

ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

УДК 62-50

Александр Савельевич Глазырин

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, доктор технических наук, профессор отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики, Россия, Томск; Тюменский индустриальный университет, профессор кафедры электроэнергетики, Россия, Тюмень, телефон (3822) 70-17-77, e-mail: asglazyrin@tpu.ru

Евгений Игоревич Попов

Тюменский индустриальный университет, аспирант кафедры кибернетических систем, ассистент кафедры электроэнергетики, Россия, Тюмень, e-mail: popovei72@mail.ru

Владимир Анатольевич Копырин

Тюменский индустриальный университет, кандидат технических наук, и.о. зав. кафедры кибернетических систем, доцент кафедры электроэнергетики, Россия, Тюмень, телефон (3452) 28-30-16, e-mail: kopyrina@gmail.com

Методика проекционной идентификации параметров настраиваемой модели синхронного двигателя с постоянными магнитами и индикаторы информативности конечных фрагментов данных

Авторское резюме

Состояние вопроса. В условиях перевода нефтяных скважин в прерывистые режимы эксплуатации возникает необходимость построения замкнутых бездатчиковых систем управления электроприводами погружных установок, в том числе с синхронными двигателями с постоянными магнитами. Для реализации данных систем требуется разработка эффективных методов динамической идентификации параметров настраиваемой модели электродвигателя в связи с циклическим изменением теплового режима его работы. Существующие методы идентификации на сегодняшний день сталкиваются с проблемой высоких вычислительных затрат и отсутствием априорной информации о характере помех в измерительных каналах. Тем самым актуальной задачей является разработка новых робастных методов идентификации параметров настраиваемых моделей динамических систем, в частности погружного электропривода на базе синхронных двигателей с постоянными магнитами.

Материалы и методы. Оценка электромагнитных параметров синхронного двигателя с постоянными магнитами осуществлена с использованием методов идентификации параметров настраиваемых математических моделей нестационарных динамических систем. Для аппроксимации производной в дискретном времени использована неявная многошаговая разностная схема.

Результаты. Разработана методика проекционной идентификации параметров настраиваемых моделей динамических систем и апробирована на настраиваемой модели статора синхронного двигателя с постоянными магнитами для получения его электромагнитных параметров. Предложены индикаторы информативности конечного фрагмента данных на основе анализа геометрических характеристик ведущих гиперплоскостей в постановке задачи наименьших квадратов. Получены оценки электромагнитных параметров настраиваемой модели синхронного двигателя с постоянными магнитами с относительными ошибками оценивания в режиме частотного пуска на холостом ходу в 26 % и 78 % для активного сопротивления и индуктивности обмотки статора соответственно и в режиме работы под нагрузкой 5,5 % и 39 %. Полученный индикатор информативности конечного фрагмента данных на основе угла между ведущими гиперплоскостями позволяет оценивать обусловленность задачи без непосредственного вычисления собственных или сингулярных чисел информационной (симметричной, положительно-определенной) матрицы метода наименьших квадратов.

Выводы. Предложенные методика оценивания параметров настраиваемых моделей синхронного двигателя с постоянными магнитами и индикаторы информативности конечного фрагмента данных могут быть использованы для проектирования замкнутых систем электропривода погружных установок, находящихся в режиме прерывистой эксплуатации.

Ключевые слова: нестационарная динамическая система, настраиваемые модели, идентификация по малому числу наблюдений, метод наименьших квадратов, синхронный двигатель с постоянными магнитами, проекционная идентификация, ведущая гиперплоскость, проекционное сопровождение ведущей гиперплоскости, индикатор информативности

Aleksandr Savelievich Glazyrin

National Research Tomsk Polytechnic University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor of Power and Electrical Engineering Department of School of Energy and Power Engineering, Russia, Tomsk; Industrial University of Tyumen, Professor of Electrical Engineering Department, Russia, Tyumen, telephone (3822) 70-17-77, e-mail: asglazyrin@tpu.ru

Evgeniy Igorevich Popov

Industrial University of Tyumen, Postgraduate Student of Cybernetic Systems Department, Assistant Lecturer of Electrical Engineering Department, Russia, Tyumen, e-mail: popovei72@mail.ru

Vladimir Anatolievich Kopyrin

Industrial University of Tyumen, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Acting Head of Cybernetic Systems Department, Associate Professor of Electrical Engineering Department, Russia, Tyumen, telephone (3452) 28-30-16, e-mail: kopyrinva@gmail.com

Methodology for parameters projection identification of an adaptive permanent magnet synchronous motor and informativity indicators of finite data fragments

Abstract

Background. Under the conditions of transferring oil wells into intermittent operating modes, there is a need to develop closed sensorless control systems of electric drives of submersible installations, including those with synchronous motors with permanent magnets. To implement these systems, it is necessary to develop effective methods for dynamic identification of the parameters of the electric motor model in connection with the cyclic change in the thermal mode of its operation. Currently, existing identification methods face the problem of high computational costs and the lack of a priori information on the nature of interference in the measuring channels. Thus, the task to develop new robust methods to identify the parameters of adaptive models of dynamic systems, in particular, a submersible electric drive based on synchronous motors with permanent magnets, becomes relevant.

Materials and methods. The paper discusses methods to identify parameters of adaptive mathematical models of nonstationary dynamic systems using the example of estimating electromagnetic parameters of a permanent magnet synchronous motor. An implicit multistep difference scheme is used to approximate the derivative in discrete time.

Results. The authors have developed a methodology for projection identification of parameters of adaptive models of dynamic systems and have tested it on an adaptive model of a stator of a synchronous motor with permanent magnets to obtain its electromagnetic parameters. The informativity indicators of the finite data fragment are proposed based on the analysis of the geometric characteristics of the leading hyperplanes in the formulation of the least squares problem. The proposed methodology for parameters projection identification of an adaptive model of a synchronous motor with permanent magnets made it possible to obtain estimates of its electromagnetic parameters with relative estimation errors of 26 % and 78 % for the active resistance and inductance of the stator winding, respectively, in the idle frequency start mode and 5,5 % and 39 % for the load mode. The informativity indicator of the finite data fragment obtained is based on the angle between the leading hyperplanes. It makes it possible to estimate the conditionality of the problem without directly calculating the eigenvalues or singular values of the information (symmetric, positive-definite) matrix of the least squares method.

