

УДК 681.527.2

DOI 10.22213/2410-9304-2018-4-114-121

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ПРИВОДОВ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ НА БАЗЕ МОДЕЛИ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА *

Ю. Р. Никитин, 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
А. И. Абрамов, кандидат технических наук, доцент, ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, Ижевск, Россия
И. В. Абрамов, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, Ижевск, Россия
Ю. В. Турыгин, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, Ижевск, Россия
А. В. Романов, кандидат технических наук, ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, Ижевск, Россия

В статье рассмотрены вопросы диагностирования приводов мобильных роботов (МР) на базе модели двигателя постоянного тока. Диагностика приводов МР выполнена путем наблюдения отклонения (невязки) между измеренными параметрами состояния приводов МР и их идеальными значениями, полученными с помощью эталонной модели. Разработана векторно-матричная модель привода МР на базе двигателя постоянного тока в пространстве состояний с учетом вязкого трения. В качестве обобщенных координат выбраны электрический ток якоря и угловая скорость вращения ротора ДПТ. Входными параметрами являются напряжение на якоре и момент сопротивления нагрузки. Параметрами модели являются активное сопротивление и индуктивность цепи и якоря, а также приведенный момент инерции и конструктивные постоянные привода. В качестве идентификационного параметра для диагностики привода выбран электрический ток. Получена зависимость изменения невязки электрического тока эталона и модели привода МР от величины сопротивления и индуктивности якоря привода относительно эталона. При увеличении дефекта – межвиткового замыкания обмотки якоря двигателя – уменьшается сопротивление и индуктивность обмотки якоря двигателя по сравнению с эталонной моделью, что приводит к увеличению невязки по электрическому току двигателя. При увеличении температуры незначительно увеличивается невязка по электрическому току двигателя на 0,32 А при увеличении сопротивления на 10 %.

Ключевые слова: диагностирование, привод, мобильный робот, модель, двигатель постоянного тока.

Введение

Интенсивное использование мобильных роботов (МР) на производстве и в других отраслях, иногда при экстремальных условиях эксплуатации, предъявляет высокие требования к их надежности. Наиболее ненадежным элементом в МР является привод. На МР с источником питания в виде аккумуляторной батареи используется электрический привод.

С 70-х годов XX века активно велась разработка средств и методов диагностики технических систем. Метод диагностики технических систем их составных частей, узлов и деталей с использованием измеренных данных со встроенных датчиков в реальном масштабе времени – наиболее эффективный метод и становится все более распространенным. Данные измерения параметров функционирования и состояния технических систем после идентификации могут быть использованы для разработки эффективной системы их управления, диагностики и прогнозирования остаточного ресурса.

Метод идентификации в пространстве состояний активно развивался за последние два десятилетия и был успешно реализован во многих отраслях промышленности. Исследования

в данном направлении представлены в работах [1–13]. Среди хорошо разработанных методов диагностики и мониторинга технических систем на основе моделей в течение последних двух десятилетий большое внимание уделялось фильтрам обнаружения дефектов (Fault Detection Filter), диагностическому наблюдателю (Diagnostic Observer). В работе [14] рассмотрен наблюдатель для асинхронных двигателей и бесколлекторных двигателей постоянного тока. В работах [15–21] рассмотрены вопросы диагностирования приводов, в том числе на базе нечеткой логики.

Векторно-матричная модель привода на базе двигателя постоянного тока

Диагностика приводов МР выполнена путем наблюдения отклонения (невязки) между фактическими измеренными параметрами состояния приводов МР и их идеальными значениями, полученными с помощью модели. При превышении сигнала невязки порогового значения должна выполняться идентификация дефектов с использованием нечеткой логики и прогнозирование остаточного ресурса.

Для исследования приводов МР выбран математический аппарат на базе векторно-матрич-

ных моделей в пространстве состояний во временной области, т. к. он имеет следующие достоинства: удобство обозначений, компактность записи в векторно-матричной форме, простота проведения анализа, наглядность, т. к. поведение привода рассматривается как поведение точки в евклидовом пространстве. Методы анализа и синтеза моделей в пространстве состояний в векторно-матричной форме имеет существенное преимущество перед операторными методами в том, что они сравнительно легко распространяются на широкий класс технических систем, например, на системы с переменными во времени параметрами, которые изменяются под воздействием дефектов.

Разработана векторно-матричная модель привода МР на базе двигателя постоянного тока в пространстве состояний с учетом вязкого трения и влияния дефектов и помех.

