

УДК 681.5.075

DOI: 10.22213/2413-1172-2020-4-52-59

Влияние параметров шагового двигателя на критерий идентифицируемости для нелинейной дискретной модели в пространстве состояний*

Ю. Р. Никитин, кандидат технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

П. В. Лекомцев, кандидат технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

С. А. Трефилов, кандидат технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

Рассматривается влияние таких параметров шагового двигателя, как сопротивление и индуктивность фазы, момент инерции на критерий идентифицируемости модели привода. Для исследования влияния данных параметров использована нелинейная дискретная модель шагового двигателя в пространстве состояний.

Предложена матрица измерения с учетом приведенной погрешности измерения. Получен определитель матрицы измерения при максимальных ошибках в меньшую и большую сторону в наихудшем случае. Сделан вывод о влиянии на идентифицируемость только матрицы состояния шагового двигателя, которая и будет в итоге определять ранг расширенной матрицы. Определен критерий потери идентифицируемости модели как минимальное пороговое значение определителя расширенной матрицы состояния для случаев выхода таких параметров, как сопротивление и индуктивность обмотки, момент инерции, из пространства реализуемых значений исправного шагового двигателя.

Разработана имитационная модель шагового двигателя в отечественном программном продукте для моделирования технических систем SimInTech для расчета минимального определителя расширенной матрицы состояния. При уменьшении сопротивления обмотки до 0,28 Ом теряется идентифицируемость модели шагового двигателя. Причиной этого может быть межвитковое замыкание в обмотке шагового двигателя. При увеличении индуктивности обмотки до 0,0002 Гн также теряется идентифицируемость модели шагового двигателя. Изменение момента инерции шагового двигателя в широком диапазоне практически не приводит к потере идентифицируемости модели.

На основе анализа изменения минимального определителя расширенной матрицы состояния, критерия идентифицируемости модели шагового двигателя возможно решение задачи диагностирования на этапах производства, эксплуатации и ремонта.

Ключевые слова: шаговый двигатель, дискретная модель, идентифицируемость, пространство состояний, диагностика.

Введение

В связи с появлением относительно недорогих цифровых сигнальных контроллеров, позволяющих существенно улучшить управление шаговыми двигателями (ШД), появилась возможность их широкого применения в промышленности в качестве безредукторных приводов. Широта применения ШД накладывает жесткие условия по надежности приводов на их основе, что приводит к дополнительным расходам на обеспечение соответствия модели управления мехатронного привода реальным эксплуатационным параметрам. Надежность управления с точки зрения соответствия моделей управления реальному состоянию объекта может быть определена по параметрам идентифицируемости математической модели управления.

Идентификация моделей ШД является одним из этапов решения задач диагностики в процес-

се их функционирования. Задачей исследования является определение влияния таких параметров ШД, как сопротивление и индуктивность фазы, момент инерции на критерий идентифицируемости модели привода. Для исследования влияния данных параметров разработана нелинейная дискретная модель ШД в пространстве состояний.

Сложность диагностирования заключается в том, что некоторые диагностические параметры имеют сложные закономерности изменения в зависимости от технического состояния и внешних факторов. Например, температура привода может повышаться при его перегрузке или при возникновении короткого замыкания между витками обмотки двигателя. В свою очередь, повышение температуры приводит к повышению сопротивления обмотки, падению мощности и выходу из строя двигателя. По диагностике приводов роботов опубликованы статьи [1–4], где рассмотрены методы на базе не-

прерывных и дискретных моделей приводов в пространстве состояний.

Одним из основоположников идентификации моделей в пространстве состояний был П. Эйкхофф, который выполнил теоретическое обоснование идентификации, разработал алгоритмы и способы идентификации [5, 6]. Продолжили исследования по идентификации динамических систем Д. Гропп [7], Л. Льюнг [8], Э. П. Сэйдж и Дж. Л. Мелса [9, 10], а среди отечественных авторов можно выделить Я. З. Цыпкина [11], Н. С. Райбмана [12], Ш. Е. Штейнберга [13].

