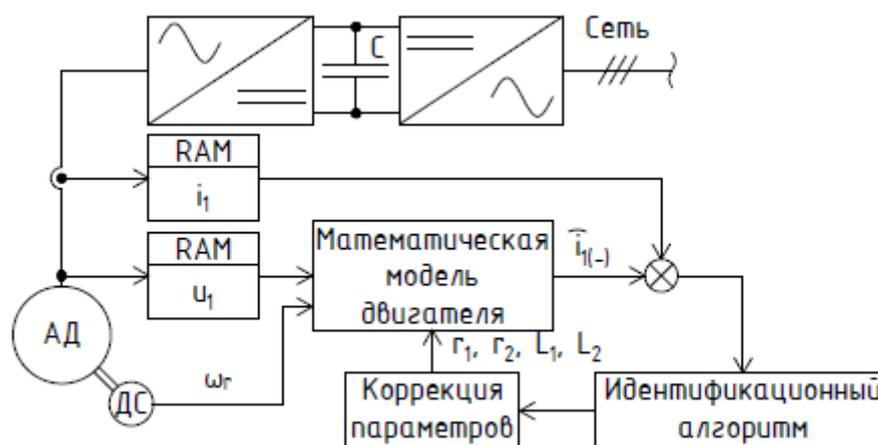


Рис. 2. – Схема распознавания характеристик асинхронного двигателя

Существует группа методов, базирующихся на использовании генетических алгоритмов [28 – 30]. Способ предложенный в [28] дает оценки характеристик асинхронной машины с погрешностью  $\sim 19\%$ , а также рекомендован авторами работы для предварительной идентификации характеристик АД. Данный подход требует большого объема информации о предыдущем режиме работы, что затрудняет получение оценок параметров СЗ погружного электродвигателя АД в режиме реального времени, и является основным недостатком методов данной группы. В связи со сложностью реализации методов и необходимостью применения

значительных вычислительных мощностей, данные методы пока находятся в стадии разработки.

**Безнагрузочные методы определения эквивалентных параметров СЗ погружного электродвигателя АД [32,33].** Отличительная особенность данной группы методов идентификации – неподвижный ротор испытуемой электрической машины во время реализации процесса идентификации. При этом фазы обмотки статора собраны в несимметричную схему однофазного питания. Напряжение питания может иметь гармонический вид, ступенчатый вид, или вид другой специализированной функции, в зависимости от специфики решаемой задачи идентификации. Мощность источника питания при этом составляет несколько процентов от номинальной мощности испытуемого электродвигателя.

Отсутствие необходимости сопряжения ПЭД с дополнительным силовым оборудованием создает возможность испытания ПЭД и в рабочих режимах. Одиночный ступенчатый перепад напряжения является оптимальным, для решения данной задачи. Он легко реализуется с помощью преобразователей частоты станций управления УЭЦН и имеет минимальный уровень высших гармоник, что влечет за собой снижение погрешности измерений [34 – 36]. Стоит отметить, что данный метод дает возможность идентифицировать с приемлемой погрешностью параметры СЗ погружного электродвигателя АД, в том числе, и при наличии влияния эффектов насыщения магнитопровода и вытеснения тока в обмотке ротора [37 – 39].

**Идентификация параметров СЗ погружного электродвигателя АД по переходным и ЧХ [5, 40,41].** Идея данного подхода заключается в предварительном подключении обмотки статора к источнику постоянного тока. Ротор испытуемой машины при этом неподвижен. Фиксируется установившийся постоянный ток  $I_0$ . Затем одновременно замыкается накоротко обмотка статора (рис. 3.) и отключается источник тока. В обмотке

