

УДК 681.5.015.24

ДИАГНОСТИКА ПРИВОДОВ РОБОТОВ НА БАЗЕ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПО КРИТЕРИЮ ИДЕНТИФИЦИРУЕМОСТИ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИСКРЕТНОЙ МОДЕЛИ В ПРОСТРАНСТВЕ СОСТОЯНИЙ

С. А. ТРЕФИЛОВ¹, Ю. Р. НИКИТИН²

¹trefilov376908@gmail.ru, ²nikitin@istu.ru

ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова»
(ИжГТУ имени М. Т. Калашникова)

Поступила в редакцию 25.11.2019

Аннотация. Рассмотрены критерии наблюдаемости, управляемости и идентифицируемости приводов как функции ранга расширенной матрицы состояния с матрицей измерения, в которой аналитически учтены относительные ошибки информационно-измерительной системы. Предложен алгоритм вычисления критерия идентифицируемости нелинейной системы управления в дискретном варианте. Предложено использовать идентификацию с точки зрения соответствия математической модели результатам эксплуатации объекта. На каждом шаге вычисляется определитель расширенной матрицы, который сравнивается с некоторой константой, численно разделяющей пространство матриц состояния. Полученные результаты исследований возможно использовать для построения систем диагностики приводов роботов.

Ключевые слова: диагностика; идентификация; приводы роботов; пространство состояний; нелинейная дискретная модель.

ВВЕДЕНИЕ

Приводы роботов работают в автономном режиме, иногда в экстремальных условиях. Для обеспечения их высокой надежности требуется эффективная система диагностики. Для диагностики приводов роботов предлагается алгоритм принятия решения об их идентифицируемости на основе дискретной цифровой модели управления, основанный на подходе соответствия априорной модели объекта результатам эксплуатации, т. е. процесс диагностики определяет адекватность применимости модели объекту. Алгоритм основан на вычислении значения критерия идентифицируемости для дискретной нелинейной модели в пространстве состояний.

Необходимым условием при решении задач синтеза систем управления и диагностики является процесс их идентификации. Причем при синтезе систем управления приводов возможны, а порой и необходимы различного рода допущения, направленные на упрощение математической модели с целью получения конструктивного результата. При разработке алгоритмов диагностирования приводов желательно избегать любых допущений, так как точность идентификации всецело определяет глубину и достоверность формируемого диагноза. То есть процесс глубокой и точной идентификации приводов является основополагающим при разработке алгоритмов их диагностирования, обеспечивающих необходимую достоверность формируемого диагноза.

Метод идентификации в пространстве состояний активно развивается за последние два десятилетия и успешно реализован во многих отраслях промышленности. Одним из первых П. Эйххофф выполнил теоретические обоснования идентификации, разработал алгоритмы и способы идентификации [1, 2]. Исследованию идентификации динамических систем посвящены работы Д. Гроппа [3], Л. Льюнга [4], Э. П. Сэйджа и Дж. Л. Мелсы [5, 6], среди российских авторов – Я. З. Цыпкина [7], Н. С. Райбмана [8], Ш. Е. Штейнберга [9] и др.

Р. Беард разработал схему обнаружения дефектов на основе наблюдателей [10]. Джонс продолжил данные исследования и разработал фильтр обнаружения дефектов Беарда – Джонса (Beard-Jones Fault Detection Filter) [11]. В 1980-е и начале 1990-х гг. были разработаны основные подходы к количественной диагностике: подход, основанный на наблюдателях, метод оценки параметров и т. д. Некоторые важные работы в этом направлении: Франк [12], Исерманн [13], Басвиль и Никифоров [14]. Разработанные методики хорошо теоретически обоснованы и являются классическими методиками диагностики. Они основаны на аналитической избыточности, которая представляет собой модель, описывающую диагностируемую техническую систему. По диагностике приводов роботов опубликованы статьи и монографии [15–26], где рассмотрены подходы как на базе параметрического подхода, так и на непрерывных и дискретных моделях приводов в пространстве состояний. Работки в области дискретного управления, прежде всего, опираются на теорию автоматического управления. Здесь необходимо отметить научные исследования А. М. Ляпунова, Г. В. Щипанова, И. Н. Вознесенского, Е. П. Попова, В. В. Солодовникова, Е. С. Пятницкого и др.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для приводов постоянного тока, которые широко используются в приводах роботов, приведены уравнения управления для непрерывных нелинейных систем в пространстве состояний:

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad (1)$$

$$y = Cx, \quad (2)$$

где A – матрица состояния; B – матрица управления; C – матрица измерения; x – вектор состояния.