Впервые схему определения дефектов приводов на основе наблюдателей разработал R.V. Beard [14]. Данные исследования продолжил

H.L. Jones, который разработал фильтр обнаружения дефектов (Beard - Jones Fault Detection Filter) [15]. На основе исследований в 1980–1990 гг. были разработаны основные подходы к количественной диагностике, основанные на наблюдениях. Можно выделить основные работы в этом направлении, выполненные Р. М. Frank [16], R. Isermann [17], М. Basseville, I. V. Nikiforov [18]. В работах [19, 20] рассматривается диагностика приводов на базе модельного подхода.

Идентификация модели шагового двигателя в пространстве состояний

Идентификация модели ШД выполняется на основе ранее разработанной дискретной модели в пространстве состояний:

$$\mathbf{x}(k+1) = \begin{bmatrix} i_d(k+1) \\ i_q(k+1) \\ \omega(k+1) \\ \theta(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - T \frac{R}{L} & T p \omega(k) & 0 & 0 \\ -T p \omega & 1 - T \frac{R}{L} & -T \frac{K_m}{L} & 0 \\ 0 & T \frac{K_m}{J} & 1 - T \frac{F}{J} - T \frac{M_L(k)}{J \omega(k)} & -T \frac{M_{dm} \sin(2p\theta(k))}{J \theta(k)} \\ 0 & 0 & T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d(k) \\ i_q(k) \\ \omega(k) \\ \theta(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T & 0 \\ 0 & T \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d(k) \\ u_q(k) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $\mathbf{x}(k+1)$ – вектор состояния в момент времени $(k+1)$; $i_d(k+1), i_q(k+1), \omega(k+1), \theta(k+1)$ – значения электрических токов, угловой скорости и перемещения в момент времени $(k+1)$ соответственно; T – время дискретизации; R – сопротивление обмотки статора; L – индуктивность обмотки статора; p – число пар полюсов; $i_d(k), i_q(k), \omega(k), \theta(k)$ – значения электрических токов, угловой скорости и перемещения в момент времени k соответственно; K_m – моментная конструктивная постоянная; J – приведенный момент инерции; F – коэффициент вязкого трения; $M_L(k)$ – момент механической нагрузки на валу; M_{dm} – тормозящий момент; $u_d(k), u_q(k)$ – проекции напряжения на оси вращающейся системы координат dq в момент времени k .

Идентифицируемость определяется рангом расширенной матрицы измерения и состояния. Необходимое и достаточное условие полной идентифицируемости модели

$$\text{rank} \left[\mathbf{C}_k^T \mathbf{A}_k^T (\mathbf{A}_k^T)^2 \mathbf{C}_k^T \dots (\mathbf{A}_k^T)^{n-1} \mathbf{C}_k^T \right] \quad (2)$$

для классического представления модели в пространстве состояний

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u, \quad (3)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}u, \quad (4)$$

где \mathbf{A} – матрица состояния; \mathbf{B} – матрица управления; \mathbf{C} – матрица измерения; \mathbf{D} – матрица прямой связи; \mathbf{x} – вектор состояния; \mathbf{y} – вектор выхода.

Матрица измерения \mathbf{C} определяется приведенной погрешностью измерения (классом точности датчиков). Для модели информационно-измерительной системы ШД в наихудшем случае с точки зрения потери ранга можем записать

$$\mathbf{C}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 + \xi_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 + \xi_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1 + \xi_n \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где $\xi_n = [\xi_1 \ \xi_2 \ \dots \ \xi_n]^T$ – вектор, отображающий случайный характер измерений информационно-измерительной системы; ξ_i – реализация нормально распределенной случайной величины со среднеквадратическим 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 приблизительно записать