В процессе работы МР осуществляется регулирование скорости, частые пуски, торможения, изменение направления движения. В случае перемещения грузов разного веса изменяются параметры механической части привода МР, что приводит к изменению приведенного момента инерции привода и статического момента на валу. Привод МР либо связан с колесами через редуктор, либо непосредственно торможение механизма может осуществляться электроприводом или дополнительными тормозами.

Математическая модель привода на базе двигателя постоянного тока

Для разработки модели привода в пространстве состояний в векторно-матричной форме составлены дифференциальные уравнения, которыми описываются электромагнитные и электромеханические процессы в ДПТ с независимым возбуждением или с постоянными магнитами:

$$u_{\text{я}} = R_{\text{я}} \left(T_{\text{я}} \frac{di_{\text{я}}}{dt} + i_{\text{я}} \right) + e_{\text{я}}, \quad (1)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = M - M_{\text{н}}, \quad (2)$$

$$e_{\text{я}} = k_E \omega, \quad (3)$$

$$M = k_M i_{\text{я}}, \quad (4)$$

$$T_{\text{я}} = \frac{L_{\text{я}}}{R}, \quad (5)$$

где $u_{\text{я}}$, $i_{\text{я}}$, $e_{\text{я}}$ – напряжение, ток и противоЭДС якоря ДПТ; $L_{\text{я}}$, $R_{\text{я}}$, $T_{\text{я}}$ – индуктивность, сопротивление и электромагнитная постоянная вре-

мени якоря ДПТ; ω , M , $M_{\text{н}}$ – угловая скорость, электромагнитный момент, момент нагрузки на валу ДПТ; J – момент инерции ротора ДПТ и нагрузки.

Коэффициенты k_E , k_M являются конструктивными постоянными двигателя.

Уравнение (1) отражает взаимосвязь между переменными в цепи якоря. Уравнение (2) отражает условия механического равновесия.

Если отсутствуют справочные данные, то номинальный момент двигателя $M_{\text{н}}$ в (Н·м), конструктивные постоянные и индуктивность якоря рассчитываются из уравнений при номинальных значениях параметров:

$$M_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{\omega} = \frac{30 P_{\text{н}}}{\pi n_{\text{н}}}, \quad (6)$$

$$k_M = \frac{M_{\text{н}}}{I_{\text{я}}}, \quad (7)$$

$$k_E = \frac{30(U_{\text{я}} - \text{я}_{\text{я}} I_{\text{я}})}{\pi n_{\text{н}}}, \quad (8)$$

$$L_{\text{я}} \approx \frac{30 U_{\text{я}} c_x}{\pi n_{\text{н}} I_{\text{я}}}, \quad (9)$$

где $c_x = 0,3-0,4$ – эмпирический коэффициент, n измеряется в об/мин.; ω – рад.с.

Поскольку регулятор привода МР должен обеспечивать регулирование по моменту и скорости вращения, то в качестве обобщенных координат выбраны ток якоря $I_{\text{я}}$, частота вращения якоря ω . Управлением являются напряжение на якоре $U_{\text{я}}$ и момент сопротивления нагрузки $M_{\text{н}}$. Параметрами модели являются активное сопротивление и индуктивность цепи и якоря, обозначенные соответственно $R_{\text{я}}$ и $L_{\text{я}}$, 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.

Классическая модель ДПТ с постоянными параметрами не соответствует реальности во всем рабочем диапазоне ДПТ. Поэтому была добавлена нелинейность, связанная с вязким и сухим трением.

Для вращательного типа движения контактирующих поверхностей приводов момент трения выражен следующим образом:

$$M_{\text{тр}} = k_{\text{в.тр}} \omega - k_{\text{с.тр}} \text{sign } \omega. \quad (10)$$

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

$$L_{\text{я}} \frac{dI_{\text{я}}}{dt} = -R_{\text{я}} I_{\text{я}} - k_E \omega + U_{\text{я}}, \quad (11)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = k_M I_{\text{я}} - k_{\text{в.тр}} \omega - M_{\text{н}}. \quad (12)$$

В уравнении (12) учтено вязкое и сухое трение в виде $(-k_{\text{в.тр}} \omega - M_{\text{н}})$.

Для обнаружения и идентификации дефектов привода применяется пара уравнений (11) и (12), на базе которых строится векторно-матричная модель в пространстве состояний.