Классическая модель двигателя постоянного тока (ДПТ) с постоянными параметрами не соответствует реальности во всем рабочем диапазоне, поэтому была добавлена нелинейность, связанная с вязким трением.

Для модели привода на базе ДПТ известны следующие дифференциальные уравнения первого порядка:

$$u_{\text{я}} = R_{\text{я}} \left(T_{\text{я}} \frac{di_{\text{я}}}{dt} + i_{\text{я}} \right) + e_{\text{я}}, \quad (3)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = M - k_{\text{в-тр}} \omega - M_{\text{н}}, \quad (4)$$

$$\omega = \frac{d\theta}{dt}, \quad (5)$$

$$e_{\text{я}} = k_{\text{Е}} \omega, \quad M = k_{\text{М}} i_{\text{я}}, \quad (6)$$

$$T_{\text{я}} = \frac{L_{\text{я}}}{R_{\text{я}}}, \quad (7)$$

где $u_{\text{я}}, i_{\text{я}}, e_{\text{я}}$ – напряжение, ток и противо-ЭДС якоря ДПТ; $L_{\text{я}}, R_{\text{я}}, T_{\text{я}}$ – индуктивность, сопротивление и электромагнитная постоянная времени якоря ДПТ; $\omega, M, M_{\text{н}}, \theta$ – угловая скорость, электромагнитный момент ДПТ, момент нагрузки и угол поворота вала ДПТ; J – момент инерции ротора ДПТ и нагрузки; $k_{\text{Е}}, k_{\text{М}}$ – коэффициенты, которые являются конструктивными постоянными двигателя; $k_{\text{в-тр}}$ – коэффициент вязкого трения ДПТ.

Далее уравнение (3) для непрерывных нелинейных систем записано в форме Коши

$$L_{\text{я}} \frac{di_{\text{я}}}{dt} = -R_{\text{я}} i_{\text{я}} - k_{\text{Е}} \omega + U_{\text{я}} \quad (8)$$

Для идентификации модели ДПТ используется пара уравнений (8) и (4) в пространстве состояний, на базе которых строится векторно-матричная модель. В качестве вектора управления задается скалярная величина, напряжение питания привода U .

В общем виде, когда хотя бы одна из матриц A, B, C зависима от времени, задача является нелинейной и имеет только частные решения.

Для нахождения уравнения в пространстве состояний представим уравнения (1, 2) в дискретном виде, причем время дискретизации T стремится к нулю, а траектория движения на каждом дискретном участке линейна.

Запишем решение для нелинейной задачи в дискретном виде, когда матрицы A, B, C постоянны в моменты времени $k, k = 0, 1, 2, 3, \dots$

$$\frac{\mathbf{x}_{k+1} - \mathbf{x}_k}{T} = \mathbf{A}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{B}_k \mathbf{u}_k, \quad (9)$$

или

$$\mathbf{x}_{k+1} = \tilde{\mathbf{A}}_k \mathbf{x}_k + \tilde{\mathbf{B}}_k \mathbf{u}_k, \quad (10)$$

где $\tilde{\mathbf{A}}_k = \mathbf{T}\mathbf{A} + \mathbf{E}, \tilde{\mathbf{B}}_k = \mathbf{T}\mathbf{B}_k$.

Данное уравнение (10) связывает переход системы из состояния \mathbf{x}_k в состояние \mathbf{x}_{k+1} . На участке T примем значения матриц A_k, B_k, C_k постоянными. Для удобства в последующих записях уберем знак «волнистая черта».