---

статора начинается переходный процесс рассеивания накопленной энергии, при этом ток в данной цепи затухает [42,43]. Задача исследователя – зафиксировать процесс затухания тока в обмотке статора  $i_{1\text{эксп.}}(t)$ . Далее, используя преобразования Лапласа и интеграла Фурье, можно получить ЧХ. На основе данных характеристик вычисляют параметры СЗ погружного электродвигателя АД. Для этого в [5, 40, 43] суммой экспоненциальных функций аппроксимируют регистрируемый сигнал  $i_{1\text{эксп.}}(t)$ :

$$i_{1\text{эксп.}}(t) = \sum_{k=1}^n I_{mk} e^{\lambda_k t},$$

$$\sum_{k=1}^n I_{mk} = I_0,$$

$$i_{\text{эксп.}}(0) = I_0.$$

Идентификация по ЧХ позволяет получать значения параметров СЗ погружного электродвигателя АД удовлетворительно (в плане точности) описывающие основные эксплуатационные характеристики ПЭД в режимах от к. з. до х. х. К недостаткам данного подхода необходимо отнести высокую трудоемкость вычислительного процесса, обусловленную применением процедур преобразования Лапласа и интеграла Фурье.

Существует другой подход к идентификации параметров СЗ погружного электродвигателя АД «по оцифрованной кривой затухания  $i_{1\text{эксп.}}(t)$ », исключающий процедуру получения ЧХ. Формула, для отображения по Лапласу экспериментальной переходной характеристики тока статора имеет вид:

$$i_{\text{эксп.}}(p) = I_{\text{эксп.}}(p, I_{m1} \dots I_{mk}, \lambda_1 \dots \lambda_k),$$

Тогда переходная характеристика тока статора, вытекающая из СЗ погружного электродвигателя АД, примет вид:

$$i_{\text{расч.}}(p) = I_{\text{эксп.}}(p, r_0, r_1, r_{21} \dots r_{2(N-2)}, x_0, x_1 x_{21} \dots x_{2(N-2)}).$$

Исходя из условия:

$$i_{\text{экс.}}(p) = i_{\text{расч.}}(p),$$

получаем систему уравнений для определения параметров СЗ погружного электродвигателя АД, используя «метод неопределенных коэффициентов относительно степеней оператора  $p$ » [44].

«На начальном участке переходной характеристики затухания тока статора  $i_1'(0)$ » [44] необходимо осуществить оценку инструментальной погрешности измерения его производной.