Conclusions. The obtained methods for parameters estimation of adaptive models of permanent magnet synchronous motor and informativity indicators of the finite data fragment can be used to design closed electric drive systems of submersible installations operating in intermittent operation mode.

Key words: non-stationary dynamic system, adaptive models, identification by a small number of observations, least squares method, permanent magnet synchronous motor, projection identification, leading hyperplane, projection tracking of the leading hyperplane, data informativity indicators

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.6.069-078

Введение. Синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ) получили широкое распространение в электроприводах общепромышленного назначения [1], в частности в

системах электропривода погружных установок центробежных электронасосов УЭЦН [2, 3]. В связи с распространенной практикой перевода нефтяных скважин в режимы прерывистой

эксплуатации в научно-технической литературе все чаще поднимаются вопросы оптимизации режимов работы скважин [4] и перехода на векторные бездатчиковые системы управления электроприводом [5]. Это связано со снижением надежности компонентов УЭЦН в прерывистых режимах вследствие существенного снижения времени разгона погружного электродвигателя (ПЭД) и возрастания крутильных колебаний [6]. Основным препятствием для широкого внедрения бездатчиковых векторных систем регулирования является отсутствие достоверной информации о параметрах схемы замещения погружной электрической машины для настройки регуляторов и систем оценивания неизмеряемых механических координат электропривода.

Учитывая специфику прерывистого режима эксплуатации скважины [7], для обеспечения эффективного управления параметры настраиваемых моделей электропривода должны динамически изменяться в течение всего цикла накопления и откачки жидкости. Кроме того, оценивание параметров должно вестись средствами цифрового сигнального процессора наземной станции управления, в связи с чем основным требованием к методу идентификации является его экономичность с точки зрения затрат вычислительных ресурсов. По существу, ставится задача динамической (текущей) идентификации параметров настраиваемых моделей электропривода с СДПМ по малому числу наблюдений [8].

Для оценки параметров схемы замещения СДПМ применяются известные методы на основе частотного анализа [9, 10], однако для их применения необходимы режимы заторможенного ротора, что делает данный класс методов более эффективным для задач предварительной идентификации. Известные методы адаптивного оценивания параметров статора [11, 12] имеют недостатки, основным из которых является необходимость качественного перехода от систем дифференциальных уравнений к системе разностных. Кроме того, измерения сигналов в реальной системе всегда сопровождаются наличием шумовой составляющей, в связи с чем адаптивные методы оказываются уязвимы к качеству организации измерительной системы и имеют большую эффективность для общепромышленных или прецизионных электроприводов.

Методы идентификации параметров на основе метаэвристических алгоритмов, такие как метод дифференциальной эволюции [13] или генетические алгоритмы [14, 15], несмотря на свою высокую эффективность в решении нелинейных задач оптимизации, в инженерной практике имеют значительные вычислительные затраты. В связи с чем метаэвристические методы мало подходят для задач динамической идентификации.

Ниже предлагается новый подход к оцениванию параметров динамических систем на примере синхронного двигателя с постоянными

магнитами, учитывающий ограничения в виде существенных помех измерений и необходимости экономии вычислительных затрат на каждом шаге дискретизации.

Постановка задачи, объект и методы исследования. Рассмотрим задачу идентификации (оценивания) параметров R , L электромагнитной подсистемы СДПМ на скользящем окне просмотра по доступным измерениям переменных состояния СДПМ (напряжение и ток статора, угловая скорость ротора) в постановке метода наименьших квадратов (МНК).

В качестве объекта исследования рассмотрим математическую модель синхронного двигателя с постоянными магнитами в ортогональной вращающейся синхронно с ротором dq -системе координат, которая в нормальной форме Коши имеет следующий вид [16]:

$$\begin{cases} \frac{di_d(t)}{dt} = \frac{1}{L} [U_d(t) - Ri_d(t) + L\omega_e(t)i_q(t)], \\ \frac{di_q(t)}{dt} = \frac{1}{L} [U_q(t) - Ri_q(t) - \\ - L\omega_e(t)i_d(t) - \psi_m\omega_e(t)], \\ \frac{d\omega_r(t)}{dt} = \frac{1}{J_\Theta} \left[\frac{3}{2} Z_p i_q(t) \psi_m - M_c(t) \right], \end{cases} \quad (1)$$

где $U_d(t)$, $U_q(t)$ – проекции вектора входного напряжения в осях dq , В; $i_d(t)$, $i_q(t)$ – проекции вектора статора СДПМ в осях dq , А; R – активное сопротивление статорной обмотки СДПМ, Ом; L – индуктивность статорной обмотки СДПМ, Гн; ψ_m – потокосцепление постоянного магнита, Вб; Z_p – число пар полюсов СДПМ; $\omega_e(t)$ – электрическая угловая частота, $\omega_e = Z_p\omega_r$, рад/с; J_Θ – эквивалентный приведенный момент инерции вала СДПМ, кг·м².

При составлении модели были приняты следующие допущения [17]:

- 1) рассматривается неявнополюсная синхронная машина;
- 2) статорная обмотка симметрична;
- 3) магнитный поток, создаваемый постоянными магнитами ротора, не зависит от токов статора и принимается постоянным во времени;
- 4) питание осуществляется от симметричного идеального источника трехфазного напряжения;
- 5) в магнитной цепи синхронной машины отсутствуют насыщение, гистерезис и вихревые токи;
- 6) ЭДС СДПМ принимается синусоидальной.

Поскольку получение оценок параметров настраиваемой модели СДПМ необходимо для качественной настройки регуляторов в системе векторного управления, предположим, что изначально регулятор скорости из-за отсутствия достоверных оценок настраиваемой модели СДПМ имеет некачественную

настройку, что приводит к остаточному отклонению по угловой скорости ротора СДПМ при наборе нагрузки. Кроме того, положим, что измерительные каналы по переменным состояния и входным сигналам напряжения задания подвержены внешним помехам. Для этого будем предполагать, что для решения задачи оценивания доступна аддитивная смесь реального сигнала переменной состояния СДПМ и помех измерений вида $y_{\text{изм}}(t) = y(t) + \xi(t)$. Величина $\xi(t)$ подчиняется гауссовскому закону распределения [18]:

$$p_G(\xi) = \frac{1}{\sigma_y \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\xi - m_\xi)^2}{2\sigma_y^2}}, \quad (2)$$

где m_ξ – математическое ожидание случайной величины ξ , $m_\xi = 0$; σ_y – среднеквадратичное отклонение для заданного сигнала y .