Будем считать, что матрица $C^{-1} = C_k^{-1}$ на каждом шаге k не изменяется, определяется информационно-измерительной системой, может быть представлена как

$$C^{-1} = \mathbf{E} + \xi_n, \quad (11)$$

где $\xi_n = [\xi_1 \ \xi_2 \ \dots \ \xi_n]^T$ – случайный вектор, отображающий случайный характер измерений информационно-измерительной системой, входящей в состав приводов.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ ПРИВОДОВ РОБОТОВ

Рассмотрим вопрос идентификации модели приводов роботов с точки зрения анализа выражения (10), где на каждом шаге линеаризации критерием идентифицируемости и наблюдаемости является ранг расширенной матрицы.

$$\text{rank} [C_k^T \ A_k^T C_k^T \ (A_k^T)^2 C_k^T \ \dots \ (A_k^T)^{n-1} C_k^T] = n \quad (12)$$

Матрица C_k^T полностью определяется информационно-измерительной системой, т. е. относительной ошибкой измерения или классом точности. Запишем модель информационно-измерительной системы в матричной форме в виде (2):

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1+h_1\xi_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1+h_2\xi_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1+h_n\xi_n \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{bmatrix}, \quad (13)$$

где h_i – относительная ошибка измерения; ξ_i – реализация нормально распределенной случайной величины со средним квадратическим отклонением $\sigma_i = \frac{h_i}{3}, i = \overline{1, n}$.

Тогда для максимальных ошибок в меньшую сторону в наихудшем случае для всех измерительных каналов, учитывая непрерывный и бесконечный характер реализации нормально распределенной случайной величины, предполагающей, что большинство значений входят в интервал $-3\sigma_i \leq \xi_i \leq 3\sigma_i, i = \overline{1, n}$, можем записать

$$C_n = \begin{bmatrix} 1-h_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1-h_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1-h_n \end{bmatrix}. \quad (14)$$

В нашем случае каналы измерения независимы и определитель матрицы C будет равен

$$\det C_n^T = (1-h_1)(1-h_2)\dots(1-h_n). \quad (15)$$

Раскроем скобки в (15), исключим члены второго и большего порядка малости, получим

$$\det C_n^T = 1 - h_1 - h_2 - \dots - h_n = 1 - \sum_{i=1}^n h_i. \quad (16)$$

Если относительная точность по всем измерительным каналам одинакова, $h_i = h, i = \overline{1, n}$, то из (16) получим

$$\det C_n^T = 1 - nh. \quad (17)$$

Аналогично для максимальных ошибок в большую сторону в наихудшем случае для всех измерительных каналов можем записать

$$\det C_n^T = 1 + h_1 + h_2 + \dots + h_n = 1 + \sum_{i=1}^n h_i. \quad (18)$$

$$\det C_n^T = 1 + nh. \quad (19)$$

Значение определителя в (19) всегда больше единицы, так как величина относительной точности всегда положительна, $h_i > 0, i = \overline{1, n}$.

Таким образом, условие идентифицируемости модели приводов роботов в случае

$$\det C_k^T(n)^i > 0, i = \overline{1, n}. \quad (20)$$

будет условием

$$\det C_n^T = 1 - \sum_{i=1}^n h_i > 0 \quad (21)$$

или

$$\sum_{i=1}^n h_i < 1. \quad (22)$$

Учитывая, что во многих практических задачах управления размерности задач не превышают десяти, а относительная точность измерения равна единицам процентов, можно сделать вывод о влиянии на идентифицируемость модели приводов роботов только матрицы состояния

$$A_k^T, k = \overline{1, n}, \quad (23)$$

которая и будет в конечном итоге определять ранг матрицы (12).

Предлагается для практических задач определять идентифицируемость модели приводов в виде

$$\min \det A_k^T(n)^n \det C_k^T(n) > \gamma, \quad (24)$$

где k – номер шага в нелинейной модели; n – размерность модели; γ – критерий идентифицируемости, выбираемый путем моделирования матрицы состояния для случаев выхода параметров матрицы A из пространства реализуемых значений исправного объекта.