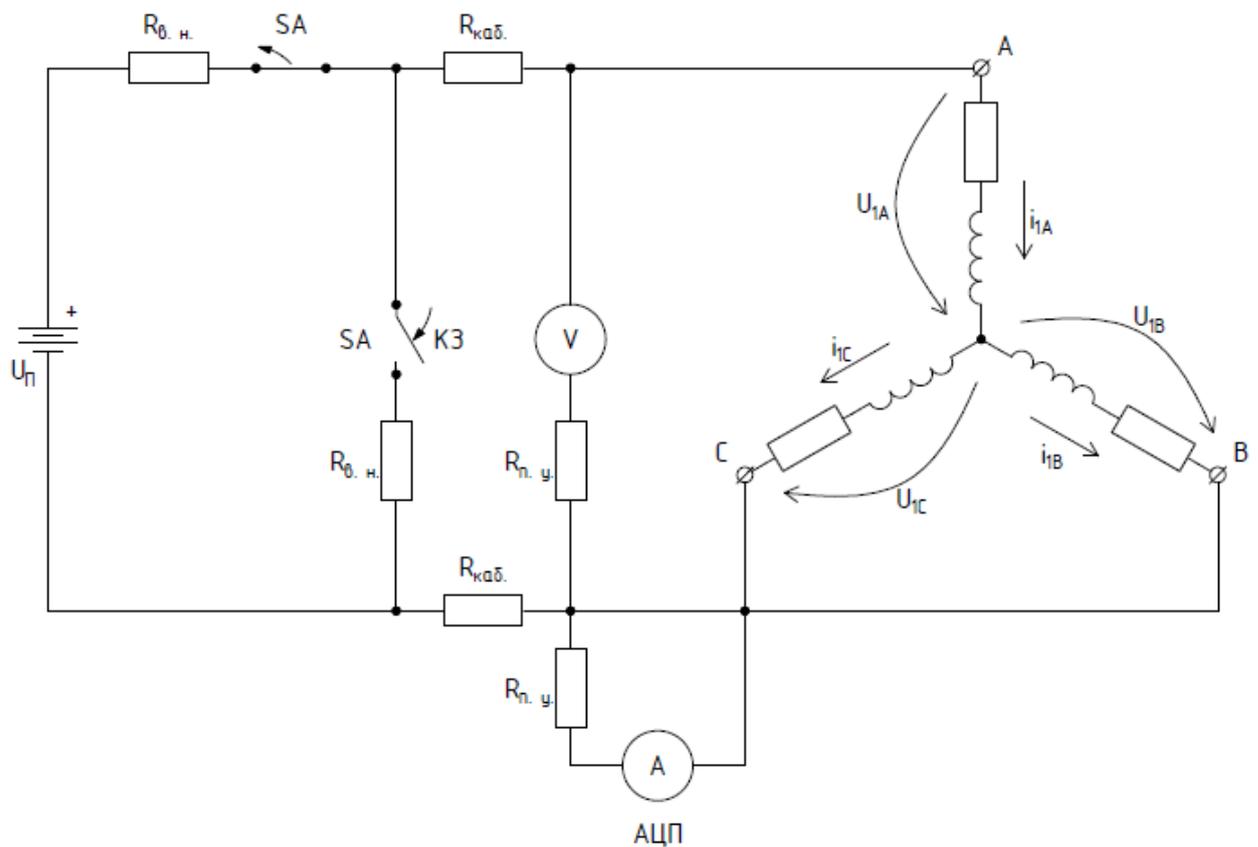


Рис. 3. Схема регистрации переходной характеристики затухания тока обмотки статора ПЭД АД

К недостаткам данного подхода относится нестабильность реального источника постоянного тока, он незначительно меняет свое напряжение по ходу выполнения замеров. Также свое сопротивление меняют ключи

замыкания / размыкания (рис. 3.). Провод и кабели, в свою очередь, имеют свое сопротивление, зависящее от нагрева в ходе эксперимента. Соответственно, значение установившегося тока  $I_0$  незначительно колеблется и, таким образом, идеально повторить опыт для снятия параметров электрической схемы не представляется возможным. В свою очередь, имеют место и естественные шумы при снятии электрических параметров. На основании вышеизложенного можно сказать, что кривая затухания тока будет иметь «шероховатости», отражающиеся в разбросе параметров СЗ при данном способе идентификации.

### Заключение

Описанные выше методы идентификации параметров ПЭД можно разделить на три части:

1. Методы, требующие для решения задач по идентификации параметров ПЭД, существенных затрат энергии и применения сложных материалоемких специализированных установок (проведение силовых экспериментов по методикам опытов х. х., к. з., вариативной нагрузки и других). Для этого необходимо выполнение работ по демонтажу, транспортировке и испытанию исследуемого оборудования на специализированных стендах. Все вышеописанное затрудняет проведение натуральных экспериментов и снижает их частоту;

2. Методы, позволяющие получить информацию из режимов работ электрической машины (питание от ПИЭ ЭДС, на основе нейросетей, по оцифрованным переходным процессам и/или ЧХ, по переходной характеристике затухания постоянного тока в обмотке статора других). Это требует специализированного оборудования относительно дешевого и неэнергоемкого, либо с применением мобильной техники, не нуждающейся в демонтаже испытываемого оборудования.

3. Отдельно необходимо отметить методы идентификации, построенные на паспортных или иных статистических данных серии однотипных машин, и, соответственно, не требующих непосредственного испытания отдельной машины. Такие методы не энергозатратны, не требуют дополнительных технологических операций и специализированного оборудования. Однако эти подходы дают наибольшие погрешности в оценке значений идентифицируемых параметров.

