



МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ Q -ТАБЛИЦ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЛИНЕЙНОГО ИНТЕГРАЛЬНОГО КРИТЕРИЯ

Н.А. Малёв¹, О.В. Погодицкий¹, А.С. Малацион²

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

²ООО «Стэк Мастер», г. Казань, Россия

maleev@mail.ru

Резюме: В процессе функционирования рабочих комплексов с электромеханическими преобразователями, входящими в их состав, необходимо учитывать влияние эндогенных и экзогенных возмущений, вызывающих отклонения параметров электрических машин от номинальных значений, приведенных производителем в соответствующей документации. Даже незначительные отклонения параметров, находящиеся в допустимых пределах изменения, оказывают заметное влияние на качество функционирования электромеханических преобразователей и рабочих комплексов в целом. В течение жизненного цикла работы электромеханических преобразователей их параметры изменяются в результате естественного износа и старения, что вызывает необходимость непрерывного либо периодического анализа и контроля состояния объектов исследования. В работе рассматривается метод, основанный на вычислении линейного интегрального критерия Q и формировании Q – таблиц, позволяющий обеспечить контроль функционирования электромеханических преобразователей с нестабильными параметрами в процессе эксплуатации в составе рабочих комплексов. Приведены *simulink* – модели систем вычисления линейного интегрального критерия и автоматизированного контроля параметров электромеханического преобразователя постоянного тока, позволяющие получить оценки нестабильных параметров. В табличной форме реализованы статические характеристики, отражающие зависимости между параметрами электромеханического преобразователя и линейным интегральным критерием. Результаты проведенного исследования позволяют получить оценки изменения нестабильных параметров электромеханических преобразователей постоянного тока с требуемой точностью.

Ключевые слова: электромеханический преобразователь, *simulink* – модель, контроль параметров, линейный интегральный критерий, эталонная модель, модель чувствительности.

Для цитирования: Малёв Н.А, Погодицкий О.В., Малацион А.С. Метод формирования Q -таблиц для автоматизированного контроля параметров электромеханических преобразователей с применением линейного интегрального критерия // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 2. С. 86-97. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-1-86-97

Q -TABLES FORMATION METHOD FOR AUTOMATED MONITORING OF ELECTROMECHANICAL CONVERTERS PARAMETERS WITH APPLICATION OF LINEAR INTEGRAL CRITERION

NA Malev¹, OV Pogoditsky¹, AS Malacion²

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²LLC «Stek Master», Kazan, Russia

maleev@mail.ru

Abstract: In the process of functioning working sets with electromechanical converters included in their composition, it is necessary to take into account the influence of endogenous and exogenous disturbances that cause deviations of the parameters of electric machines from the nominal values given by the manufacturer in the appropriate documentation. These deviations of the parameters,

even those within the permissible range of changes, have a noticeable effect on the quality of functioning of electromechanical converters and working sets as a whole. During the life cycle of the work of electromechanical converters, their parameters change as a result of natural wear and senescence, which necessitates continuous or periodic analysis and monitoring of the state objects under study. The paper considers a method based on the calculation of the linear integral criterion Q and the formation of Q – tables, which allows monitoring the functioning of electromechanical converters with unstable parameters during operation as part of working sets. Simulink – models of linear integral criterion calculation system and system of automated monitoring of electromechanical DC converter parameters are presented, which allow estimating unstable parameters. In these models static characteristics are implemented in tabular form reflecting the dependencies between the parameters of the electromechanical converters and the linear integral criterion. The results of the study allow us to obtain estimates of changes in the unstable parameters of electromechanical DC converters with the required accuracy.

Keywords: electromechanical converter, simulink – model, monitoring of parameters, linear integral criterion, reference model, sensitivity model.

For citation: Malev NA, Pogoditsky OV, Malacion AS. Q -tables formation method for automated monitoring of electromechanical converters parameters with application of linear integral criterion // *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020; 22(2):86-97. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-2-86-97.