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

В нашем случае каналы измерения независимы, и определитель матрицы C

$$\det C_n^T = (1-h_1)(1-h_2)\dots(1-h_n). \quad (6)$$

Раскроем скобки в (6), исключим члены второго и большего порядка малости, получим

$$\det C_n^T = 1 - h_1 - h_2 - \dots - h_n = 1 - \sum_{i=1}^n h_i. \quad (7)$$

Если относительная точность по всем измерительным каналам одинакова, $h_i = h$, $i = \overline{1, n}$, то из (7) получим

$$\det C_n^T = 1 - nh.$$

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

$$\det C_n^T = 1 + h_1 + h_2 + \dots + h_n = 1 + \sum_{i=1}^n h_i. \quad (8)$$

$$\det C_n^T = 1 + nh. \quad (9)$$

Значение определителя в (8) и (9) всегда больше единицы, так как величина относительной точности всегда положительна:

$$h_i > 0, \quad i = \overline{1, n}.$$

Таким образом, условие идентифицируемости модели (2) в случае

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

будет условием

$$\det C_n^T = 1 - \sum_{i=1}^n h_i > 0,$$

или

$$\sum_{i=1}^n h_i < 1. \quad (10)$$

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 только матрицы состояния

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

которая и будет в итоге определять ранг матрицы (2).

Предлагается для практических задач определять идентифицируемость в виде

$$\min(\det A_k^T(n)^i \det C_k^T(n)) > \gamma, \quad (11)$$

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

Можно предположить, что потеря ранга будет наблюдаться для той части расширенной матрицы состояния, для которой определитель расширенной матрицы будет стремиться к нулю. Для модели (1) с размерностью $n = 4$ расширенная матрица состояния ШД состоит из 4 строк и 12 столбцов, соответствующих матрицам A , A^2 , A^3 . Таким образом, можно выделить 9 определителей расширенной матрицы состояния.

Моделирование ШД проводилось при условии отсутствия погрешностей измерений, которые зависят от класса точности датчиков. Выполнено моделирование ШД в отечественном программном продукте SimInTech, включающем в себя пакет инструментально-технологических программ, позволяющих разработать систему диагностики привода в процессе его эксплуатации в виде единого проекта.

В качестве объекта исследования выбран современный гибридный шаговый двигатель FL86ST94-4506A, областью применения кото-

рого является насосное оборудование, конвейеры, небольшие станки с ЧПУ и др.

Параметры ШД FL86ST94-4506A:

- сопротивление обмотки статора $R = 0,4 \text{ Ом}$;
- индуктивность обмотки статора $L = 0,0014 \text{ Гн}$;
- момент инерции $J = 0,000056 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$;
- коэффициент вязкого трения $F = 0,00047 \text{ м}^2/\text{с}$;
- число пар полюсов $p = 50$;
- вращающий момент $M = 1,3 \text{ Н} \cdot \text{м}$;
- тормозящий момент $M_{dm} = 0,24 \text{ Н} \cdot \text{м}$;
- максимальное напряжение ШД $U = 12 \text{ В}$;
- номинальный электрический ток, протекающий через одну фазу, $I = 4,5 \text{ А}$;
- моментная конструктивная постоянная $K_m = M/I = 0,29 \text{ Н} \cdot \text{м}/\text{А}$.

При моделировании задавали угловую скорость вала ШД $\omega = 10 \text{ рад}/\text{с}$, интервал выборки $T = 0,005 \text{ с}$.

В вычислительном эксперименте минимальному значению сопротивления обмотки статора соответствует максимально допустимый элек-

трический ток, протекающий через одну фазу. Максимальному значению сопротивления обмотки статора соответствует максимально допустимая температура двигателя.

На рисунке 1 показана структурная схема модели ШД в пространстве состояний для расчета минимального определителя расширенной матрицы состояния при изменении сопротивления обмотки статора. Выбрано пороговое значение минимального определителя расширенной матрицы состояния, равное 10, при котором теряется идентифицируемость ШД; диапазон изменения сопротивления обмотки статора R от 0,2 до 0,6 Ом.