ДИАГНОСТИКА ПРИВодОВ РОБОТОВ НА БАЗЕ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПО КРИТЕРИЮ ИДЕНТИФИЦИРУЕМОСТИ МОДЕЛИ ПРИВодОВ

Рассмотрим диагностику приводов на базе ДПТ в пространстве состояний. Так как регулятор привода должен обеспечивать регулирование по моменту и скорости вращения, то в качестве обобщенных координат выбраны ток якоря I , частота вращения якоря ω . Управлением являются напряжение на якоре U , возмущением – момент сопротивления нагрузки M_H . Параметрами модели являются активное сопротивление и индуктив-

ность цепи и якоря, обозначенные, соответственно, R и L , а также приведенный момент инерции J и конструктивные постоянные k_E и k_M . Разрешив исходную систему относительно первых производных, получено уравнение ДПТ в пространстве состояний.

Запишем векторно-матричную модель ДПТ в виде (1, 2):

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{I} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{k_E}{L} \\ \frac{k_M}{J} & -\frac{k_{в_тр}\omega + M_H}{J\omega} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ L \\ 0 \end{bmatrix} u, \quad (25)$$

$$y = \begin{bmatrix} I \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} x, \quad (26)$$

Запишем векторно-матричную модель ДПТ в виде (10):

$$x(k+1) = \begin{bmatrix} 1-T\frac{R}{L} & -T\frac{k_E}{L} \\ T\frac{k_M}{J} & 1-T\frac{k_{в_тр}\omega + M_H(k)}{J\omega(k)} \end{bmatrix} \times \\ \times \begin{bmatrix} I(k) \\ \omega(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ L \\ 0 \end{bmatrix} u(k), \quad (27)$$

$$y(k) = \begin{bmatrix} \hat{I}(k) \\ \hat{\omega}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1+h\xi & 0 \\ 0 & 1+h\xi \end{bmatrix} x(k), \quad (28)$$

где $M_H(k) = (\omega(k+1) - \hat{\omega}(k)) \frac{J}{T}$; $\hat{I}(k), \hat{\omega}(k)$ – измеренное значение тока и угловой скорости; $\omega(k+1)$ – запланированное значение угловой скорости.

Вычислим момент нагрузки в определителе матрицы A для равенства

$$\det A = \begin{bmatrix} 1-T\frac{R}{L} & -T\frac{k_E}{L} \\ T\frac{k_M}{J} & 1-T\frac{k_{в_тр}\omega + M_H(k)}{J\omega(k)} \end{bmatrix} = 0 \quad (29)$$

Равенство нулю матрицы A приводит (24) к неидентифицируемости модели привода робота в пространстве состояний.

$$\text{Выражение } M_H(k) = (\omega(k+1) - \hat{\omega}(k)) \frac{J}{T}$$

дает соотношение между механическими параметрами ДПТ, позволяет определять интервал изменения величин без потери идентифицируемости. Кроме того, требуется учи-

тывать ограничения по максимальным значениям скорости вращения, электрическому току и напряжению для данного привода.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ИДНТИФИЦИРУЕМОСТИ МОДЕЛИ ДПТ В ДИСКРЕТНОЙ ФОРМЕ

Схема модели ДПТ для расчета определителя матрицы состояния A построена в программном комплексе «Среда динамического моделирования технических систем SimInTech» (№ 2379 в Едином реестре российских программ), разработанном ООО «ЗВ Сервис» [27].

Исследовано влияние изменения скорости вращения ДПТ на определитель матрицы состояния A . Анализ зависимости определителя матрицы состояния A от величины требуемой угловой скорости $\omega(k+1)$ в следующий момент времени показывает, что данный определитель равен нулю при угловой скорости $\omega(k+1) = 320$ рад/с, т. е. в 2 раза больше номинальной угловой скорости 160 рад/с. В табл. 1 приведено значение $\omega(k+1)$, рад/с, при котором определитель матрицы равен 0 при разных интервалах дискретизации T .

Анализ величины требуемой угловой скорости $\omega(k+1)$ от предыдущего значения угловой скорости $\omega(k)$ показывает, что максимальное значение требуемой угловой ско-

рости $\omega(k+1)$ может быть только в 2 раза больше предыдущего значения угловой скорости $\omega(k)$ при $T = 0.001$.