Введение

Разработка методов и алгоритмов, обеспечивающих контроль функционирования электромеханических преобразователей в процессе эксплуатации в составе рабочих комплексов за счет оценки изменяющегося вследствие влияния дестабилизирующих факторов вектора параметров χ является актуальной и важной задачей [1, 2, 3].

В работе рассматривается метод, позволяющий на основе полученной в результате эксперимента математической модели объекта исследования [4] и последующего определения по данной модели линейного интегрального критерия $Q(\chi)$ [5] сформировать Q -таблицу, по результатам заполнения которой реализуется алгоритм автоматизированного контроля параметров электромеханических преобразователей.

Математическая модель объекта исследования может быть описана в любой форме представления и в общем случае представляет собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений в векторной форме:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, u, \chi); \\ y &= g(x, \chi), \end{aligned} \quad (1)$$

где $f = \text{col}(f_1, f_2, \dots, f_n)$, $g = \text{col}(g_1, g_2, \dots, g_l)$ – векторные функции соответствующих аргументов; $y = \text{col}(y_1, y_2, \dots, y_l) \in R^l$; $x = \text{col}(x_1, x_2, \dots, x_n) \in R^n$; $u = \text{col}(u_1, u_2, \dots, u_m) \in R^m$ – векторы выходных координат, переменных состояния и входных воздействий соответственно; $\chi = \text{col}(\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_v)$ – вектор нестабильных параметров [6, 7].

Наибольшее распространение находят модели объектов исследования в виде линейных дифференциальных уравнений и соответствующих им операторных уравнений с переменными $p \equiv \frac{d}{dt}$ либо передаточных функций $W(s, \chi)$ [8, 9].

Методы

При построении структурной схемы автоматизированного контроля параметров электромеханических преобразователей применен беспоисковый градиентный метод с эталонной моделью и моделями чувствительности по анализируемым параметрам с целью получения вектора сигнала невязки ε , пропорционального вариациям параметров [10, 11, 12].

Метод предполагает минимизацию функционала Q невязки ε путем вычисления градиента по варьируемым параметрам $\chi = \{\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n\}$. Градиентный алгоритм оценки параметров χ_i из условия достижения минимума функционала Q запишется как:

$$\hat{\chi} = -\Lambda_\chi \tilde{N}_\chi Q[\varepsilon(\chi)], \quad (2)$$

где $\Lambda_\chi = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n\}$ – вектор коэффициентов нормирования.

Для определения компонентов градиента оценочной функции $\nabla_{\hat{\chi}} Q$ следует применить метод вспомогательного оператора [13, 14, 15]:

$$\frac{\partial Q}{\partial \hat{\chi}_i} = \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial \hat{\chi}_i} \right)^T \frac{\partial Q}{\partial \varepsilon},$$

где частные производные $\frac{\partial \varepsilon}{\partial \hat{\chi}_i}$ – элементы матрицы Якоби.

Дифференцируя невязку ε по нестабильным параметрам, получим

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial \hat{\chi}_i} = \frac{\partial Y}{\partial \hat{\chi}_i} = \frac{\partial F(\hat{\chi})}{\partial \hat{\chi}_i} u = G_i(\hat{\chi}) u \quad (3)$$

где $F(\hat{\chi})$ – модель объекта исследования, $G_i(\hat{\chi})$ – функция чувствительности к изменениям оценок χ_i . Тогда

$$\nabla_{\hat{\chi}_i} Q = G_i(\hat{\chi}) \left(\frac{\partial Q}{\partial \varepsilon} \right)^T u. \quad (4)$$

Алгоритм вычисления вектора оценок нестабильных параметров $\hat{\chi}$ [16, 17, 18] можно записать как систему вычисления текущих оценок χ_i :

$$\hat{\chi}_i = -\lambda_\chi G_i(\hat{\chi}) \left(\frac{\partial Q[\varepsilon(\hat{\chi})]}{\partial \varepsilon} \right)^T u. \quad (5)$$

Выражения (2) – (5) представляют собой общую форму записи алгоритма контроля нестабильных параметров электромеханических преобразователей. В данной статье рассматривается частный случай решения поставленной задачи и вычисление линейного интегрального критерия Q можно проиллюстрировать структурной схемой, представленной на рис. 1, которая предполагает для описания объекта исследования и других блоков схемы применение аппарата передаточных функций [19, 20].