График минимального определителя расширенной матрицы состояния при изменении сопротивления обмотки ШД показан на рисунке 2. На рисунке 3 приведен график критерия идентифицируемости при изменении сопротивления обмотки с пороговым значением минимального определителя 10.

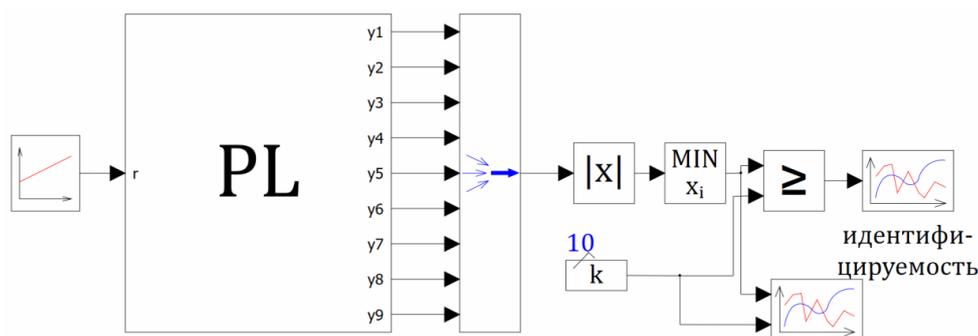


Рис. 1. Структурная схема модели ШД в пространстве состояний для расчета минимального определителя расширенной матрицы состояния при изменении сопротивления обмотки

Fig. 1. Structural scheme of the step motor model by the state space to calculate the minimum definition of the extended state matrix when winding resistance changes

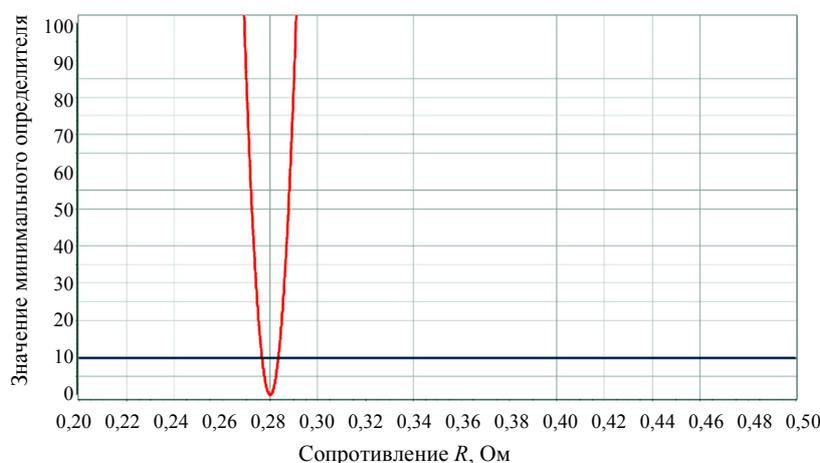


Рис. 2. График минимального определителя расширенной матрицы состояния при изменении сопротивления обмотки ШД

Fig. 2. Graph of the minimum definition of the extended state matrix when the step motor resistance changes