### Литература

1. Ковалев В.З., Архипова О.В. Методика управления энергоэффективностью и надежностью электротехнического комплекса УЭЦН // Современные проблемы науки и образования. 2014. №6. URL: [science-education.ru/ru/article/view?id=16219](http://science-education.ru/ru/article/view?id=16219).

2. Ковалев В.З., Щербаков А.Г., Ковалев А.Ю. Идентификация параметров и характеристик математических моделей электротехнических устройств. Омск: Федеральное агентство по образованию, Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Омский государственный технический университет», 2005. 107 с.

3. Ковалев В.З., Архипова О.В. Моделирование динамических режимов работы асинхронной машины с учетом тепловых переходных процессов // Нефтегазовое дело. Том № 13. 2015. №1. С. 115-118.

4. Ковалев В.З., Петухова О.А., Архипова О.В., Петров А.А. Моделирование электротехнических комплексов // Вестник Югорского государственного университета. 2014. №2(33). С. 83-86.

5. Рогозин Г.Г. Определение электромагнитных параметров машин переменного тока. Киев: Техніка, 1992. 168 с.

6. Архипова О.В., Чертов Р.А., Денисенко А.В., Крохалев М.А., Хусаинов Э.И., Балыклов Е.С. Математическая модель погружного

асинхронного двигателя как электротехнического комплекса // Инженерный вестник Дона, 2020, №12. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2020/6702](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2020/6702).

7. Бурцев А.Г., Дягилева Т.В., Пан А.Г. Спектральный анализ тока статора трехфазного асинхронного двигателя при аварийных режимах работы // Инженерный вестник Дона, 2015, №2-1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2015/2910](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2015/2910).

8. Мещеряков В.Н., Шишлин Д.И. Электрические машины переменного и постоянного тока. Старый Оскол: ООО «Тонкие наукоемкие технологии», 2021. 260 с.

9. Буньков Д.С. Обзор методов оценивания параметров схемы замещения асинхронной электрической машины для организации векторной системы управления // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2021. №3-4. С. 24-38.

10. Таланов М.В., Таланов В.М. Регрессионная модель для идентификации электрических параметров асинхронного электродвигателя в бездатчиковых системах управления электроприводом // Научно-технический вестник Поволжья. 2022. №4. С. 30-33.

11. Солодянкин А.С. Моделирование электротехнических комплексов установок электроцентробежных насосов. Омск: Омский государственный технический университет, 2010. 175 с.

12. Мощинский Ю.А., Беспалов В.Я., Кирякин А.А. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным // Электричество. 1998. №4. С. 38-42.

13. Гридин В.М. Расчет параметров схемы замещения асинхронных двигателей по каталожным данным // Электричество. 2012. №5. С. 40-44.

14. Lee K., Frank S., Sen P.K., Gentile Polese L., Alahmad M., Waters C. Proceeding 2012 North American Power Symposion (NAPS). Illinois, 2012, pp. 1-6.

15. Серкова Л.Е., Попов Д.И., Москалев Ю.В. Расчет асинхронного двигателя. Омск: ОмГУПС, 2021. 93 с.
16. Захаров А.М., Захаров М.А., Скоробогатов А.А., Захаров П.А. О разработке идентификатора состояния на основе бескоординатной модели асинхронного электродвигателя // Материалы международной научно-технической конференции, посвященной 140-летию изобретения электросварки Н.Н. Бенардосом. Том III. Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2021. С. 97-100.
17. Родькин Д.И., Калинов А.П., Ромашихин Ю.В. Эффективность метода энергодиагностики параметров двигателей переменного тока // Электроприводы переменного тока: Труды международной 14 НТК. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2007. С. 273-278.
18. Быков И.Ю., Заикин С.Ф., Перминов Б.А. Повышение качества системы управления бурильной колонной при углублении скважин нефтегазового назначения. Старый Оскол: ООО «Тонкие наукоемкие технологии», 2022. 244 с.
19. Третьяков А.С., Капитонов О.А. Разработка алгоритма идентификации параметров схемы замещения асинхронного электродвигателя // Материалы Международной научно-технической конференции молодых ученых. Могилев: Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования «Белорусско-Российский университет», 2021. С. 137.
20. Макаров В.Г., Бариев Р.Х. Экспериментальное исследование процессов идентификации параметров асинхронного электродвигателя // Материалы всероссийской с международным участием научной конференции. В 3-х частях. Часть 1. Саранск: Национальный

исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, 2022. С. 394-398.