Поскольку дифференциальные уравнения (11) и (12) нелинейны, то процедура проектирования модели для пространства состояний не может применяться непосредственно. Если определить входной сигнал нагрузки $M_{\text{н}} = k_{\text{с.тр}} \text{sign} \omega$, то можно получить линейную модель. Тогда линейная модель в пространстве состояний будет выглядеть следующим образом:

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \dot{I} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \frac{k_E}{L} \\ \frac{k_M}{J} & -\frac{k_{\text{в.тр}}}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ M_{\text{н}} \end{bmatrix}, \quad (13)$$

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} I \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{x}. \quad (14)$$

Расчет невязки по электрическому току для привода

Для диагностирования привода использовано уравнение для вычисления невязки $r(t)$ по электрическому току для привода МР и идеальной модели привода МР:

$$r(t) = I_{\text{я1}} - I_{\text{я2}}. \quad (15)$$

В идеальном случае при отсутствии дефектов и помех величина невязки равна нулю.

Динамическая модель привода МР представлена в пространстве состояний в классической векторно-матричной форме. В качестве вектора управления задается вектор-столбец, содержащий напряжение питания привода $U_{\text{я}}$ и момент сопротивления $M_{\text{н}}$. Входное воздействие задается в виде ступенчатой функции изменения напряжения и момента сопротивления от 0 до номинального значения.

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} I \\ \omega \end{bmatrix}, \quad \mathbf{y} = \begin{bmatrix} I \\ \omega \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{bmatrix},$$

$$a_{11} = -R_{\text{я}}/L_{\text{я}}, \quad a_{12} = -k_E/L_{\text{я}},$$

$$a_{21} = k_M/J, \quad a_{22} = -k_{\text{в.тр}}/J.$$

$$b_{11} = 1/L_{\text{я}}, \quad b_{12} = 0, \quad b_{21} = 0, \quad b_{22} = -1/J.$$

$$c_{11} = 1, \quad c_{12} = 0, \quad c_{21} = 0, \quad c_{22} = 1.$$

В качестве примера привода рассмотрен ДПТ П-11У4 с параметрами:

- номинальная мощность 0,3 кВт;
- номинальное напряжение 220 В;
- номинальный момент 1,91 Н·м;
- номинальный ток двигателя 2 А;
- сопротивление обмотки якоря двигателя при 15 °С 14,6 Ом;
- номинальная частота вращения 1500 об/мин;
- индуктивность двигателя 0,248 Гн;
- момент инерции якоря двигателя 0,0031 кг·м²;
- коэффициент вязкого трения 0,001 Н·м·с;
- коэффициент $k_M = 0,95$ Н·м/А;
- коэффициент $k_E = 1,21$ В·с/рад.

Моделирование привода в программном продукте «Среда динамического моделирования технических систем SimInTech»

Для решения задачи анализа динамической модели привода МР в пространстве состояний в векторно-матричной форме выбран отечественный, динамично развивающийся, программный продукт «Среда динамического моделирования технических систем SimInTech» (от англ. Simulation In Technic), разработчик – общество с ограниченной ответственностью «ЗВ СЕРВИС» [22]. Основными особенностями SimInTech являются следующие:

- принцип вложенности структур, что актуально при моделировании сложных динамических систем;
- наличие полной общетехнической библиотеки;
- обширный набор алгоритмов численного интегрирования;
- открытость, дающая пользователю возможность расширить состав личной библиотеки за счет создания новых типов блоков.

SimInTech содержит специальный блок «Переменные состояния» для моделирования технических систем в пространстве состояний в векторно-матричной форме.

Если скорость привода уменьшается, то регулятор увеличивает ее с использованием отри-

цательной обратной связи по скорости. Поэтому невязка по угловой скорости в модели привода стремится к нулю. В данном примере изменены параметры модели привода – сопротивление и индуктивность обмотки якоря двигателя по сравнению с эталонной моделью. Моделирование выполнено при одинаковой нагрузке – моменте сопротивления. Тогда для заданной целевой функции привода – поддержание заданной скорости – необходимо изменять входное напряжение на модели привода относительно эталона, что приведет к изменению электрического

тока, что является идентификационным параметром для диагностики привода.

На рис. 1 показана модель в пространстве состояний в векторно-матричной форме с блоком «Переменные состояния» в среде динамического моделирования технических систем SimInTech, где моделируется изменение параметров привода относительно эталонного привода. Если скорость привода уменьшается (увеличивается), то регулятор за счет отрицательной обратной связи увеличивает (уменьшает) ее, что приводит к стремящейся к нулю невязке по угловой скорости.