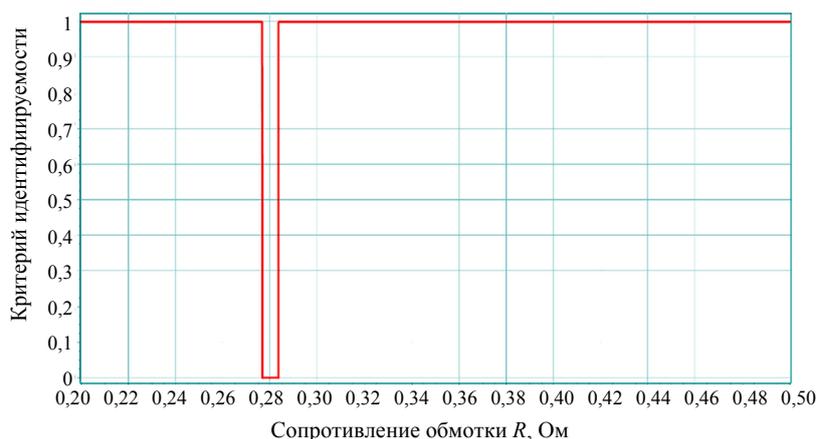


Рис. 3. График критерия идентифицируемости при изменении сопротивления обмотки ШД

Fig. 3. Identity graph when the step motor winding resistance changes

На рисунках 2 и 3 видно, что при уменьшении сопротивления обмотки до 0,28 Ом теряется идентифицируемость модели ШД. Причиной этого может служить межвитковое замыкание в обмотке ШД.

График минимального определителя расширенной матрицы состояния при изменении индуктивности обмотки ШД показан на рисунке 4. На рисунке 5 показан график критерия идентифицируемости ШД при изменении индуктивности обмотки с пороговым значением минимального определителя 10.

На рисунках 4 и 5 видно, что при увеличении индуктивности обмотки до 0,0002 Гн теряется идентифицируемость модели ШД.

График минимального определителя расширенной матрицы состояния при изменении момента инерции ШД показан на рисунке 6.

На рисунке 6 видно, что изменение момента инерции ШД в широком диапазоне практически не приводит к потере идентифицируемости модели.

Анализ расчетов в программном комплексе SimInTech показывает, что при уменьшении сопротивления обмотки до 0,28 Ом теряется идентифицируемость модели ШД. Причиной этого может быть межвитковое замыкание в обмотке ШД. При увеличении индуктивности обмотки до 0,0002 Гн также теряется идентифицируемость модели ШД.

Отсюда можно сделать вывод, что имеются дефекты ШД, которые не позволяют ему нормально функционировать. Изменение момента инерции ШД в широком диапазоне практически не приводит к потере идентифицируемости модели.

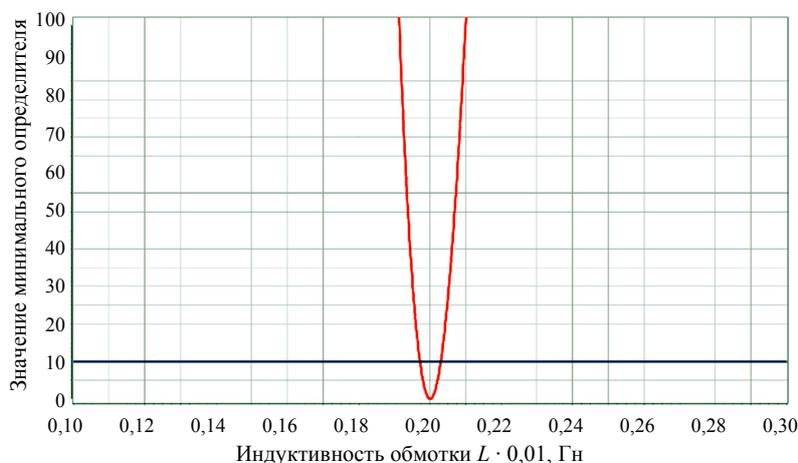


Рис. 4. График минимального определителя расширенной матрицы состояния при изменении индуктивности обмотки ШД

Fig. 4. Graph of the minimum definition of the extended state matrix when the step motor inductance changes