Среднеквадратичные отклонения для гауссовского распределения помех (2) приняты равными: по напряжению $\sigma_U = 20$ В; по току $\sigma_i = 2$ А; по угловой скорости ротора $\sigma_\omega = 5$ рад/с.

Осциллограммы переходных характеристик по напряжению и току во вращающейся синхронно с ротором dq -системе координат и характеристик по угловой скорости представлена на рис. 1.

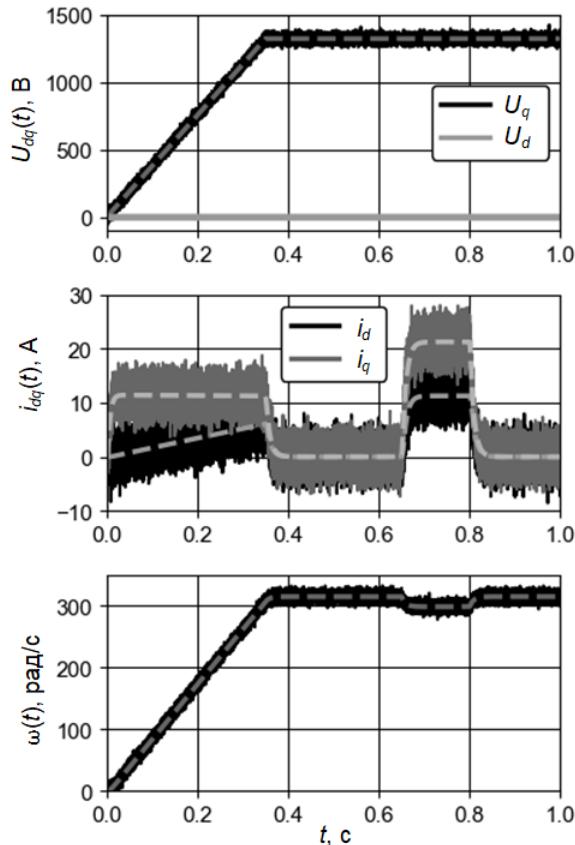


Рис. 1. Осциллограммы модельных измерений переходных характеристик

«Точные» характеристики переменных на рис. 1 обозначены пунктирующими линиями. Моделирование выполнено в следующих режимах: 0..0,35 с – частотный пуск на холостом ходу; 0,65..0,8 с – работа в режиме номинальной нагрузки.

Выделим отдельно из системы (1) уравнение равновесия статора по оси q и перепишем ее в виде настраиваемой модели:

$$\frac{di_q(t)}{dt} = \left(\hat{K}_{\text{ЭМ}_1} \left[U_q(t) - \psi_m \omega_e(t) \right] + \hat{K}_{\text{ЭМ}_2} i_q(t) - \omega_e(t) i_d(t) \right), \quad (3)$$

где знак над переменной « $\hat{\cdot}$ » – символ оценки; $\hat{K}_{\text{ЭМ}_1}, \hat{K}_{\text{ЭМ}_2}$ – искомые коэффициенты модели, зависящие от времени, которые в дискретной форме имеют вид

$$\hat{K}_{\text{ЭМ}}(k) = \begin{pmatrix} \hat{K}_{\text{ЭМ}_1}(k) \\ \hat{K}_{\text{ЭМ}_2}(k) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -\hat{R}(k) \\ \hat{L}(k) & \hat{L}(k) \end{pmatrix}^T, \quad (4)$$

где k – шаг дискретизации.

Поскольку для решения задачи оценивания параметров доступны только дискретные замеры сигналов с АЦП, которые собираются в конечный фрагмент данных – скользящее окно просмотра, необходима дискретная форма настраиваемой модели (3). Основной проблемой при переходе из непрерывного времени в дискретное является численная аппроксимация производной. Известны различные методы перехода в дискретное время, такие как явный и неявный методы Эйлера, метод билинейной аппроксимации [19], различающиеся точностью аппроксимации динамических процессов во временной и частотной областях [20]. Однако для решения этой задачи также возможно применение многошаговых методов аппроксимации, предназначенных для решения задачи Коши в области систем обыкновенных дифференциальных уравнений. Это позволяет на малом числе наблюдений получить более высокую обусловленность задачи оценивания, что в отсутствие априорных статистических предположений имеет наибольшее влияние на точностные свойства методов оценивания в МНК-постановке [8, 21].

Для обеспечения высокой эффективности решения задачи оценивания электромагнитных параметров настраиваемой модели СДПМ с точки зрения информативности конечных фрагментов ретроспективных данных и точностных свойств оценок параметров относительно эталонных дискретную настраиваемую модель СДПМ получим путем дискретизации уравнений (2) с помощью неявного метода Милна 4-го порядка [21]:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{\text{ЭМ}}(k) = \hat{K}_{\text{ЭМ}_1} F_U(k) + \hat{K}_{\text{ЭМ}_2} F_I(k), \\ F_{\text{ЭМ}}(k) = \left(\frac{8}{3T_d} (i_q(k) - i_q(k-3)) + \right. \\ \left. \omega_e(k) i_d(k) + 3\omega_e(k-1) i_d(k-1) + \right. \\ \left. + 3\omega_e(k-2) i_d(k-2) + \right. \\ \left. \omega_e(k-3) i_d(k-3) \right), \\ F_U(k) = \left[\begin{array}{l} U_q(k) - \psi_m \omega_e(k) \\ + 3[U_q(k-1) - \psi_m \omega_e(k-1)] \\ + 3[U_q(k-2) - \psi_m \omega_e(k-2)] \\ + [U_q(k-3) - \psi_m \omega_e(k-3)] \end{array} \right], \\ F_I(k) = i_q(k) + 3i_q(k-1) + 3i_q(k-2) + i_q(k-3). \end{array} \right. \quad (5)$$

На основе системы разностных уравнений (4) составим систему линейных алгебраических уравнений в МНК-постановке на конечном фрагменте ретроспективных данных:

$$\mathbf{X}_{\text{ЭМ}}^T(k) \mathbf{X}_{\text{ЭМ}}(k) \hat{\mathbf{K}}_{\text{ЭМ}}(k) = \mathbf{X}_{\text{ЭМ}}^T(k) \mathbf{y}_{\text{ЭМ}}(k), \quad (6)$$