21. Гаврилов Е.С. Идентификация параметров асинхронного электродвигателя с учетом влияния явления вытеснения тока // VIII научно-практическая конференция с международным участием. Сборник материалов и докладов. Брянск: Брянский государственный технический университет, 2021. С. 744-747.

22. Каширских В.Г., Завьялов В.М., Соколов Д.В. Идентификация параметров асинхронного электродвигателя с помощью расширенного фильтра Калмана // Вестник КузГТУ. 2002. №2. С. 18-20.

23. Каширских В.Г., Завьялов В.М. Структура вычислительной части испытательного стенда для оценки параметров и состояния асинхронных электродвигателей // Вестник КузГТУ. 2003. №3 (34). С. 63-65.

24. Сандлер И.Л. Тестирование рекуррентного алгоритма параметрической идентификации асинхронных электродвигателей при наличии ошибок измерений // Наука и образование транспорту. 2021. №2. С. 153-154.

25. Каширских, В.Г. Динамическая идентификация параметров и управление состоянием электродвигателей приводов горных машин. Кемерово: КузГТУ, 2005. 356 с.

26. Holtz J. Proceedings of the IEEE, vol. 90. 2002. №8. pp. 1359-1394.

27. Харламов В.В., Попов Д.И., Байсадыков М.Ф. Разработка методов и средств прогнозирования остаточного ресурса электрощеток с применением данных мониторинга режимов работы двигателей. Омск: ООО «Издательский центр «Омский научный вестник», 2021. 168 с.

28. Ткачук Р.И., Глазырин А.С., Полищук В.И. Идентификация параметров асинхронных двигателей с применением генетического алгоритма // Омский научный вестник. 2012. №3(113). С. 245-248.

---

29. Megherbi A.C., Megherbi H., Benmahamed K., Aissaoui A.G., Tahour A. Journal of Electrical Engineering (11 CHLIE). 2009. № 7. pp. 137-143.
30. Палкин Н. Непрерывные генетические алгоритмы – математический аппарат. 2006 URL: [basegroup.ru/community/articles/real-coded-ga](http://basegroup.ru/community/articles/real-coded-ga).
31. Аксенов И.И., Пиляев С.Н., Еремин М.Ю., Афоничева Д.Д. Моделирование наблюдателя состояния асинхронного электродвигателя на основе фильтра Калмана в программе Simintech // Материалы международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов. Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2021. С. 202-207.
32. Аникин В.В., Ковалев А.Ю., Кузнецов Е.М. Эффективность методов идентификации электромагнитных параметров погружных электродвигателей установок электроцентробежных насосов // Динамика систем механизмов и машин. 2014. №1. С. 288-292.
33. Ковалев В.З., Щербаков А.Г., Архипов А.В., Ковалев А.Ю., Аникин В.В. Идентификация параметров схемы замещения погружных асинхронных двигателей // Промышленная энергетика. 2012. №1. С. 38-41.
34. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока. СПб.: Издательский дом «Питер», 2010. 543 с.
35. Данилевич Я.Б., Домбровский В.С., Казовский Е.Я. Параметры электрических машин переменного тока. М.: Наука, 1965. 340 с.
36. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: Учебник для вузов, в двух томах. Том 1/3-е изд. М.: Издательский дом МЭИ, 2006. 652 с.
37. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. М.: Высшая школа, 1994. 318 с.
-

38. Сивокобыленко В.Ф., Костенко В.И. Определение параметров и характеристик машин переменного тока из опытов пуска и выбега // Известия высших учебных заведений СССР. 1978. №3. С. 44-48.