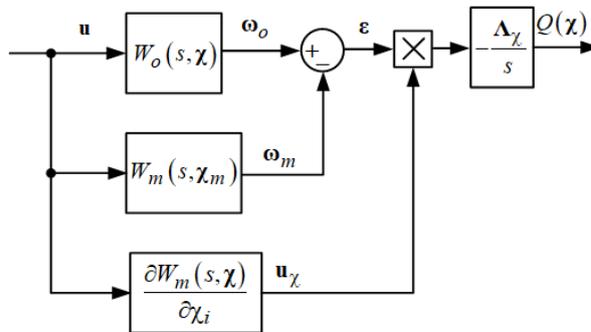


Рис. 1. Структурная схема вычисления линейного интегрального критерия

На схеме приняты следующие обозначения: $W_o(s, \chi)$ – математическая модель объекта исследования; s – оператор Лапласа; χ – вектор параметров объекта; u – вектор входных воздействий; $W_m(s, \chi)$ – эталонная модель объекта; ω_o – вектор выходных координат объекта; ω_m – вектор выходных координат эталонной модели; ε – вектор невязки; u_χ – вектор функций чувствительности; $\Lambda_\chi = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n\}$ – вектор коэффициентов нормирования; $\frac{\partial W_m(s, \chi)}{\partial \chi_i}$ – модель чувствительности по контролируемым параметрам; $Q(\chi)$ – линейный интегральный критерий.

Результаты и обсуждение

В качестве объекта исследования рассматривается двигатель постоянного тока типа 4ПБ112М2Г, математическая модель которого, выраженная через параметры s –

коэффициент противо – ЭДС, R_a – активное сопротивление якоря, L_a – индуктивность якоря, J – момент инерции, представлена динамическим звеном второго порядка:

$$W_o(s) = \frac{1/c}{\frac{L_a J}{c^2} s^2 + \frac{R_a J_{\text{ном}}}{c^2} s + 1} \quad (6)$$

Эталонные значения параметров передаточной функции (6) были определены расчетно-экспериментальным путем [4] и сведены в табл. 1.

Таблица 1

Эталонные значения параметров двигателя 4ПБ112М2Г.

Активное сопротивление якоря R_a , Ом	Индуктивность якоря L_a , Гн	Коэффициент противо-ЭДС c , В·с/рад	Момент инерции J , кг·м ²
1,358	0,0108	0,63	0,0235

Модели чувствительности по контролируемым нестабильным параметрам представлены следующими выражениями:

- 1) Модель чувствительности по активному сопротивлению якоря R_a

$$\frac{\partial W_o(s, R_a)}{\partial R_a} = \frac{Jcs}{\left(L_a Js^2 + R_a Js + c^2\right)^2}; \quad (7)$$

- 2) Модель чувствительности по индуктивности якоря L_a

$$\frac{\partial W_o(s, L_a)}{\partial L_a} = \frac{Jcs^2}{\left(L_a Js^2 + R_a Js + c^2\right)^2}; \quad (8)$$

- 3) Модель чувствительности по моменту инерции J

$$\frac{\partial W_o(s, J)}{\partial J} = \frac{(Ls + R)cs}{\left(L_a Js^2 + R_a Js + c^2\right)^2}. \quad (9)$$

Simulink – модель вычисления линейного интегрального критерия $Q_\Sigma = Q(R_a, L_a, J)$ изображена на рис. 2.