где матрица регрессов $\mathbf{X}_{\text{ЭМ}}(k)$ и вектор правой части системы нормальных уравнений $\mathbf{y}_{\text{ЭМ}}(k)$ на каждом k -м шаге дискретизации вычисляются по выражениям:

$$\mathbf{X}_{\text{ЭМ}}(k) = \begin{pmatrix} F_U(k) & F_I(k) \\ F_U(k-1) & F_I(k-1) \\ \vdots & \vdots \\ F_U(k-n) & F_I(k-n) \end{pmatrix}; \quad (7)$$

$$\mathbf{y}_{\text{ЭМ}}(k) = \begin{pmatrix} F_{\text{ЭМ}}(k) \\ F_{\text{ЭМ}}(k-1) \\ \vdots \\ F_{\text{ЭМ}}(k-n) \end{pmatrix}, \quad (8)$$

где n – длина фрагмента ретроспективных данных.

Искомый вектор оценок $\hat{\mathbf{K}}_{\text{ЭМ}}$ для системы (6) может быть получен различными методами итерационного решения систем линейных алгебраических уравнений. Однако нахождение «точного» псевдорешения переобусловленной СЛАУ на каждом шаге сопряжено со следующими проблемами:

1) классические итерационные алгоритмы могут оказаться неустойчивыми, и при движении окна просмотра на каждом шаге дискретизации результатом выполнения алгоритма станет расходящийся процесс, а значит, оценки параметров не будут найдены и задача идентификации оказывается нерешенной, что может привести к потере устойчивости замкнутой системы управления;

2) при решении задачи идентификации методом наименьших квадратов не приводится никакой априорной информации относительно ошиб-

ок измерений, при этом на малом числе наблюдений классические гипотезы об эффективности и несмещенности оценки, полученной методом наименьших квадратов, не подтверждаются, а значит, псевдорешение СЛАУ будет гарантированно смещено относительно глобального экстремума.

Как правило, методы адаптивной идентификации представляют собой рекуррентные выражения. К таким методам можно отнести рекуррентный метод наименьших квадратов, алгоритм Роббинсона-Монро, алгоритм Качмажа и его модификации [22]. Данные методы направлены на «решение» СЛАУ в МНК-постановке, т. е. на итерационный поиск коэффициентов, минимизирующих квадрат невязки между выходом системы и дискретной моделью. Однако если условия несмещенности и эффективности полученных оценок параметров нарушаются, то на каждом шаге итерационного процесса поиска в пространстве коэффициентов решение сходится к некоторому локальному (т. е. минимуму данной конкретной МНК-задачи на текущем шаге дискретизации), а не глобальному (точному) экстремуму.

Для решения задачи оценивания сформулируем следующие требования:

1) устойчивость итерационного процесса оценивания в смысле ограниченности по норме вектора искомых коэффициентов;

2) относительно малые вычислительные затраты на поиск решения при составленных СЛАУ.

Такими свойствами обладает, например, метод Качмажа или другие методы, использующие подпространства Крылова [23], основанные на процессе последовательного приближения к решению путем проведения проекций на гиперплоскости, которые заданы уравнениями системы. Поскольку даже при непосредственном решении уравнения (6) любым из данных методов оценки будут иметь смещение относительно глобального экстремума, для решения задачи оценивания параметров по малому числу наблюдений данный подход может быть упрощен с точки зрения уменьшения количества шагов проведения проекций при МНК-постановке задачи на каждом шаге оценивания.

Методика проекционной идентификации и индикаторы информативности данных. Введем следующие обозначения:

$$\mathbf{A}_{\text{ЭМ}}(k) = \mathbf{X}_{\text{ЭМ}}^T(k) \mathbf{X}_{\text{ЭМ}}(k); \quad \mathbf{b}_{\text{ЭМ}}(k) = \mathbf{X}_{\text{ЭМ}}^T(k) \mathbf{y}_{\text{ЭМ}}(k).$$

Тогда система (5) может быть представлена в следующем виде:

$$\mathbf{A}_{\text{ЭМ}}(k) \hat{\mathbf{K}}_{\text{ЭМ}}(k) = \mathbf{b}_{\text{ЭМ}}(k). \quad (9)$$

Идея методики состоит в выборе только одной из совокупности гиперплоскостей системы (9), которую в дальнейшем будем называть ведущей. Для организации итерационного процесса оценивания параметров настраивает-

мой модели на каждом шаге дискретизации к ведущей гиперплоскости проводится проекция. На рис. 2 приведена поясняющая иллюстрация при размерности пространства коэффициентов $\hat{\mathbf{K}}_{\text{ЭМ}} \in \mathbb{R}_+^2$, где коэффициенты и смещение ведущей гиперплоскости в пространстве искомых параметров отмечены пунктирной линией.

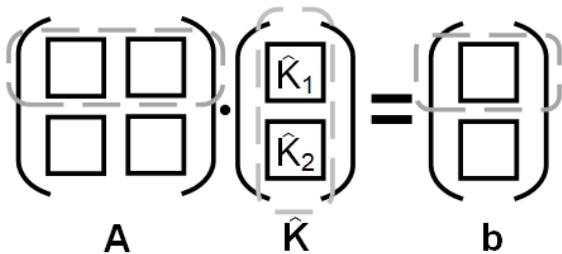


Рис. 2. Схема выбора ведущей гиперплоскости

Методика проекционной идентификации параметров настраиваемой модели синхронного двигателя с постоянными магнитами с сопровождением ведущей гиперплоскости состоит из следующих шагов:

1) выбираются вектор начального приближения $\hat{\mathbf{K}}_{\text{ЭМ}}(0)$ и ведущая гиперплоскость (номер строки h симметричной положительно определенной информационной матрицы \mathbf{A} и вектора правой части \mathbf{b}); выбранный номер ведущей гиперплоскости назначается на весь период работы алгоритма;

2) при заданной частоте дискретизации выбирается длина окна просмотра n , включающего в себя $n+m$ замеров мгновенных значений сигналов тока, напряжения и угловой скорости ротора (глубина задержки m определяется выбранным методом дискретизации, для выбранного в настоящем исследовании неявного метода Милна 4-го порядка полагаем $m = 3$) [21];