Таблица 1

Значение угловой скорости, при котором определитель матрицы равен 0 при разных интервалах дискретизации T

Значение времени дискретизации T , с	Значение угловой скорости $\omega(k+1)$, рад/с
0.001	320
0.003	322
0.005	327
0.007	340
0.010	378
0.011	401
0.012	437
0.013	490
0.014	586
0.015	780

На рис. 1 показана зависимость определителя матрицы состояния A от времени дискретизации T .

При времени дискретизации $T = 0.01$ с максимальная угловая скорость ДПТ $\omega_{1\max} = 378$ рад/с. Для данной угловой скорости ДПТ электрический ток через обмотку якоря имеет значение $I = 73$ А. С учетом максимального допустимого электрического тока через обмотку якоря 20 А получается максимальная угловая скорость $\omega_{1\max} = 215$ рад/с, если предыдущее значение угловой скорости $\omega(k) = 160$ рад/с.

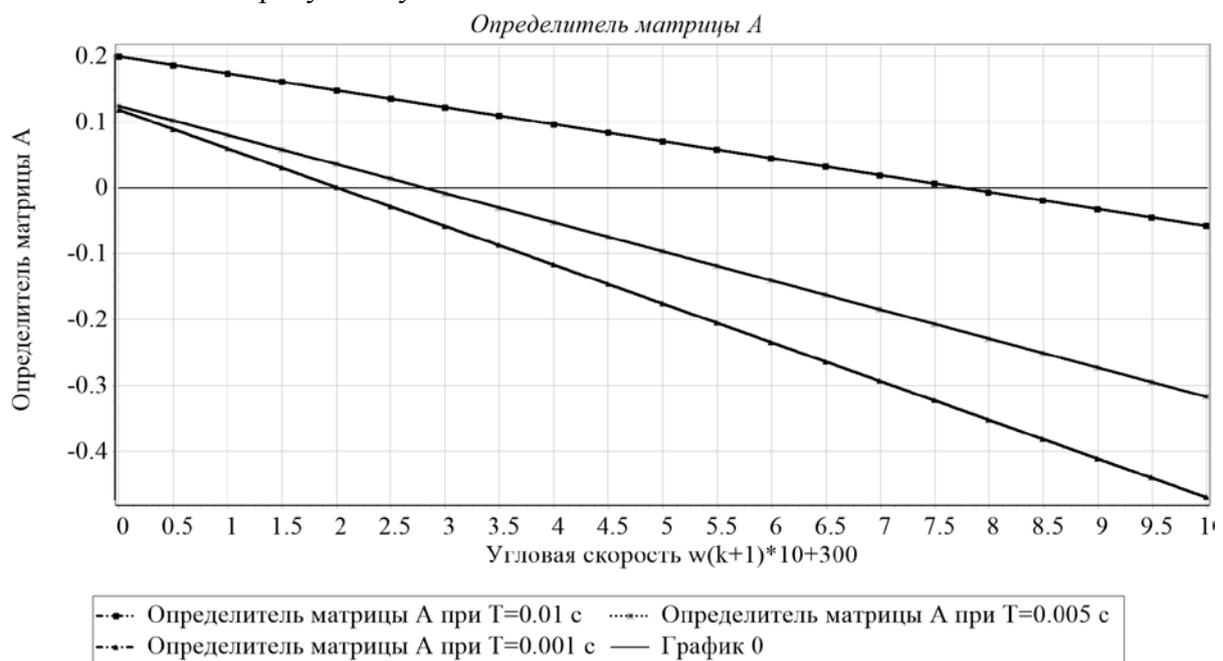


Рис. 1. Зависимость определителя матрицы состояния A от времени дискретизации T

При времени дискретизации $T = 0.005$ с максимальная угловая скорость ДПТ $\omega_{1\max} = 327$ рад/с. Для данной угловой скорости ДПТ электрический ток через обмотку якоря имеет значение $I = 111$ А. С учетом максимального допустимого электрического тока через обмотку якоря 20 А получается максимальная угловая скорость $\omega_{1\max} = 187$ рад/с, если предыдущее значение угловой скорости $\omega(k) = 160$ рад/с.