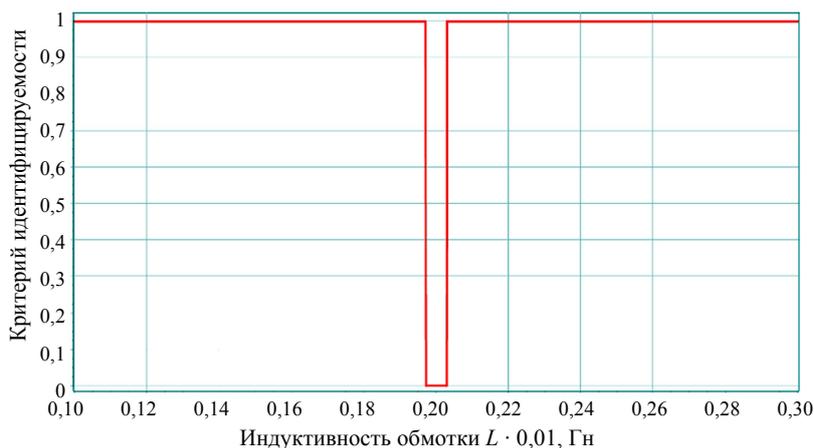


Рис. 5. График критерия идентифицируемости при изменении индуктивности обмотки ШД

Fig. 5. Identity graph when the step motor winding inductance changes

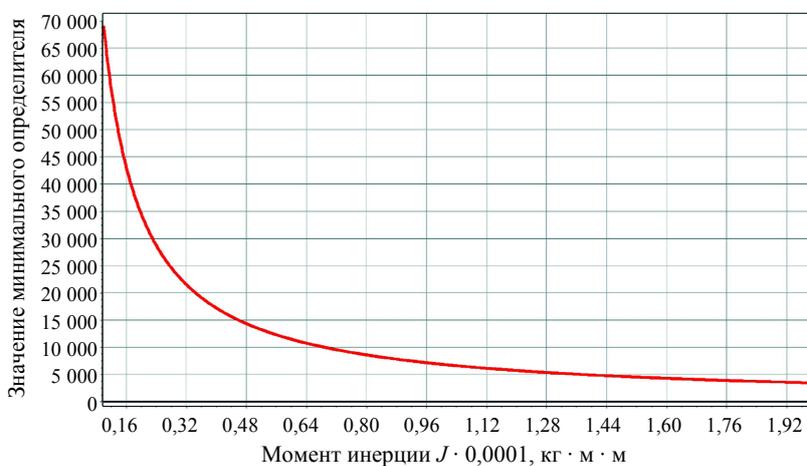


Рис. 6. График минимального определителя расширенной матрицы состояния при изменении момента инерции ШД

Fig. 6. Graph of the minimum state extended matrix determinant when the step motor inertia moment changes

Выводы

На основе проведенных исследований шагового двигателя FL86ST94-4506A получены зависимости потери идентифицируемости при изменении параметров двигателя вследствие дефектов или деградации материалов и элементов. Полученные результаты можно распространить на множество шаговых двигателей и электрических двигателей другого типа при коррекции математической и имитационной моделей.

Библиографические ссылки

1. *Trefilov S.A., Nikitin Yu.R.* Robot drives diagnostics by identifiability criterion based on state matrix. *Instrumentation Engineering, Electronics and Telecommunications - 2019: Procю of the V International Forum (Izhevsk, Russia, November 20-22, 2019)*. Izhevsk, Kalashnikov ISTU Publ., 2019, pp. 105-114.

2. *Никитин Ю. Р., Трефилов С. А.* Разработка системы диагностирования приводов мобильных роботов // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2020. № 4-1 (342). С. 59–68. DOI: 10.33979/2073-7408-2020-342-4-1-59-67.

3. *Лекомцев П. В., Никитин Ю. Р., Трефилов С. А.* Моделирование гибридного шагового двигателя в пространстве состояний при переменном моменте сопротивления нагрузки // *Интеллектуальные системы в производстве*. 2020. Т. 18, № 3. С. 58–63. DOI: 10.22213/2410-9304-2020-3-58-63.

4. *Трефилов С. А., Никитин Ю. Р.* Диагностика приводов роботов на базе двигателя постоянного тока по критерию идентифицируемости нелинейной дискретной модели в пространстве состояний // *Вестник УГАТУ*. 2020. Т. 24, № 1 (87). С. 103–110.