3) составляются системы линейных алгебраических уравнений в МНК-постановке (9);

4) определяются значения параметров электромагнитной подсистемы:

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{K}}_{\text{ЭМ}}(k) = \hat{\mathbf{K}}_{\text{ЭМ}}(k-1) + \frac{q(k)}{\|\mathbf{A}_{\text{ЭМ}}^{(h)}(k)\|^2} \cdot \mathbf{A}_{\text{ЭМ}}^{(h)}(k), \\ q(k) = \mathbf{b}_{\text{ЭМ}}^{(h)}(k) - \mathbf{A}_{\text{ЭМ}}^{(h)}(k) \cdot \hat{\mathbf{K}}_{\text{ЭМ}}(k-1); \end{cases} \quad (10)$$

5) при получении новых данных от АЦП удаляются наиболее ранние замеры из окна просмотра, окно просмотра смещается на один шаг дискретизации;

6) в память включаются новые данные, и повторяются шаги 2–5.

Таким образом, решением задачи идентификации параметров настраиваемой модели СДПМ по малому числу наблюдений является не непосредственное решение системы (9) в классическом (общепринятом)

смысле минимизации квадрата невязки, а проекционное сопровождение ведущей гиперплоскости. Оценивание параметров организовано на основе конечного фрагмента ретроспективных данных (по малому числу наблюдений) путем однократного проведения проекции к ведущей гиперплоскости и нахождении координат точки пересечения.

Проведем апробацию методики проекционной идентификации на скользящем окне просмотра для СДПМ марки ПВЭДН 42-1280, параметры настраиваемой модели которого представлены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры СДПМ

Наименование параметра	Значение
Номинальное напряжение $U_{\text{ном}}$, В	1470/ $\sqrt{3}$
Номинальная мощность $P_{\text{ном}}$, кВт	42
Активное сопротивление обмотки статора R , Ом	2,528
Индуктивность обмотки статора L , мГн	4,5
Удельная ЭДС вращения E , В/(об/мин)	0,440
Эквивалентный момент инерции J , кг·м ²	0,08
Число пар полюсов Z_p	1

Длина конечного фрагмента ретроспективных данных (окна просмотра) принята равной 3000 точек. Частота дискретизации – 40 кГц. Переходные характеристики оценок активного сопротивления и индуктивности обмотки статора предложенной методикой проекционной идентификации представлены на рис. 3, где первые 0,075 с оценки параметров приняты равными нулю, так как окно просмотра еще не было сформировано.

Выполним расчет относительных ошибок оценивания обоих параметров в каждом из режимов работы СДПМ по следующим формулам:

$$\Delta R = \frac{\sum_{j=j_{\text{нач}}}^{j_{\text{кон}}} \hat{R}_j - R}{\frac{j_{\text{кон}} - j_{\text{нач}} + 1}{R}} \cdot 100%; \quad (11)$$

$$\Delta L = \frac{\sum_{j=j_{\text{нач}}}^{j_{\text{кон}}} \hat{L}_j - L}{\frac{j_{\text{кон}} - j_{\text{нач}} + 1}{L}} \cdot 100%, \quad (12)$$

где $j_{\text{нач}}, j_{\text{кон}}$ – пределы суммирования, выбираются по номеру шагов дискретизации, ограничивающих модельный режим работы СДПМ при данной частоте дискретизации.

Результаты расчетов сведем в табл. 2.

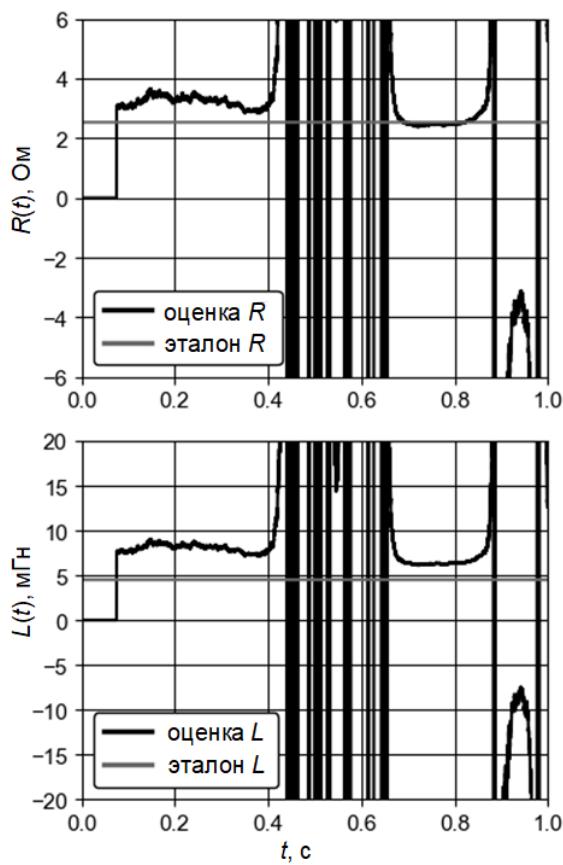


Рис. 3. Переходные характеристики оценок активного сопротивления и индуктивности обмотки статора СДПМ

В задачах оценивания параметров по малому числу наблюдений основным свойством конечного фрагмента данных, влияющим на точностные характеристики процесса оценивания, является степень его информативности. Как правило, степень информативности данных оценивается с помощью числа обусловленности информационной матрицы \mathbf{A} или расчетом других индикаторов информативности [8].