При времени дискретизации $T = 0.001$ с максимальная угловая скорость ДПТ $\omega_{1\max} = 320$ рад/с. Для данной угловой скорости ДПТ электрический ток через обмотку якоря имеет значение $I = 524$ А. С учетом максимального допустимого электрического тока через обмотку якоря 20 А получается максимальная угловая скорость $\omega_{1\max} = 165$ рад/с. При такой частоте дискретизации $T = 0.001$ с возможно увеличение угловой скорости ДПТ только на 5 рад/с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время ввиду того, что почти все задачи практики по управлению приводами роботов не могут быть точно представлены линейными моделями, а решение нелинейных моделей в общем случае отсутствует, важной является разработка алгоритмов управления на основе дискретных моделей. Дискретные модели нелинейных систем предполагают переменные матрицы состояния, управления и измерения, определяющие бесконечное множество вариантов этой модели. Поэтому необходим некоторый инструмент вычисления степени адекватности математических моделей и реальных объектов.

В данной работе представлен алгоритм идентификации нелинейных сложных объектов на основе дискретной цифровой модели управления. В качестве критерия оптимальности алгоритма идентификации выбран критерий принятия решений в сочетании с критерием идентифицируемости для алгоритма управления. Критерии идентифицируемости позволяют либо по модели измерительной матрицы, либо по совокупности моделей матрицы состояния и измерительной матрицы определить степень ответственности моделей объекту управления.

Получена область допустимых значений угловых скоростей в зависимости от времени дискретизации, при ограничениях по допустимому электрическому току.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Eykhoff P.** System Identification: Parameter and State Estimation. Wiley-Interscience, New York, 1974. 555 p. [P. Eykhoff, *System Identification: Parameter and State Estimation*. Wiley-Interscience, New York, 1974.]
2. **Eykhoff P.** Trends and progress in system identification. Oxford, England: Pergamon, 1981. 402 p. [P. Eykhoff, *Trends and progress in system identification*. Oxford, England: Pergamon, 1981.]
3. **Graupe D.** Identification of system. New York: R. E. Krieger Publishing Company, 1976. 302 p. [D. Graupe, *Identification of system*. New York: R. E. Krieger Publishing Company, 1976.]
4. **Ljung L.** System identification. Theory for the user. 2nd ed. PTR Prentice Hall, Upper Saddle River, 1999. 609 p. [L. Ljung, *System identification. Theory for the user. 2nd ed.* PTR Prentice Hall, Upper Saddle River, 1999.]
5. **Sage A. and Melsa J.** System identification. New York: Academic press, 1971. 221 p. [A. Sage and J. Melsa, *System identification*. New York: Academic press, 1971.]
6. **Sage A. and Melsa J.** Estimation Theory with Applications to Communications and Control. New York: McGraw-Hill, 1971. 496 p. [A. Sage and J. Melsa, *Estimation Theory with Applications to Communications and Control*. New York: McGraw-Hill, 1971.]
7. **Цыпкин Я. З.** Основы информационной теории идентификации. М.: Наука, 1984. 320 с. [Ja. Z. Cypkin, *Fundamentals of identification information theory*, (in Russian). Moscow: Nauka, 1984.]
8. **Райбман Н. С.** Что такое идентификация? М.: Наука, 1970. 118 с. [N. S. Rajbman, *What is identification?*, (in Russian). Moscow: Nauka, 1970.]
9. **Штейнберг Ш. Е.** Идентификация в системах управления. М.: Энергоатомиздат, 1987. 80 с. [Sh. E. Shtejnberg, *Identification in control systems*, (in Russian). Moscow: Energoatomizdat, 1987.]
10. **Beard R. V.** Failure accommodation in linear system through selfreorganization (PhD thesis). MIT, Massachusetts, USA, 1971. 376 p. [R. V. Beard, *Failure accommodation in linear system through selfreorganization (PhD thesis)*. MIT, Massachusetts, USA, 1971.]
11. **Jones H. L.** Failure detection in linear systems (PhD thesis). MIT, Massachusetts, USA, 1973. 459 p. [H. L. Jones, *Failure detection in linear systems (PhD thesis)*. MIT, Massachusetts, USA, 1973.]
12. **Frank P. M.** Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy: a survey and some new results // Automatica. 1990. Vol. 26, issue 3. Pp. 459-474. [P. M. Frank, "Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy: a survey and some new results", in *Automatica*, vol. 26, issue 3, pp. 459-474, 1990.]
13. **Isermann R.** Fault-Diagnosis Systems: An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance. Berlin; New York, Springer, 2006. 475 p. [R. Isermann, *Fault-Diagnosis Systems*:

An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance. Berlin; New York, Springer, 2006.]