5. *Эйкхофф П.* Основы идентификации систем управления. М. : Мир, 1975. 686 с.

6. *Современные методы идентификации систем / под ред. П. Эйкхоффа.* М. : Мир, 1983. 400 с.

7. Грон Д. Методы идентификации систем. М. : Мир, 1979. 302 с.

8. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя. М. : Наука, 1991. 32 с.

9. Сейдж Э. П., Мелса Дж. Л. Идентификация систем управления. М. : Наука, 1974. 248 с.

10. Сейдж Э. П., Мелса Дж. Л. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении. М. : Связь, 1976. 496 с.

11. Цыпкин Я. З. Основы информационной теории идентификации. М. : Наука, 1984. 320 с.

12. Райбман Н. С. Что такое идентификация? М. : Наука, 1970. 118 с.

13. Штейнберг Ш. Е. Идентификация в системах управления. М. : Энергоатомиздат, 1987. 80 с.

14. Beard R.V. Failure accommodation in linear system through self reorganization (PhD thesis). MIT, Massachusetts, USA, 1971, 376 p.

15. Jones H.L. Failure detection in linear systems (PhD thesis). MIT, Massachusetts, USA, 1973, 459 p.

16. Frank P.M. Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy: a survey and some new results. *Automatica*, vol. 26, no. 3, 1990, pp. 459-474.

17. Isermann R. Fault-Diagnosis Systems: An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance. Berlin; New York, Springer, 2006, 475 p.

18. 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.

19. Ding S.X. Model-based Fault Diagnosis Techniques. Design Schemes, Algorithms, and Tools. Springer, 2008, 473 p. DOI: 10.1007/978-3-540-76304-8.

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

Reference

1. Trefilov S.A., Nikitin Yu.R. Robot drives diagnostics by identifiability criterion based on state matrix. *Instrumentation Engineering, Electronics and Telecommunications - 2019: Proc of the V International Forum (Izhevsk, Russia, November 20-22, 2019)*. Izhevsk, Kalashnikov ISTU Publ., 2019, pp. 105-114.

2. Nikitin Yu.R., Trefilov S.A. [Development of a diagnostic system for drives of mobile robots]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii*, 2020, no. 4-1, pp. 59-68 (in Russ.). DOI: 10.33979/2073-7408-2020-342-4-1-59-67.

3. Lekomtsev P.V., Nikitin Yu.R., Trefilov S.A. [Simulation of a hybrid step engine in state space at a variable load resistance moment]. *Intellektual'nye*

sistemy v proizvodstve, 2020, vol. 18, no. 3, pp. 58-63 (in Russ.). DOI: 10.22213/2410-9304-2020-3-58-63.

4. Trefilov S.A., Nikitin Yu.R. [Diagnostics of drives of robots based on a DC motor by the criterion of identifiability of a nonlinear discrete model in the state space]. *Vestnik USATU*, 2020, vol. 24, no. 1, pp. 103-110 (in Russ.).

5. Eikhoff P. *Osnovy identifikatsii sistem upra* [Basics identification control systems]. Moscow, Mir Publ., 1975, 686 p. (in Russ.).

6. *Sovremennye metody identifikatsii sistem* [Modern Systems Identification Techniques]. Moscow, 400 p. (in Russ.).

7. Gorp D. *Metody identifikatsii sistem* [Systems Identification Methods]. Moscow, Mi Publ., 1979, 302 p. (in Russ.).

8. Leung L. *Identifikatsiya sistem. Teoriya dlya pol'zovatelya* [Identification Systems. A theory for the user]. Moscow, Nauka Publ., 1991, 432 p. (in Russ.).

9. Sage E.P., Melsa J.L. *Identifikatsiya sistem upravleniya* [Identify control systems]. Moscow, Nauka Publ., 1974, 248 p. (in Russ.).