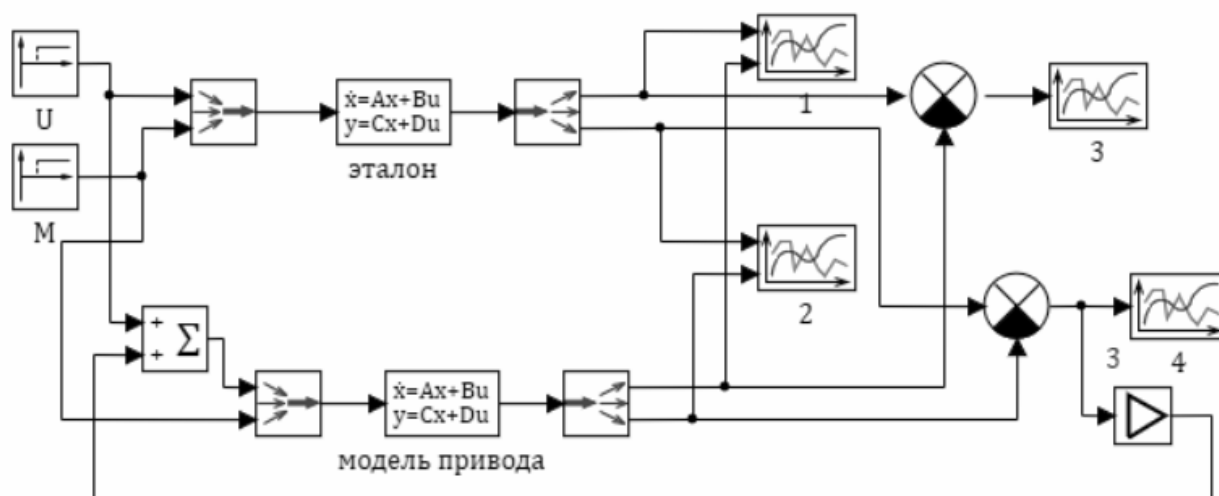


Рис. 1. Схема вычисления невязки по электрическому току и угловой скорости эталона и модели привода МР в пространстве состояний

Такая модель позволяет имитировать равенство условий эксплуатации эталонного и деградировавшего привода. В данном примере изменены параметры модели привода – сопротивление и индуктивность обмотки якоря двигателя по сравнению с эталонной моделью. Моделирование выполнено при одинаковой нагрузке – моменте сопротивления. Тогда для заданной целевой функции привода – поддержание заданной угловой скорости – будет изменяться входное напряжение на модели привода относительно эталона, что приведет к изменению электрического тока. Таким образом, данная модель показывает, что электрический ток является идентификационным параметром для диагностики привода. Применение данного идентификационного параметра на практике потребует измерения момента нагрузки на реальном приводе с последующей имитацией работы эталонного привода и сравнением электрического тока реального и эталонного приводов.

```
// Скрипт для моделирования привода
// на двигателе постоянного тока
// в пространстве состояний
// в программе SimInTech
const
  delta=0.9, ke1=1.21, km1=0.95,
  J1=0.0031, R1=14.6, L1=0.248,
  k1=0.001, J2=J1, R2=R1*delta,
  L2=L1*delta, k2=k1, ke2=ce1, km2=km1;
initialization
  // Формирование матриц
  M_A1=[[-R1/L1, -ke1/L1], [km1/J1, -
k1/J1]];
  M_B1=[[1/L1, 0], [0, -1/J1]];
  M_C1=[[1, 0], [0, 1]];
  M_D1=[[0, 0], [0, 0]];
  M_A2=[[-R2/L2, -ke2/L2], [km2/J2, -
k2/J2]];
  M_B2=[[1/L2, 0], [0, -1/J2]];
  M_C2=[[1, 0], [0, 1]];
  M_D2=[[0, 0], [0, 0]];
  // Транспонирование матриц
  M_A1=transp(M_A1);
  M_B1=transp(M_B1);
```

```

M_C1=transp(M_C1);
M_D1=transp(M_D1);
M_A2=transp(M_A2);
M_B2=transp(M_B2);
M_C2=transp(M_C2);
M_D2=transp(M_D2);
end;

```

Для анализа влияния межвиткового замыкания в обмотке якоря ДПТ уменьшали одновременно сопротивление и индуктивность с шагом 10 % от номинального значения. На рис. 2 приведена невязка электрического тока эталона и модели привода МР на базе двигателя постоянного тока в пространстве состояний при сопротивлении и индуктивности якоря, равном 90 % от эталонных значений. Максимальная невязка электрического тока составила 0,6 А.

На рис. 4 показана зависимость изменения невязки электрического тока эталона и модели привода МР от величины сопротивления и индуктивности якоря привода относительно эталона.