39. Кривобоков Д.Е., Соловьев В.А., Пузик Д.Е. Идентификация режимов работы стиральной машины по анализу ее электрических параметров при помощи нейронной сети // Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова. 2021. №4. С. 119-121.

40. Гучапшев Х.М. Идентификация параметров моделей асинхронных двигателей для систем электроснабжения по частотным характеристикам. Краснодар: Кубанский государственный технологический университет, 1998. 158 с.

41. Казовский Е.Я., Лернер Л.Г., Сидельников А.В. Синтез схем замещения машин переменного тока по переходным процессам и частотным характеристикам // Электротехника. 1979. №5. С. 6-13.

42. Juhamatti N. Induction motor parameter identification in elevator drive modernization. Helsinki: Helsinki university of technology, 2009 URL: lib.tkk.fi.>Dipl/2009/urn012920.

43. Ковалев В.З., Марголенко В.В. Автоматизированный комплекс синтеза схем замещения электрических машин // Динамика электрических машин. 1984. С. 130-133.

44. Аникин В.В. Методика и средства предварительной идентификации параметров модели послеремонтных регулируемых погружных асинхронных электродвигателей. Томск: ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2020 URL: earchive.tpu.ru/handle/11683/63105.

### References

1. Kovalev V.Z., Arxipova O.V. Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya. 2014. №6 URL: science-education.ru/ru/article/view?id=16219.

---

2. Kovalev V.Z., Shherbakov A.G., Kovalev A.Yu. Identifikaciya parametrov i karakteristik matematicheskix modelej e`lektrotexnicheskix ustrojstv [Identification of parameters and characteristics of mathematical models of electrical devices]. Omsk: Federal`noe agentstvo po obrazovaniyu, Gosudarstvennoe obrazovatel`noe uchrezhdenie vy`sshego professional`nogo obrazovaniya «Omskij gosudarstvenny`j texnicheskij universitet», 2005. 107 p.
3. Kovalev V.Z., Arxipova O.V. Neftegazovoe delo. Tom № 13. 2015. №1. pp. 115-118.
4. Kovalev V.Z., Petuxova O.A., Arxipova O.V., Petrov A.A. Vestnik Yugorskogo gosudarstvennogo universiteta. 2014. №2(33). pp. 83-86.
5. Rogozin G.G. Opredelenie e`lektromagnitny`x parametrov mashin peremennogo toka [Determination of electromagnetic parameters of alternating current machines]. Kiev: Texnika, 1992. 168 p.
6. Arxipova O.V., Chertov R.A., Denisenko A.V., Kroxalev M.A., Xusainov E`.I., Baly`klov E.S. Inzenernyj vestnik Dona, 2020, №12. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2020/6702](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2020/6702).
7. Burcev A.G., Dyagileva T.V., Pan A.G. Inzhenernyj vestnik Dona, 2015, №2-1 URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2015/2910](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2015/2910).
8. Meshheryakov V.N., Shishlin D.I. E`lektricheskie mashiny` peremennogo i postoyannogo toka [AC and DC electric machines]. Stary`j Oskol: OOO «Tonkie naukoemkie tehnologii», 2021. 260 p.
9. Bun`kov D.S. E`lektrotexnicheskie i informacionny`e komplekсы` i sistemy`. 2021. №3-4. pp. 24-38.
10. Talanov M.V., Talanov V.M. Nauchno-texnicheskij vestnik Povolzh`ya. 2022. №4. pp. 30-33.
11. Solodyankin A.S. Modelirovanie e`lektrotexnicheskix kompleksov ustanovok e`lektrocentrobezny`x nasosov [Modeling of electrotechnical

complexes of installations of electric centrifugal pumps]. Omsk: Omskij gosudarstvenny`j texnicheskij universitet, 2010. 175 p.