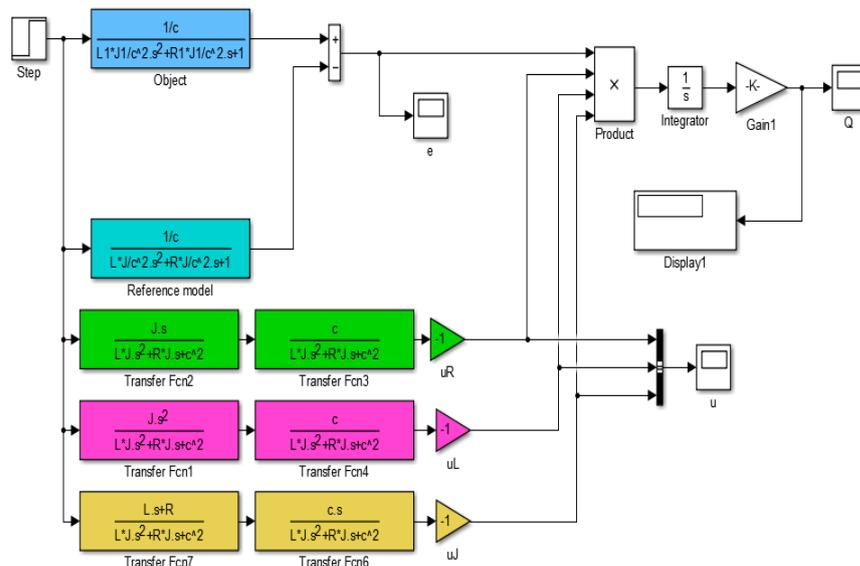


Рис. 2. *Simulink* – модель вычисления линейного интегрального критерия $Q_\Sigma = Q(R_a, L_a, J)$

Моделирование проводилось при следующих заданных вариациях параметров:
 $R_{a,var} = f(R_a; 1, 1R_a; 1, 2R_a)$; $L_{a,var} = f(L_a; 1, 1L_a; 1, 2L_a)$; $J_{var} = f(J; 1, 1J; 1, 2J)$.

Результаты моделирования представлены в виде табл. 2 (Q-таблица).

Таблица 2

Результаты вычисления линейного интегрального критерия $Q_{\Sigma} = Q(R_a, L_a, J)$.

$R_{a,var}$, Ом	$L_{a,var}$, Гн	J_{var} , кг·м ²	$Q_{\Sigma} = Q(R_a, L_a, J)$
1,358	0,0108	0,0235	0
1,4938	0,0108	0,0235	1,562
1,6296	0,0108	0,0235	1,98
1,358	0,01188	0,0235	2,617
1,6296	0,0108	0,0282	2,76
1,6296	0,0108	0,02585	2,997
1,358	0,0108	0,02585	3,772
1,4938	0,01188	0,0235	3,773
1,4938	0,0108	0,02585	3,827
1,6296	0,01188	0,0235	3,864
1,6296	0,01188	0,0282	4,418
1,4938	0,0108	0,0282	4,605
1,6296	0,01188	0,02585	4,678
1,358	0,01296	0,0235	5,313
1,358	0,0108	0,0282	5,794
1,6296	0,01296	0,0235	5,795
1,4938	0,01188	0,02585	5,919
1,4938	0,01296	0,0235	6,041
1,6296	0,01296	0,0282	6,104
1,358	0,01188	0,02585	6,271
1,4938	0,01188	0,0282	6,575
1,6296	0,01296	0,02585	6,576
1,4938	0,01296	0,02585	8,058
1,358	0,01188	0,0282	8,162
1,4938	0,01296	0,0282	8,581
1,358	0,01296	0,02585	8,83
1,358	0,01296	0,0282	10,58

Данные в табл. 2 структурированы таким образом, чтобы значения $Q_{\Sigma} = Q(R_a, L_a, J)$ в строках располагались от минимального, соответствующего эталонным значениям варьируемых параметров, до максимального.