На рис. 5 показано, что при увеличении сопротивления на 10 % от эталонного значения вследствие нагрева привода невязка электрического тока эталона и модели привода МР на базе двигателя постоянного тока увеличивается на 0,32 А.

Выводы

Разработана векторно-матричная модель привода МР на базе двигателя постоянного тока в пространстве состояний с учетом вязкого трения. Предложено для диагностики привода использовать невязку по электрическому току якоря ДПТ. При увеличении дефекта – межвиткового замыкания обмотки якоря двигателя – уменьшается сопротивление и индуктивность обмотки якоря двигателя по сравнению с эталонной моделью, что приводит к увеличению невязки по электрическому току двигателя.

При увеличении температуры в процессе работы незначительно увеличивается невязка по электрическому току двигателя на 0,32 А при увеличении сопротивления на 10 %.

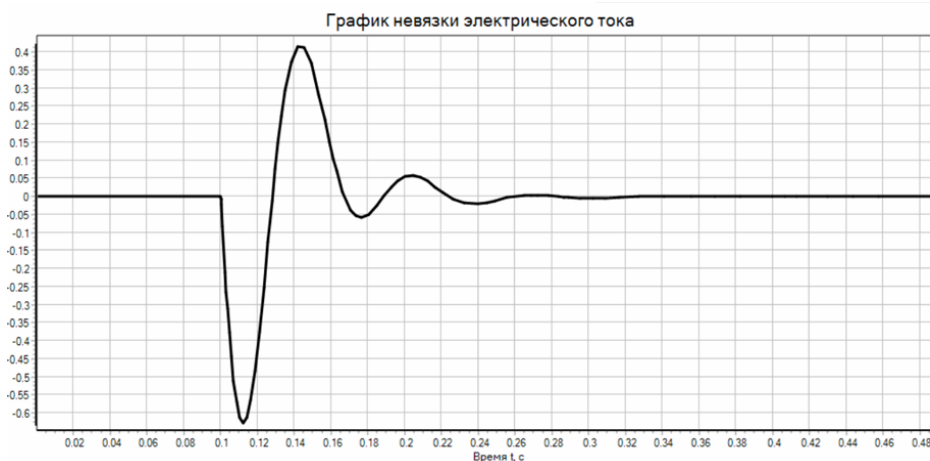


Рис. 2. Невязка электрического тока эталона и модели привода МР на базе двигателя постоянного тока при сопротивлении и индуктивности 90 % от эталонных значений

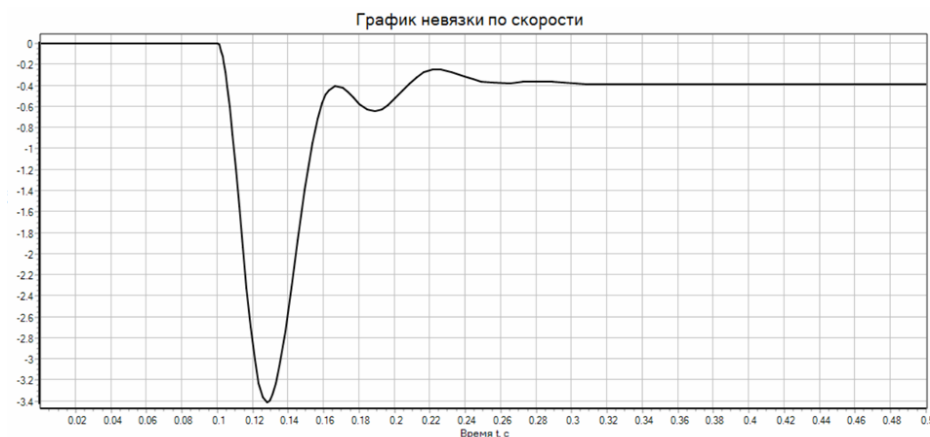


Рис. 3. Невязка угловой скорости эталона и модели привода МР на базе двигателя постоянного тока при сопротивлении и индуктивности 90 % от эталонных значений

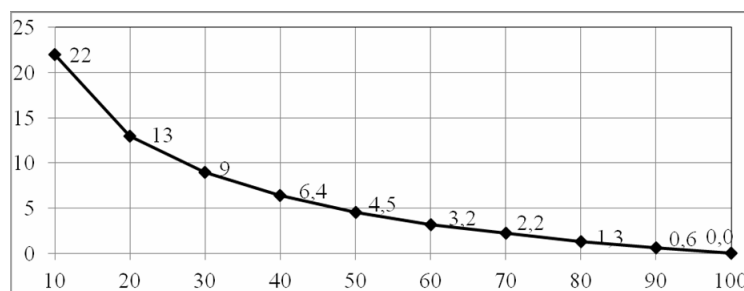


Рис. 4. Зависимость изменения невязки электрического тока эталона и модели привода МР от величины изменения сопротивления и индуктивности якоря привода относительно эталона