12. Moshhinskij Yu.A., Bepalov V.Ya., Kiryakin A.A. E`lektrichestvo. 1998. №4. pp. 38-42.

13. Gridin V.M. E`lektrichestvo. 2012. №5. pp. 40-44.

14. Lee K., Frank S., Sen P.K., Gentile Polese L., Alahmad M., Waters C. Proceeding 2012 North American Power Symposion (NAPS). Illinois, 2012, pp. 1-6.

15. Serkova L.E., Popov D.I., Moskalev Yu.V. Raschet asinxronnogo dvigatelya [Calculation of the asynchronous motor]. Omsk: OmGUPS, 2021. 93 p.

16. Zaxarov A.M., Zaxarov M.A., Skorobogatov A.A., Zaxarov P.A. Materialy` mezhdunarodnoj nauchno-texnicheskoj konferencii, posvyashhennoj 140-letiyu izobreteniya e`lektrosvarki N.N. Benardosom. Tom III (Materials of the international scientific and technical conference dedicated to the 140th anniversary of the invention of electric welding by N.N. Benardos. Volume III). Ivanovo, 2021. pp. 97-100.

17. Rod`kin D.I., Kalinov A.P., Romashixin Yu.V. E`lektroprivody` peremennogo toka: Trudy` mezhdunarodnoj 14 NTK (AC electric drives: Proceedings of the International 14 STK). Ekaterinburg, 2007. pp. 273-278.

18. By`kov I.Yu., Zaikin S.F., Perminov B.A. Povy`shenie kachestva sistemy` upravleniya buril`noj kolonnoj pri uglublenii skvazhin neftegazovogo naznacheniya [Improving the quality of the drill string control system when drilling oil and gas wells]. Stary`j Oskol: OOO «Tonkie naukoemkie tehnologii», 2022. 244 p.

19. Tret`yakov A.S., Kapitonov O.A. Materialy` Mezhdunarodnoj nauchno-texnicheskoj konferencii molody`x ucheny`x (Materials of the International Scientific and Technical Conference of Young Scientists. Mogilev:

Interstate Educational Institution of Higher Education "Belarusian-Russian University"). Mogilev, 2021. pp. 137.

20. Makarov V.G., Bariev R.X. Materialy` vserossijskoj s mezhdunarodny`m uchastiem nauchnoj konferencii. V 3-x chastyax. Chast` 1 (Materials of the All-Russian scientific conference with international participation. In 3 parts. Part 1). Saransk, 2022. pp. 394-398.

21. Gavrilov E.S. VIII nauchno-prakticheskaya konferenciya s mezhdunarodny`m uchastiem. Sbornik materialov i dokladov (VIII scientific and practical conference with international participation. Collection of materials and reports). Bryansk, 2021. pp. 744-747.

22. Kashirskix V.G., Zav`yalov V.M., Sokolov D.V. Vestnik KuzGTU. 2002. №2. pp. 18-20.

23. Kashirskix V.G., Zav`yalov V.M. Vestnik KuzGTU. 2003. №3 (34). pp. 63-65.

24. Sandler I.L. Nauka i obrazovanie transportu. 2021. №2. pp. 153-154.

25. Kashirskix, V.G. Dinamicheskaya identifikaciya parametrov i upravlenie sostoyaniem e`lektrodvigatelej privodov gorny`x mashin [Dynamic identification of parameters and condition control of electric motors of mining machinery drives]. Kemerovo: KuzGTU, 2005. 356 p.

26. Holtz J. Proceedings of the IEEE, vol. 90. 2002. №8. pp. 1359-1394.

27. Xarlamov V.V., Popov D.I., Bajsady`kov M.F. Razrabotka metodov i sredstv prognozirovaniya ostatochnogo resursa e`lektroshhetok s primeneniem danny`x monitoringa rezhimov raboty` dvigatelej [Development of methods and tools for predicting the residual life of electric brushes using monitoring data of engine operating modes]. Omsk: OOO «Izdatel`skij centr «Omskij nauchny`j vestnik», 2021. 168 p.