В полученной Q – таблице количество столбцов зависит от количества ν контролируемых нестабильных параметров исследуемого объекта. Количество строк Q-таблицы k определяется диапазоном изменения нестабильных параметров и требуемой точностью их оценки и вычисляется по следующему выражению:

$$k = \beta^{\nu},$$

$$\beta = \frac{\chi_{i\max} - \chi_{i\min}}{\Delta\chi_i} + 1, \tag{10}$$

где $\chi_{i\max}$ – верхняя граница диапазона изменения i -го нестабильного; $\chi_{i\min}$ – нижняя граница диапазона изменения i -го нестабильного параметра; $\Delta\chi_i$ – отклонение i -го параметра. Результаты вычислений, представленные в табл. 2, соответствуют значениям

$$\beta = \frac{\chi_{i\max} - \chi_{i\min}}{\Delta\chi_i} + 1 = \frac{1,2 - 1}{0,1} + 1 = 3;$$

$$k = \beta^{\nu} = 3^3 = 27.$$

Следующим этапом рассматриваемого метода автоматизированного контроля параметров электромеханического преобразователя постоянного тока является построение статических характеристик вида $\chi_i = f(Q_{\Sigma})$ – χ -зависимостей.

Зависимость $R_{a,var} = f(Q_{\Sigma})$, показанную на рис. 3, получим с помощью Q-таблицы за счет выполнения следующей программы:

```
x1=[0 1,562 1,98 2,617 2,76 2,997 3,772 3,773 3,827 3,864 4,418 4,605 4,678 5,313 5,794 5,795
5,919 6,041 6,104 6,271 6,575 6,576 8,058 8,162 8,581 8,83 10,58]; % Q
y1=[1,358 1,4938 1,6296 1,358 1,6296 1,6296 1,358 1,4938 1,4938 1,6296 1,6296 1,4938 1,6296
1,358 1,358 1,6296 1,4938 1,4938 1,6296 1,358 1,4938 1,6296 1,4938 1,358 1,4938 1,358 1,358];
% R
plot(x1,y1)
```

$R_{a,var}$, Ом

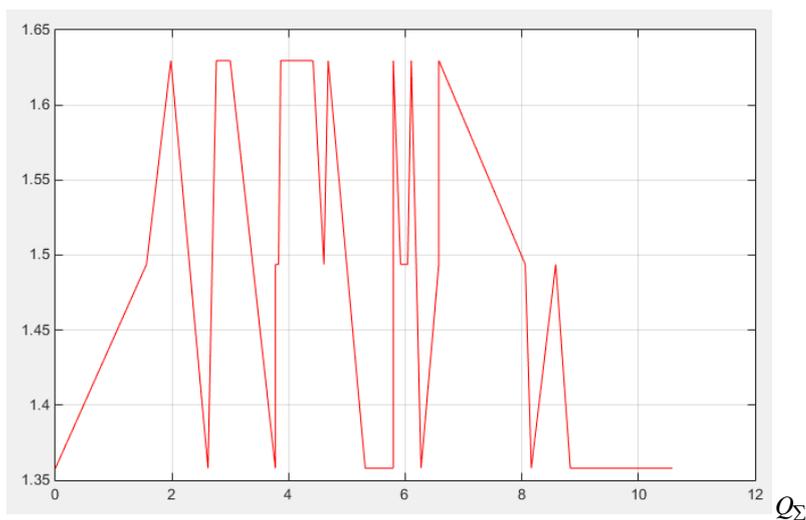


Рис. 3. Зависимость $R_{a,var} = f(Q_{\Sigma})$

Статические характеристики относительно остальных контролируемых параметров получаем аналогичным способом. Соответствующие зависимости представлены на рис. 4, 5.