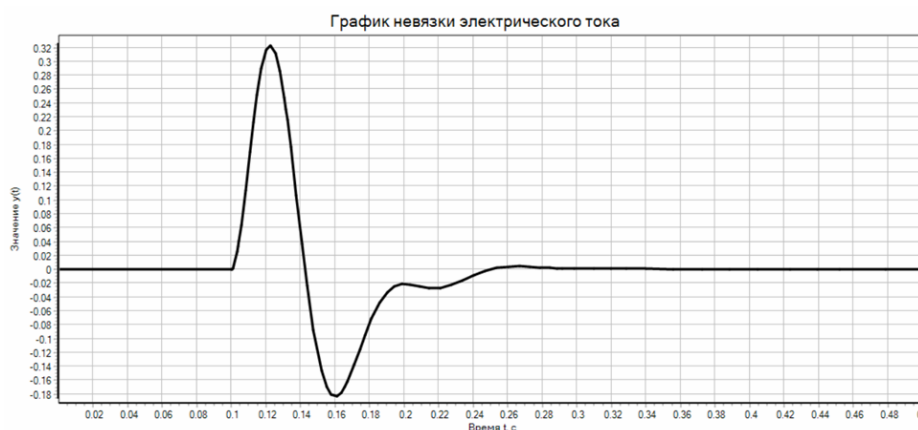


Рис. 5. Невязка электрического тока эталона и модели привода МР на базе двигателя постоянного тока при увеличении сопротивления на 10 % от эталонного значения

Библиографические ссылки

1. Ding S. X. Model-Based Fault Diagnosis Techniques. Design Schemes, Algorithms and Tools. Springer, London, 2013, 504 p. ISBN 978-1-4471-4798-5. DOI 10.1007/978-1-4471-4799-2.
2. Frank P. M. Fault Diagnosis in Dynamic Systems Using Analytical and Knowledge-Based Redundancy: A Survey and Some New Results. *Automatica*, 1990, vol. 26, no 3, pp. 459-474. DOI 10.1016/0005-1098(90)90018-D.
3. Isermann R. Combustion Engine Diagnosis. Model-based Condition Monitoring of Gasoline and Diesel Engines and their Components. Springer-Verlag GmbH, Germany, 2017, 313 p. ISBN 978-3-662-49466-0. DOI 10.1007/978-3-662-49467-7.
4. Isermann R. Fault-Diagnosis Systems: An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance. Springer-Verlag, Berlin, 2006, 475 p. ISBN 978-3-540-30368-8.
5. Luo H. Plug-and-Play Monitoring and Performance Optimization for Industrial Automation Processes. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH. 2017, 158 p. ISBN 978-3-658-15927-6. DOI 10.1007/978-3-658-15928-3.
6. Wang Y., Ma G., Ding S.X., Li C. Subspace aided data-driven design of robust fault detection and isolation systems. *Automatica*, 2011, vol. 47, pp. 2474-2480. DOI:10.1016/j.automatica.2011.05.028.
7. Грон Д. Методы идентификации систем. М. : Мир, 1979. 302 с.
8. Жирабок А. Н., Филаретов В. Ф. Обеспечение робастности при диагностировании мехатронных систем // Материалы Международной научно-технической конференции. Таганрог : Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. С. 53–56.
9. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя. М. : Наука, 1991. 432 с.
10. Сейдж Э. П., Мелса Дж. Л. Идентификация систем управления. М. : Наука, 1974. 248 с.
11. Цыпкин Я. З. Основы информационной теории идентификации. М. : Наука, 1984. 320 с.
12. Штейнберг Ш. Е. Идентификация в системах управления. М. : Энергоатомиздат, 1987. 80 с.
13. Эйхофф П. Основы идентификации систем управления. М. : Мир, 1975. 686 с.
14. Калачев Ю. Н. Наблюдатели состояния в векторном электроприводе. – М., 2015. 80 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.radiosovet.ru/book/elektrotehnika/7181-nablyudateli-sostoyaniya-v-vektornom-elektroprivode.html>.
15. Abramov I., Nikitin Y., Zorina O., Božek P., Stepanov P., Stollmann V. Monitoring of technical condition of motors and bearings of woodworking equipment. *Acta Facultatis Xylologiae*, 2014, vol. 56 (2), pp. 97–104. ISSN 1336-3824.
16. Abramov I. V., Nikitin Yu. R., Abramov A. I., Sosnovich E. V., Božek P. Control and diagnostic model of brushless DC motor. *Journal of Electrical Engineering*, 2014, vol. 65, no. 5, pp. 277-282. ISSN 1335-3632.