14. **Basseville M., Nikiforov I. V.** Detection of Abrupt Changes: Theory and Application. Prentice Hall information and system sciences series. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 1993. 447 p. [M. Basseville, I. V. Nikiforov, *Detection of Abrupt Changes: Theory and Application*. Prentice Hall information and system sciences series. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 1993.]

15. **Ding S. X.** Model-based Fault Diagnosis Techniques. Design Schemes, Algorithms, and Tools. Springer, 2008. 473 p. [S. X. Ding, *Model-based Fault Diagnosis Techniques*. Design Schemes, Algorithms, and Tools. Springer, 2008.]

16. **Costa B. S. J.** Fuzzy Fault Detection and Diagnosis. In Handbook on Computational Intelligence. In 2 Volumes. Volume 1: Fuzzy Logic, Systems, Artificial Neural Networks, and Learning Systems, 2016. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., pp. 251-288. [B. S. J. Costa, *Fuzzy Fault Detection and Diagnosis*. In Handbook on Computational Intelligence. In 2 Volumes. Volume 1: Fuzzy Logic, Systems, Artificial Neural Networks, and Learning Systems, 2016. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., pp. 251-288.]

17. **Luo H.** Plug-and-Play Monitoring and Performance Optimization for Industrial Automation Processes. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2017. 158 p. [H. Luo, *Plug-and-Play Monitoring and Performance Optimization for Industrial Automation Processes*. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2017.]

18. **Trefilov S., Nikitin Y.** Automatic warehouses with transport robots of increased reliability // *ActaLogistica*. 2018. Vol. 5, no. 3. Pp. 19-23. [S. Trefilov, Y. Nikitin, "Automatic warehouses with transport robots of increased reliability", in *ActaLogistica*, vol. 5, no. 3, pp. 19-23, 2018.]

19. **Design** of nonlinear robust diagnostic observers / A. N. Zhirabok, et. al. // *Autom. Remote Control*. 2017. No. 78:9. Pp. 1572-1584. [A. N. Zhirabok, et. al., "Design of nonlinear robust diagnostic observers", in *Autom. Remote Control*, no. 78:9, pp. 1572-1584, 2017.]

20. **Жи́рабок А. Н., Шумский А. Е.** Непараметрический метод диагностирования нелинейных динамических систем // *Автоматика и телемеханика*. 2019. № 2. С. 24–45. [A. N. Zhirabok, A. E. Shumsky, "Nonparametric method for diagnosing nonlinear dynamical systems", (in Russian), in *Avtomatika i telemekhanika*, no. 2, pp. 24-45, 2019.]

21. **Метод** построения нелинейных робастных диагностических наблюдателей / А. Н. Жи́рабок и др. // *Автоматика и телемеханика*. 2017. № 9. С. 34–48. [A. N. Zhirabok, et. al., "Method for constructing nonlinear robust diagnostic observers", (in Russian), in *Avtomatika i telemekhanika*, no. 9, pp. 34-48, 2017.]

22. **Степанов П. И., Лагуткин С. В., Никитин Ю. Р.** Комплексная токовая и вибродиагностика электромеханических систем // *Интеллектуальные системы в производстве*. 2013. № 2. С. 160–165. [P. I. Stepanov, S. V. Lagutkin, Yu. R. Nikitin, "Integrated current and vibration diagnostics of electromechanical systems", (in Russian), in *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, no. 2, pp. 160-165, 2013.]

23. **Степанов П. И., Лагуткин С. В., Никитин Ю. Р.** Механические и электрические диагностические параметры электрических приводов // *Интеллектуальные системы в производстве*. 2014. № 2 (24). С. 59–63. [P. I. Stepanov, S. V. Lagutkin, Yu. R. Nikitin, "Mechanical and electrical diag-

nostic parameters of electric drives", (in Russian), in *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, no. 2 (24), pp. 59-63, 2014.]