28. Tkachuk R.I., Glazy`rin A.S., Polishhuk V.I. Omskij nauchny`j vestnik. 2012. №3 (113). pp. 245-248.

---

29. Megherbi A.C., Megherbi H., Benmahamed K., Aissaoui A.G., Tahour A. Journal of Electrical Engineering (11 CHLIE). 2009. № 7. pp. 137-143.
  30. Palkin N. 2006. URL: [basegroup.ru/community/articles/real-coded-ga](http://basegroup.ru/community/articles/real-coded-ga).
  31. Aksenov I.I., Pilyaev S.N., Eremin M.Yu., Afonicheva D.D. Materialy` mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii molody`x ucheny`x i specialistov (Materials of the international scientific and practical conference of young scientists and specialists). Voronezh, 2021. pp. 202-207.
  32. Anikin V.V., Kovalev A.Yu., Kuznecov E.M. Dinamika sistem mexanizmov i mashin. 2014. №1. pp. 288-292.
  33. Kovalev V.Z., Shherbakov A.G., Arxipov A.V., Kovalev A.Yu., Anikin V.V. Promy`shlennaya e`nergetika. 2012. №1. pp. 38-41.
  34. Vol`dek A.I., Popov V.V. E`lektricheskie mashiny`. Mashiny` peremennogo toka [Electric machines. AC Machines]. SPb.: Izdatel`skij dom «Piter», 2010. 543 p.
  35. Danilevich Ya.B., Dombrovskij V.S., Kazovskij E.Ya. Parametry` e`lektricheskix mashin peremennogo toka [Parameters of AC electric machines]. M.: Nauka, 1965. 340 p.
  36. Ivanov-Smolenskij A.V. E`lektricheskie mashiny`: Uchebnik dlya vuzov, v dvux tomax. Tom 1-3-e izd [Electric machines: A textbook for universities, in two volumes. Volume 1-3rd edition]. M.: Izdatel`skij dom ME`I, 2006. 652 p.
  37. Kopy`lov I.P. Matematicheskoe modelirovanie e`lektricheskix mashin [Mathematical modeling of electric machines]. M.: Vy`sshaya shkola, 1994. 318 p.
  38. Sivokoby`lenko V.F., Kostenko V.I. Izvestiya vy`sshix uchebny`x zavedenij SSSR. 1978. №3. pp. 44-48.
  39. Krivobokov D.E., Solov`ev V.A., Puzik D.E. Altajskij gosudarstvenny`j texnicheskij universitet imeni I.I. Polzunova. 2021. №4. pp. 119-121.
-

40. Guchapshev X.M. Identifikaciya parametrov modelej asinxronny`x dvigatelej dlya sistem e`lektrosnabzheniya po chastotny`m karakteristikam [Identification of parameters of asynchronous motor models for power supply systems by frequency characteristics. Krasnodar]. Krasnodar: Kubanskij gosudarstvenny`j texnologicheskij universitet, 1998. 158 p.

41. Kazovskij E.Ya., Lerner L.G., Sidel`nikov A.V. E`lektrotexnika. 1979. №5. pp. 6-13.

42. Juhamatti N. Induction motor parameter identification in elevator drive modernization. Helsinki: Helsinki university of technology, 2009. URL: lib.tkk.fi.>Dipl/2009/urn012920.

43. Kovalev V.Z., Margolenko V.V. Dinamika e`lektricheskix mashin. 1984. pp. 130-133.

44. Anikin V.V. Metodika i sredstva predvaritel`noj identifikacii parametrov modeli posleremontny`x reguliruemy`x pogruzhny`x asinxronny`x e`lektrodvigatelej [Methods and means of preliminary identification of model parameters after repair of adjustable submersible asynchronous electric motors]. Tomsk: FGAOU VO NI TPU, 2020 URL: earchive.tpu.ru/handle/11683/63105.