17. Абрамов И. В., Абрамов А. И., Никитин Ю. Р., Романов А. В. Диагностика систем приводов деревообрабатывающего оборудования с использованием нечеткой логики // Интеллектуальные системы в производстве. 2015. № 1. С. 31–34. ISSN 1813-7991.

18. Никитин Ю. Р., Абрамов И. В., Степанов П. И. Логико-лингвистическая модель диагностирования и прогнозирования остаточного ресурса мехатронных объектов // Интеллектуальные системы в производстве. 2013. № 2 (22). С. 79–87. ISSN 1813-7991.

19. Степанов П. И., Лагуткин С. В., Никитин Ю. Р. Комплексная токовая и вибродиагностика электро-механических систем // Интеллектуальные системы в производстве. 2013. № 2. С. 160–165. ISSN 1813-7991.

20. 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. ISSN 1813-7991.

21. Столбов К. Л., Никитин Ю. Р. Диагностирование мотор-редукторов прокатной линии стана 250 // Интеллектуальные системы в производстве. 2014. № 2 (24). С. 64–69. ISSN 1813-7991.

22. Среда динамического моделирования технических систем SIMINTECH : Практикум по моделированию систем автоматического регулирования / Б. А. Карташов, Е. А. Шабаев, О. С. Козлов, А. М. Щекатуров. М. : ДМК Пресс, 2017. 424 с.

References

1. Ding S.X. *Model-Based Fault Diagnosis Techniques. Design Schemes, Algorithms and Tools*. Springer, London, 2013, 504 p. ISBN 978-1-4471-4798-5. DOI 10.1007/978-1-4471-4799-2.

2. Frank P.M. Fault Diagnosis in Dynamic Systems Using Analytical and Knowledge-Based Redundancy: A Survey and Some New Results. *Automatica*, 1990, vol. 26, no 3, pp. 459-474. DOI 10.1016/0005-1098(90)90018-D.

3. Isermann R. *Combustion Engine Diagnosis. Model-based Condition Monitoring of Gasoline and Diesel Engines and their Components*. Springer-Verlag GmbH, Germany, 2017, 313 p. ISBN 978-3-662-49466-0. DOI 10.1007/978-3-662-49467-7.

4. Isermann R. *Fault-Diagnosis Systems: An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance*. Springer-Verlag, Berlin, 2006, 475 p. ISBN 978-3-540-30368-8.

5. Luo H. *Plug-and-Play Monitoring and Performance Optimization for Industrial Automation Processes*. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH. 2017, 158 p. ISBN 978-3-658-15927-6. DOI 10.1007/978-3-658-15928-3.

6. Wang Y., Ma G., Ding S.X., Li C. Subspace aided data-driven design of robust fault detection and isolation systems. *Automatica*, 2011, vol. 47, pp. 2474-2480. doi:10.1016/j.automatica.2011.05.028

7. Grop D. *Metody identifikacii sistem* [Identification methods of system]. Moscow, Mir Publ., 1979, 302 p. (in Russ.).

8. Zhirabok A.N., Filaretov V.F. *Obespechenie robustnosti pri diagnostirovanii mekhatronnykh sistem* [Ensuring robustness in diagnosing mechatronic systems]. *Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii* [Proc. Materials of the International Scientific and Technical Conference]. Taganrog, TTI YUFU Publ., 2009, pp. 53-56. (in Russ.). ISBN 978-5-8327-0339-8.

9. L'yung L. *Identifikaciya sistem. Teoriya dlya pol'zovatelya* [Identification of system. Theory for the user]. Moscow, Nauka Publ., 1991, 432 p. (in Russ.). ISBN 5-02-014511-4.

10. Sejdzh Eh.P., Melsa Dzh.L. *Identifikaciya sistem upravleniya* [Identification of control systems]. Moscow, Nauka Publ., 1974, 248 p. (in Russ.).

11. Cypkin Ya.Z. *Osnovy informacionnoj teorii identifikacii* [Fundamentals of information theory of identification]. Moscow, Nauka Publ., 1984, 320 p. (in Russ.).