Таблица 2. Расчет средних значений и относительных ошибок оценивания параметров

Режим	\hat{R} , Ом	ΔR , %	\hat{L} , мГн	ΔL , %
Частотный пуск на ХХ 0..0,35 с	3,2	26	8	78
Работа на ХХ 0,4..0,65 с	1,23	-51	3,1	-31
Работа при номинальной нагрузке 0,7..0,8 с	2,4	-5,5	6,3	39
Работа на ХХ 0,8..1,0 с	12,7	402	32	609

Согласно предложенной методике проекционной идентификации с сопровождением ведущей гиперплоскости, углы между гиперплоскостями самой МНК-задачи, а также ведущими гиперплоскостями «соседних»

МНК-задач могут быть использованы в качестве индикаторов информативности данных на каждом шаге дискретизации. Индикаторы информативности по углу и длине проекции между ведущими гиперплоскостями соответственно вычисляются по формулам:

$$\theta(k) = \arccos \frac{\left| \mathbf{A}^{(h)}(k) \cdot \mathbf{A}^{(h)}(k-1) \right|}{\left\| \mathbf{A}^{(h)}(k) \right\|_2 \cdot \left\| \mathbf{A}^{(h)}(k-1) \right\|_2}; \quad (13)$$

$$I_{np}(k) = \left\| \hat{\mathbf{K}}(k) - \hat{\mathbf{K}}(k-1) \right\|_2. \quad (14)$$

Для оценки эффективности предложенных индикаторов информативности выполним их расчет на участке моделирования от 0,075 с до 1 с в процессе оценивания параметров настраиваемой модели СДПМ и сравним полученные результаты с характеристиками изменения числа обусловленности информационной матрицы по формуле

$$\text{cond}[\mathbf{A}](k) = \frac{\lambda_{\max}[\mathbf{A}](k)}{\lambda_{\min}[\mathbf{A}](k)}, \quad (15)$$

где λ_{\max} , λ_{\min} – наибольшее и наименьшее собственные (или сингулярные) числа матрицы \mathbf{A} .

Переходные характеристики индикаторов информативности (12) и (13) в сравнении с изменением числа обусловленности информационной матрицы изображены на рис. 4.

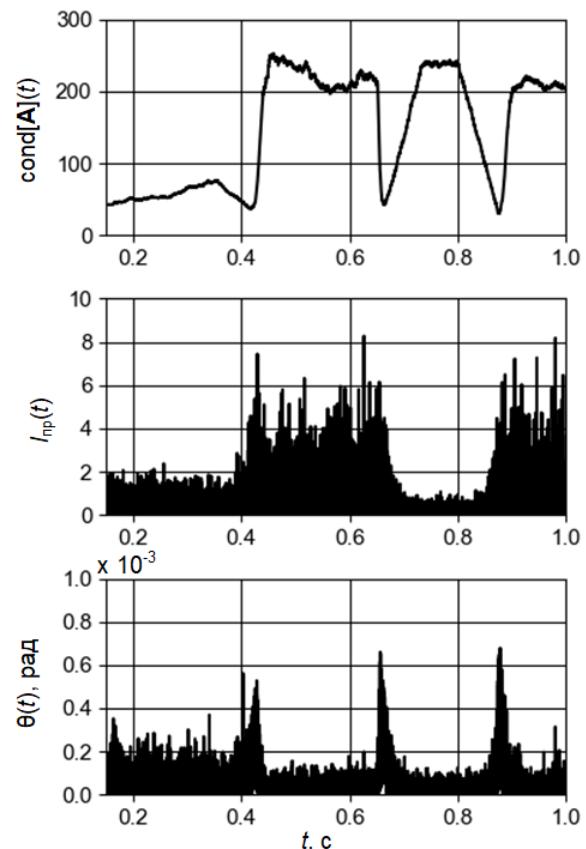


Рис. 4. Переходные характеристики индикаторов информативности данных

Обсуждение результатов. Анализ полученных данных (рис. 3 и табл. 2) показывает, что наибольшая точность оценивания параметров настраиваемой модели статора (2) достигается в режимах частотного пуска на холостом ходу (26 % и 78 %) и работы под нагрузкой (–5,5 % и 39 %). В режиме работы на холостом ходу оценки имеют высокую дисперсию, однако средние значения оценок и их относительных ошибок в –51 % и –31 % для активного сопротивления и индуктивности соответственно позволяют сделать вывод, что в характеристиках оценок есть тренд, который должен быть выделен более сложными методами [24], чем фильтр скользящего среднего.

Переходная характеристика числа обусловленности (рис. 4) показывает, что в переходных режимах обусловленность задачи выше [8]. Однако прямая корреляция между точностью оценивания параметров предложенной методикой проекционной идентификации и обусловленностью задачи отсутствует. Сравнение осцилограммы для числа обусловленности $\text{cond}[\mathbf{A}](t)$ и длины проекции $l_{\text{pr}}(t)$ показывает, что на точность оценивания влияет не только текущее значение числа обусловленности, но и скорость его изменения, так как при переходе в установившийся режим работы под нагрузкой оценки параметров не потеряли свои точностные свойства.

Согласно предложенной методике проекционной идентификации, задача оценивания параметров решается выполнением операции проектирования на ведущую гиперплоскость. Участки времени с более низким числом обусловленности соответствуют более высоким значениям угла между ведущими гиперплоскостями соседних МНК-задач (рис. 4.) Следовательно, при итеративном оценивании параметров на скользящем окне просмотра данный параметр может быть использован в качестве индикатора информативности конечного фрагмента данных вместо непосредственного вычисления числа обусловленности, что позволит снизить вычислительные затраты на оценку информативности фрагмента по малому числу наблюдений.

Выводы. В условиях перевода нефтяных скважин в прерывистые режимы эксплуатации возникает задача синтеза векторных бездатчиковых систем управления электроприводом погружной установки с синхронными двигателями с постоянными магнитами. При этом для качественного и эффективного управления электроприводом необходима реализация систем динамического оценивания его параметров на сравнительно малом конечном фрагменте доступных зашумленных измерений.

Предложенная и апробированная новая методика проекционной идентификации настраиваемой модели статора СДПМ позволяет выполнять динамическое оценивание его параметров

на скользящем окне просмотра. Основным преимуществом предложенного подхода является устойчивый процесс оценивания даже в условиях снижения обусловленности задачи, что является основной характеристикой, влияющей на точностные свойства оценок в условиях отсутствия априорной информации о характере помех измерений.

Индикаторы информативности на основе длин проекций и углов между ведущими гиперплоскостями на каждом шаге оценивания, предложенные для оценки информативности конечного скользящего фрагмента данных в задачах оценивания параметров, позволяют оценить обусловленность текущей задачи без непосредственного вычисления собственных или сингулярных чисел информационной матрицы, что существенно снижает вычислительные затраты микроконтроллера. Полученные результаты необходимы для проектирования замкнутых систем электропривода погружных установок с СДПМ, находящихся в режиме прерывистой эксплуатации.