$L_{a,var}$, Гн

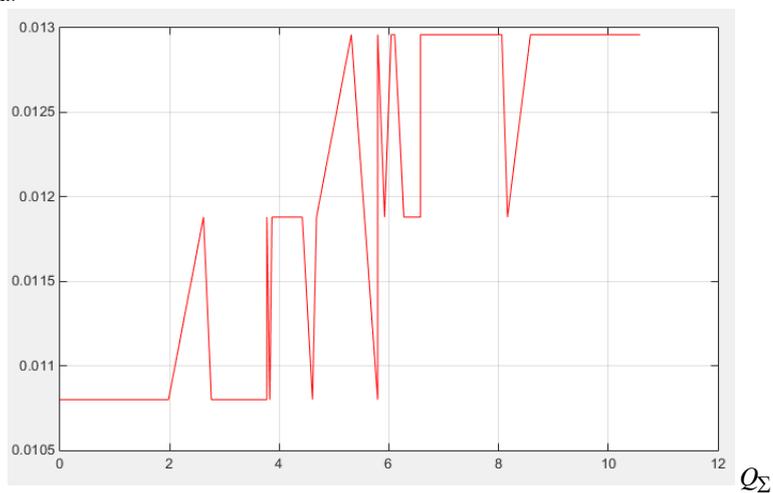


Рис. 4. Зависимость $L_{a,var} = f(Q_{\Sigma})$

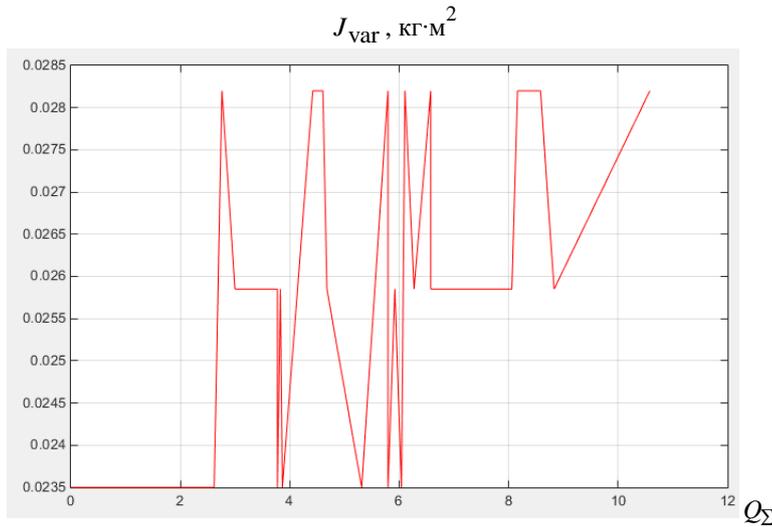


Рис. 5. Зависимость $J_{var} = f(Q_{\Sigma})$

Simulink – модель системы автоматизированного контроля параметров электромеханического преобразователя постоянного тока изображена на рис. 6.

Аналогичные расчеты были произведены при следующих заданных вариациях параметров:

$$R_{a,var} = f(R_a; 1, 05R_a; 1, 1R_a; 1, 15R_a; 1, 2R_a);$$

$$L_{a,var} = f(L_a; 1, 05L_a; 1, 1L_a; 1, 15L_a; 1, 2L_a);$$

$$J_{var} = f(J; 1, 05J; 1, 1J; 1, 15J; 1, 2J).$$

Simulink – модель системы автоматизированного контроля параметров электромеханического преобразователя постоянного тока для случаев $\beta = 3$ и $\beta = 5$ показана на рис. 7, Подсистемы вычисления оценок нестабильных параметров при $\beta = 3$ и $\beta = 5$ представлены на рис. 8.