12. Shtejnberg Sh.E. *Identifikaciya v sistemah upravleniya* [Identification in control systems]. Moscow, Ehnergoatomizdat Publ., 1987. 80 p. (in Russ.). ISBN 5-283-01470-3.

13. Ehjkkhoff P. *Osnovy identifikacii sistem upravleniya* [Fundamentals of identification control systems]. Moscow, Mir Publ., 1975. 686 p. (in Russ.).

14. Kalachev Yu.N. *Nablyudateli sostoyaniya v vektornom ehlektroprivode* [Status observer in a vector drive]. Moscow, 2015, 80 p. (in Russ.). Available at: <https://www.radiosovet.ru/book/elektrotehnika/7181-nablyudateli-sostoyaniya-v-vektornom-elektroprivode.html> (accessed 06.11.2018).

15. Abramov I., Nikitin Y., Zorina O., Božek P., Stepanov P., Stollmann V. Monitoring of technical condition of motors and bearings of woodworking equipment. *Acta Facultatis Xylologiae*, 2014, vol. 56(2), pp. 97–104. ISSN 1336-3824.

16. Abramov I.V., Nikitin Yu.R., Abramov A.I., Sosnovich E.V., Božek P. [Control and diagnostic model of brushless DC motor]. *Journal of Electrical Engineering*, 2014, vol. 65, no. 5, pp. 277-282. ISSN 1335-3632.

17. Abramov I.V., Abramov A.I., Nikitin Yu.R., Romanov A.V. [Diagnostics of drive systems for woodworking equipment using fuzzy logic]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, 2015, no 1, pp. 31-34. (in Russ.). ISSN 1813-7991.

18. Nikitin Yu.R., Abramov I.V., Stepanov P.I. [The logical-linguistic model for diagnosing and predicting the residual life of mechatronic objects]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, 2013, no 2 (22), pp. 79–87. (in Russ.). ISSN 1813-7991.

19. Stepanov P.I., Lagutkin S.V., Nikitin Yu.R. [Integrated current and vibration diagnostics of electromechanical systems]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, 2013, no 2, pp. 160–165. (in Russ.). ISSN 1813-7991.

20. Stepanov P.I., Lagutkin S.V., Nikitin Yu.R. [Mechanical and electrical diagnostic parameters of electric drives]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, 2014, no 2 (24), pp. 59-63. (in Russ.). ISSN 1813-7991.

21. Stolbov K.L., Nikitin Yu.R. [Diagnosing the motor-reducers of the rolling line of the mill 250]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*, 2014, no 2 (24), pp. 64-69. (in Russ.). ISSN 1813-7991.

22. Kartashov B.A., Shabaev E.A., Kozlov O.S., Shchekaturov A.M. *Sreda dinamicheskogo modeliro-*

vaniya tekhnicheskikh sistem SIMINTECH : Praktikum po modelirovaniyu sistem avtomaticheskogo regulirovaniya [The environment of dynamic simulation of technical systems SIMINTECH: A workshop on the simulation of automatic control systems]. Moscow, DMK Press Publ., 2017, 424 p. (in Russ.). ISBN 978-5-97060-482-3.

Diagnosing Drives of Mobile Robots Based on a DC Motor Model

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

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

A. I. Abramov, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

I. V. Abramov, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

Yu. V. Turygin, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

A. V. Romanov, PhD in Engineering, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

The paper deals with the issues of diagnosing drives of mobile robots (MR) based on a model of a DC motor. Diagnostics of the MR drives is performed by observing the deviations (residual) between the measured parameters of the state of the MR drives and their ideal values obtained using the model. A vector-matrix model of the MR drive based on a DC motor in the state space with viscous friction was developed. As the generalized coordinates, the armature electric current and the angular velocity of rotation of the DC motor rotor were chosen. Input parameters are the voltage at the anchor and the moment of load. The model parameters are the resistance and inductance of the armature, as well as the moment of inertia and the drive design constants. An electrical current was selected as an identification parameter for diagnosing the drive. The dependence of the variation of the electric current residual of the standard model of the MR drive on the resistance and inductance of the armature of the drive relative to the standard model is obtained. With an increase in the defect - interturn circuit of the motor armature winding, the resistance and inductance of the motor armature winding decrease in comparison with the standard model, which leads to an increase in the residual by the electric current of the motor. With an increase in temperature, the motor electric current residual slightly increases by 0.32 A with an increase in resistance by 10%.

Keywords: diagnosis, drive, mobile robot, model, DC motor.

Получено: 13.11.18