Список литературы

1. Панкратов В.В. Вентильный электропривод: от стиральной машины до металлорежущего станка и электровоза // Электронные компоненты. – 2007. – № 2. – С. 68–77.
2. Воеков В.Н., Мещеряков В.Н., Крюков О.В. Вентильный электропривод для погружных нефтяных насосов с импульсным преобразователем напряжения в звене постоянного тока преобразователя частоты и релейным управлением инвертора напряжения // Вестник ЮУрГУ. Сер. Энергетика. – 2020. – Т. 20, № 2. – С. 110–119.
3. Карпюк А.В. Энергоэффективные УЭЦН с вентильными электродвигателями // Инженерная практика. – 2017. – № 5. – С. 14–19.
4. Тагирова К.Ф., Нугаев И.Ф. Концептуальные основы автоматизации управления установками электроцентробежных насосов нефтедобывающих скважин // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2020. – Т. 21, № 2. – С. 102–109.
5. Кладиев С.Н. Обзор и критический анализ современного состояния и путей совершенствования систем электропитания и автоматического управления установок электроцентробежных насосов в прерывистых режимах эксплуатации нефтяных скважин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334, № 9. – С. 203–215.
6. Надежность погружных нефтяных насосов при периодической эксплуатации / Е.А. Лихачёва, В.Г. Островский, Н.А. Лыкова, А.Н. Мусинский, П.А. Байдаров // PROНЕФТЬ. Профессионально о нефти. – 2021. – Т. 6, № 1. – С. 54–58.
7. Уразаков К.Р., Рукин М.В., Борисов А.О. Моделирование тепловых процессов в погружном двигателе электроцентробежного насоса, работающего в периодическом режиме // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334, № 4. – С. 62–71.

8. **Фурсов В.А.** Идентификация систем по малому числу наблюдений. – Самара: Изд-во СГАУ, 2007. – 81 с.
9. **Авдеев А.С., Осипов О.И.** Идентификация электрических параметров синхронного двигателя с постоянными магнитами // Электротехнические системы и комплексы. – 2021. – № 3(52). – С. 38–46.
10. **Авдеев А.С., Осипов О.И.** Идентификация параметров синхронных двигателей с постоянными магнитами на основе их частотного анализа // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2020. – Т. 174, № 1. – С. 8–14.
11. **Базылев Д.Н., Бобцов А.А., Пыркин А.А., Чекин М.С.** Алгоритмы идентификации параметров синхронного двигателя с постоянными магнитами // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2016. – Т. 17, № 3. – С. 193–198.
12. **Вдовин В.В.** Адаптивные алгоритмы оценивания координат бездатчиковых электроприводов переменного тока с расширенным диапазоном регулирования: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / НГТУ. – Новосибирск, 2014. – 246 с.
13. **Double update intelligent strategy for permanent magnet synchronous motor parameter identification** / S. Zhou, D. Wang, M. Du, et al. // Computers, Materials and Continua. – 2022. – Vol. 74, No. 2. – P. 3391–3404.
14. **Gao Y., Wang X., Chen Q.** Characteristic model-based adaptive control with genetic algorithm estimators for four-PMSM synchronization system // International Journal of Control, Automation and Systems. – 2020. – Vol. 18. – P. 1605–1616.
15. **Liu K., Zhu Z.Q.** Quantum genetic algorithm based parameter estimation of PMSM under variable speed control accounting for system identifiability and VSI nonlinearity // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2014. – Vol. 62, No. 4. – P. 2363–2371.
16. **Виноградов А.Б.** Векторное управление электроприводами переменного тока. – Иваново, 2008. – 298 с.
17. **Сипайлов Г.А., Кононенко Е.В., Хорьков В.А.** Электрические машины (специальный курс). – М.: Высш. шк., 1987. – 287 с.
18. **Васюков В.Н.** Общая теория связи. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. – 580 с.
19. **Белодедов М.В.** Методы проектирования цифровых фильтров. – Волгоград: Изд-во Волгоградского государственного университета, 2004. – 64 с.
20. **Сравнительный** анализ частотных характеристик вариантов построения цифровых моделей фильтров низких частот компонентов электротехнических комплексов / А.С. Глазырин, Е.И. Попов, С.С. Попов и др. // Известия Томского политехнического университета. Промышленная кибернетика. – 2024. – Т. 2, № 3. – С. 9–19.
21. **Попов Е.И., Глазырин А.С., Копырин В.А.** Влияние методов дискретизации на обусловленность информационной матрицы и характер формирования гиперсфер ошибок в задачах оценивания параметров по малому числу наблюдений // Системы анализа и обработки данных. – 2025. – Т. 97, № 1. – С. 85–104.
22. **Коновалов В.И.** Идентификация и диагностика систем. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 163 с.
23. **Баландин М.Ю., Шурина Э.П.** Методы Решения СЛАУ большой размерности. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. – 70 с.
24. **Синицын И.Н.** Фильтры Калмана и Пугачева. – М.: Университетская книга; Логос, 2006. – 640 с.