10. Sage E.P., Melsa J.L. *Teoriya otsenivaniya i ee primeneniye v svyazi i upravlenii* [Assessment theory and its application in communication and management]. Moscow, Svyaz' Publ., 1976, 496 p. (in Russ.).

11. Tsyypkin J.S. *Osnovy informatsionnoi teorii identifikatsii* [Basics of Information Identification Theory]. Moscow, Nauka Publ., 1984, 320 p. (in Russ.).

12. *Chto takoe identifikatsiya?* [What is identification?]. Moscow, Nauka Publ., 1970, 118 p. (in Russ.).

13. Steinberg S.E. *Identifikatsiya v sistemakh upravleniya* [Identification in Control Systems]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987, 80 p. (in Russ.).

14. Beard R. V. Failure accommodation in linear system through self reorganization (PhD thesis). MIT, Massachusetts, USA, 1971, 376 p.

15. Jones H. L. Failure detection in linear systems (PhD thesis). MIT, Massachusetts, USA, 1973, 459 p.

16. Frank P. M. Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy: a survey and some new results. *Automatica*, vol. 26, no. 3, 1990, pp. 459-474.

17. Isermann R. Fault-Diagnosis Systems: An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance. Berlin; New York, Springer, 2006, 475 p.

18. 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.

19. Ding S.X. Model-based Fault Diagnosis Techniques. Design Schemes, Algorithms, and Tools. Springer, 2008, 473 p. DOI: 10.1007/978-3-540-76304-8.

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

Influence of Diagnostic Stepper Motor Parameters on Criterion of Identifiability for Nonlinear Discrete Model by State Space

Yu.R. Nikitin, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

P.V. Lekomtsev, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

S.A. Trefilov, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

The paper discusses the influence of such parameters of a stepper motor as phase resistance and inductance, moment of inertia on the criterion of identifiability of the drive model. To study the influence of these parameters, a nonlinear discrete model of a stepper motor in the state space is used.

A measurement matrix is proposed taking into account the reduced measurement error. The determinant of the measurement matrix is obtained with the maximum errors in the lower and higher sides in the worst case. It is concluded that only the matrix of the state of the stepping motor affects the identifiability, which will ultimately determine the rank of the extended matrix. The criterion for the loss of identifiability of the model is determined as the minimum threshold value of the determinant of the extended state matrix for cases of the exit of such parameters as resistance and inductance of the winding, moment of inertia from the space of realizable values of a working stepper motor.

A simulation model of a stepper motor has been developed in a domestic software product for modeling technical systems SimInTechto to calculate the minimum definition of the extended state matrix. If the winding resistance is reduced to 0.28 Ohm, the model of the step engine is reduced. The reason for this may be the inter-machine closure in the winding of the step motor. If the inductivity of the winding increases to 0.0002 H, the identifiability of the step engine model is lost. Changing the moment of inertia of the step engine in a wide range practically does not result in loss of model identifiability.

Based on the analysis of changes in the minimum determinant of the extended state matrix, the identifiability criterion of the stepper motor model, it is possible to solve the problem of diagnostics at the stages of production, operation and repair.

Keywords: stepper motor, discrete model, identifiability, state space, diagnostics.

Получено 16.11.2020

Образец цитирования

Никитин Ю. Р., Лекомцев П. В., Трефилов С. А. Влияние параметров шагового двигателя на критерий идентифицируемости для нелинейной дискретной модели в пространстве состояний // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2020. Т. 23, № 4. С. 52–59. DOI: 10.22213/2413-1172-2020-4-52-59.

For Citation

*Nikitin Yu.R., Lekomtsev P.V., Trefilov S.A. [Influence of Diagnostic Stepper Motor Parameters on Criterion of Identifiability for Nonlinear Discrete Model by State Space]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, 2020, vol. 23, no. 4, pp. 52-59 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2020-4-52-59.*