24. **Диагностирование** приводов мобильных роботов на базе модели двигателя постоянного тока / Ю. Р. Никитин и др. // *Интеллектуальные системы в производстве*. 2018. Т. 16, № 4. С. 114–121. [Yu. R. Nikitin, et. al., "Diagnosing drives of mobile robots based on a DC motor model", (in Russian), in *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, vol. 16, no. 4, pp. 114-121, 2018.]

25. **Никитин Ю. Р., Трефилов С. А., Никитин Е. В.** Идентифицируемость модели привода мехатронного устройства на базе двигателя постоянного тока по измерительной матрице // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2019. № 4-1 (336). С. 114–122. [Yu. R. Nikitin, S. A. Trefilov, E. V. Nikitin, "Identifiability of a mechatronic device drive model based on a DC motor in a measuring matrix", (in Russian), in *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii*, no. 4-1 (336), pp. 114-122, 2019.]

26. **Trefilov S. A., Nikitin Yu. R.** Robot drives diagnostics by identifiability criterion based on state matrix // *Instrumentation Engineering, Electronics and Telecommunications - 2019: Proceedings of the V International Forum (Izhevsk, Russia, November 20-22, 2019)*. Izhevsk: Publishing House of Kalashnikov ISTU, 2019. P. 105–114. [S. A. Trefilov, Yu. R. Nikitin, "Robot drives diagnostics by identifiability criterion based on state matrix", in *Instrumentation Engineering, Electronics and Telecommunications - 2019: Proceedings of the V International Forum*, 2019, pp. 105-114.]

27. **Программный** комплекс «Среда динамического моделирования технических систем SimInTech». [Электронный ресурс]. URL: <http://simintech.ru/> (дата обращения 20.11.2019). [Software package (2019, Nov. 20). "Environment of dynamic modeling of technical systems SimInTech" [Online]. Available: <http://simintech.ru/>]

ОБ АВТОРАХ

ТРЕФИЛОВ Сергей Александрович, доцент кафедры «Мехатронные системы». Дипл. по специальности «Инженер-конструктор радиоаппаратуры» (Ижевский механический ин-т, 1977). Канд. техн. наук (Ижевский гос. техн. ун-т, 1995). Иссл. в обл. систем управления, диагностики, мехатроники, робототехники.

НИКИТИН Юрий Рафаилович, доцент кафедры «Мехатронные системы». Дипл. инженер-системотехник по специальности «ЭВМ» (Ижевский механический ин-т, 1988). Канд. техн. наук (Ижевский гос. техн. ун-т, 1994). Иссл. в обл. диагностики, систем управления, мехатроники, робототехники.

METADATA

Title: Diagnostics of robot drives based on a DC motor by the criterion of identifiability of a nonlinear discrete model in the state space.

Authors: S. A. Trefilov¹, Yu. R. Nikitin²

Affiliation:

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Russia.

Email: ¹trefilov376908@gmail.com, ²nikitin@istu.ru

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 24, no. 1 (87), pp. 103-110, 2020. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The criteria of observability, controllability and identifiability of drives as a function of the rank of the extended state matrix with the measurement matrix, in which the relative errors of the information-measuring system are analytically taken into account, are considered. An algorithm for calculating the criterion of identifiability of a nonlinear control system in a discrete version is proposed. It is offered to use identification from the point of view of conformity of mathematical model to results of operation of object. At each step, the determinant of the expanded matrix is calculated, which is compared with some constant that numerically divides the space of the state matrices. The obtained research results can be used to build diagnostic systems for robot drives.

Key words: diagnostics; identification; robot drives; state space; nonlinear discrete model.

About authors:

TREFILOV, Sergey Alexandrovich, associate Professor of the Department "Mechatronic systems". Dipl. specialty "Engineer-designer of radio equipment" (Izhevsk Mechanical Institute, 1977). PhD (Izhevsk State Technical University, 1995).

NIKITIN, Yuriy Rafailovich, associate Professor of the Department "Mechatronic systems". Dipl. system engineer in the specialty "computer" (Izhevsk Mechanical Institute, 1988). PhD (Izhevsk State Technical University, 1994).