References

1. Pankratov, V.V. Ventil'nyy elektroprivod: ot stiral'noy mashiny do metallorezhushchego stanka i elektrovozoa [Valve electric drive: from washing machine to metal-cutting machine and electric locomotive]. *Elektronnye komponenty*, 2007, no. 2, pp. 68–77.
2. Voekov, V.N., Meshcheryakov, V.N., Kryukov, O.V. Ventil'nyy elektroprivod dlya pogruznykh neftyanykh nasosov s impul'snym preobrazovatelem napryazheniya v zvene postoyannogo toka preobrazovatelya chastoty i releynym upravleniem invertora napryazheniya [Valve electric drive for submersible oil pumps with pulse voltage converter in the DC link of the frequency converter and relay control of the voltage inverter]. *Vestnik YuUrGU. Seriya Energetika*, 2020, vol. 20, no. 2, pp. 110–119.
3. Karpyuk, A.V. Energoeffektivnye UETsN s ventil'nymi elektrodvigatelyami [Energy-efficient ESPs with valve electric motors]. *Inzhenernaya praktika*, 2017, no. 5, pp. 14–19.
4. Tagirova, K.F., Nugaev, I.F. Kontseptual'nye osnovy avtomatizatsii upravleniya ustanovkami elektrotsentrobeznykh nasosov neftedobyvayushchikh skvazhin [Actual Tasks of Oil-Wells Electric Submersible Pump Control Automation]. *Mekhanika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2020, vol. 21, no. 2, pp. 102–109.
5. Kladiev, S.N. Obzor i kriticheskiy analiz sovremennoj sostoyaniya i putey sovershenstvovaniya sistem elektropitanija i avtomaticheskogo upravleniya ustanovok elektrotsentrobeznykh nasosov v peryistykh rezhimakh ekspluatatsii neftyanykh skvazhin [Review and critical analysis of the current state and ways to improve regulated power supplies and automatic control systems for electric centrifugal pumping units in intermittent operation of oil wells]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*, 2023, vol. 334, no. 9, pp. 203–215.
6. Likhacheva, E.A., Ostrovskiy, V.G., Lykova, N.A., Musinskiy, A.N., Baydarov, P.A. Nadezhnost' pogruznykh neftyanykh nasosov pri periodicheskoy ekspluatatsii [Oil submersible pumps reliability during cyclic operation]. *PROneft'. Professional'no o nefti*, 2021, vol. 6, no. 1, pp. 54–58.
7. Urazakov, K.R., Rukiv, M.V., Borisov, A.O. Modelirovanie teplovlykh protsessov v pogruznom dvigatele elektrotsentrobezhnogo nasosa, rabotayushchego v periodicheskem rezhime [Simulation of thermal processes in a submersible motor of an electric centrifugal pump operating in a periodic mode]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*, 2023, vol. 334, no. 4, pp. 62–71.
8. Fursov, V.A. Identifikatsiya sistem po malomu chislu nablyudenij [Identification of systems with a small number of observations]. Samara: Izdatel'stvo SGAU, 2007. 81 p.
9. Avdeev, A.S., Osipov, O.I. Identifikatsiya elektricheskikh parametrov sinkhronnogo dvigateley s postoyannymi magnitami [Identification of electrical parameters of a permanent magnet synchronous motor]. *Elektrotehnicheskie sistemy i kompleksy*, 2021, no. 3(52), pp. 38–46.
10. Avdeev, A.S., Osipov, O.I. Identifikatsiya parametrov sinkhronnykh dvigateley s postoyannymi magnitami na osnove ikh chastotnogo analiza [Identification of

- parameters of permanent magnet synchronous motors based on their frequency analysis]. *Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIIEM*, 2020, vol. 174, no. 1, pp. 8–14.
11. Bazylev, D.N., Bobtsov, A.A., Pyrkin, A.A., Chezhin, M.S. Algoritmy identifikatsii parametrov sinkhronnogo dvigatelya s postoyannymi magnitami [Algorithms for identifying parameters of a permanent magnet synchronous motor]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 3, pp. 193–198.
 12. Vdovin, V.V. *Adaptivnye algoritmy otsenivaniya koordinat bezdatchikovykh elektroprivodov peremennogo toka s rasshirennym diapazonom regulirovaniya*. Diss. ... kand. tekhn. nauk [Adaptive algorithms for estimating coordinates of sensorless AC electric drives with an extended control range. Cand. tech. sci. diss.]. Novosibirsk, 2014. 246 p.
 13. Zhou, S., Wang, D., Du, M., Li, Y., Cao, S. Double update intelligent strategy for permanent magnet synchronous motor parameter identification. *Computers, Materials and Continua*, 2022, vol. 74, no. 2, pp. 3391–3404.
 14. Gao, Y., Wang, X., Chen, Q. Characteristic model-based adaptive control with genetic algorithm estimators for four-PMSM synchronization system. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2020, vol. 18, pp. 1605–1616.
 15. Liu, K., Zhu, Z.Q. Quantum genetic algorithm based parameter estimation of PMSM under variable speed control accounting for system identifiability and VSI nonlinearity. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, vol. 62, no. 4, pp. 2363–2371.
 16. Vinogradov, A.B. *Vektornoe upravlenie elektroprivodami peremennogo toka* [Vector control of AC electric drives]. Ivanovo, 2008. 298 p.
 17. Sipaylov, G.A., Kononenko, E.V., Khor'kov, V.A. *Elektricheskie mashiny (specialnyj kurs)* [Electrical Machines (Special Course)]. Moscow: Vysshaya shkola, 1987. 287 p.
 18. Vasyukov, V.N. *Obshchaya teoriya svyazi* [General theory of communication]. Novosibirsk: Izdatel'stvo NGTU, 2017. 580 p.
 19. Belodedov, M.V. *Metody proektirovaniya tsifrovых fil'trov* [Digital Filter Design Methods]. Volgograd: Izdatel'stvo Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta, 2004. 64 p.
 20. Glazyrin, A.S., Popov, E.I., Popov, S.S., Kopyrin, V.A., Kladiev, S.N., Leonov, A.P., Voronina, N.A., Kovalev, V.Z. Sravnitel'nyy analiz chastotnykh kharakteristik variantov postroeniya tsifrovych modeley fil'trov nizhnikh chastot komponentov elektrotehnicheskikh kompleksov [Comparative analysis of frequency responses of options for constructing low-pass filters of electrical systems digital models]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Promyshlennaya kibernetika*, 2023, vol. 2, no. 3, pp. 9–19.
 21. Popov, E.I., Glazyrin, A.S., Kopyrin, V.A. Vliyanie metodov diskretizatsii na obuslovnost' informatsionnoy matritsy i kharakter formirovaniya gipersfer oshibok v zadachakh otsenivaniya parametrov po malomu chislu nablyudeniy [The influence of discretization methods on the conditionality of the information matrix and the nature of the formation of error hyperspheres in problems of parameter estimation based on a small number of observations]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh*, 2025, vol. 97, no. 1, pp. 85–104.
 22. Konovalov, V.I. *Identifikatsiya i diagnostika sistem* [Identification and diagnostics of systems]. Tomsk: Izdatel'stvo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2010. 163 p.
 23. Balandin, M.Yu., Shurina, E.P. *Metody resheniya SLAU bol'shoj razmernosti* [Methods for Solving Large-Dimensional SLAEs]. Novosibirsk: Izdatel'stvo NGTU, 2000. 70 p.
 24. Sinitsyn, I.N. *Fil'try Kalmana i Pugacheva* [Kalman and Pugachev filters]. Moscow: Universitetskaya kniga; Logos, 2006. 640 p.