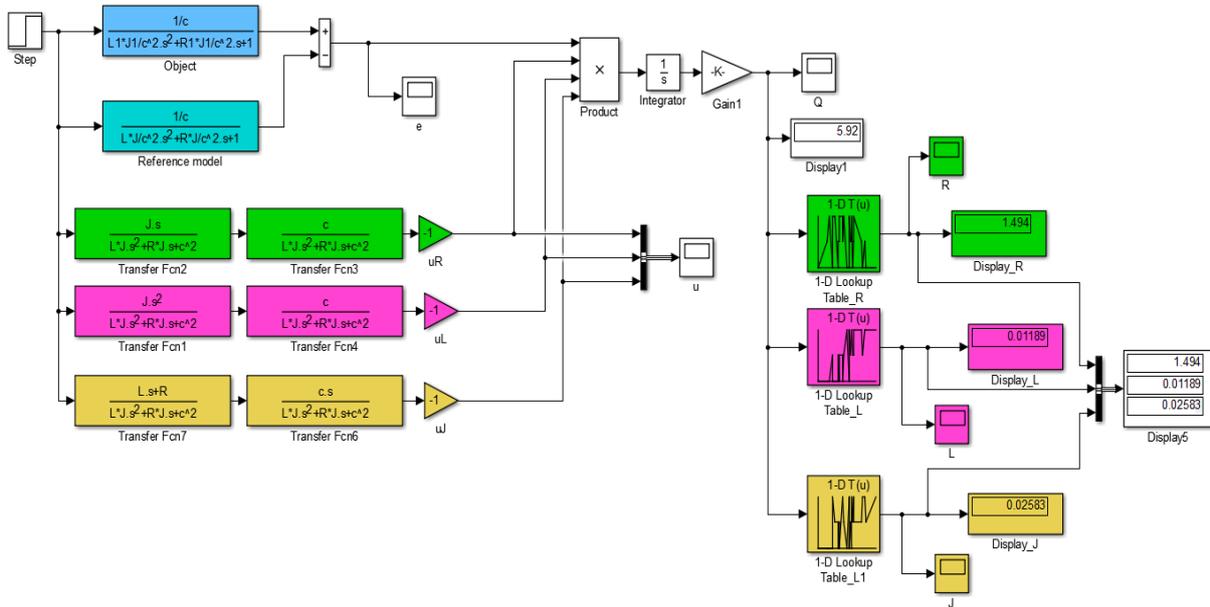


Рис. 6. *Simulink*-модель системы автоматизированного контроля параметров электромеханического преобразователя постоянного тока

Характеристики $R_{a,var} = f(Q_{\Sigma})$, $L_{a,var} = f(Q_{\Sigma})$, $J_{var} = f(Q_{\Sigma})$ реализованы в представленной *Simulink*-модели с помощью блоков одномерных интерполяционных табл. 1 – *D LookupTable* библиотеки *LookupTables*.

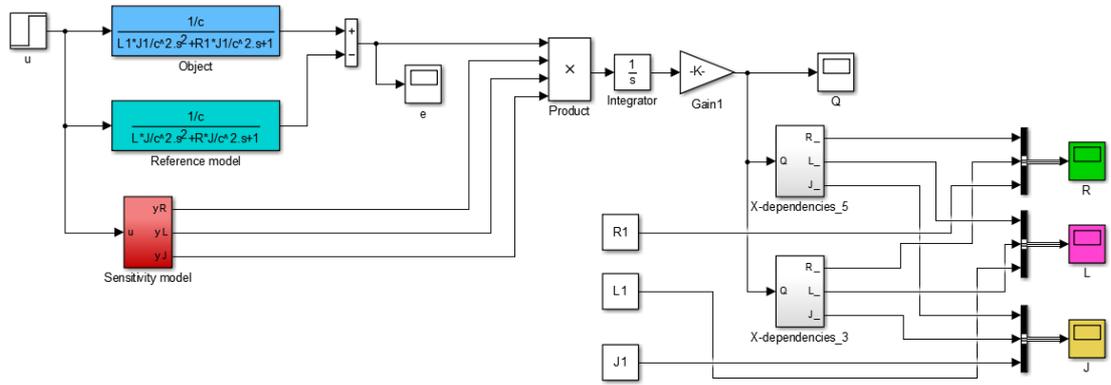


Рис. 7. Simulink-модель системы автоматизированного контроля параметров электромеханического преобразователя постоянного тока для случаев $\beta = 3$ и $\beta = 5$

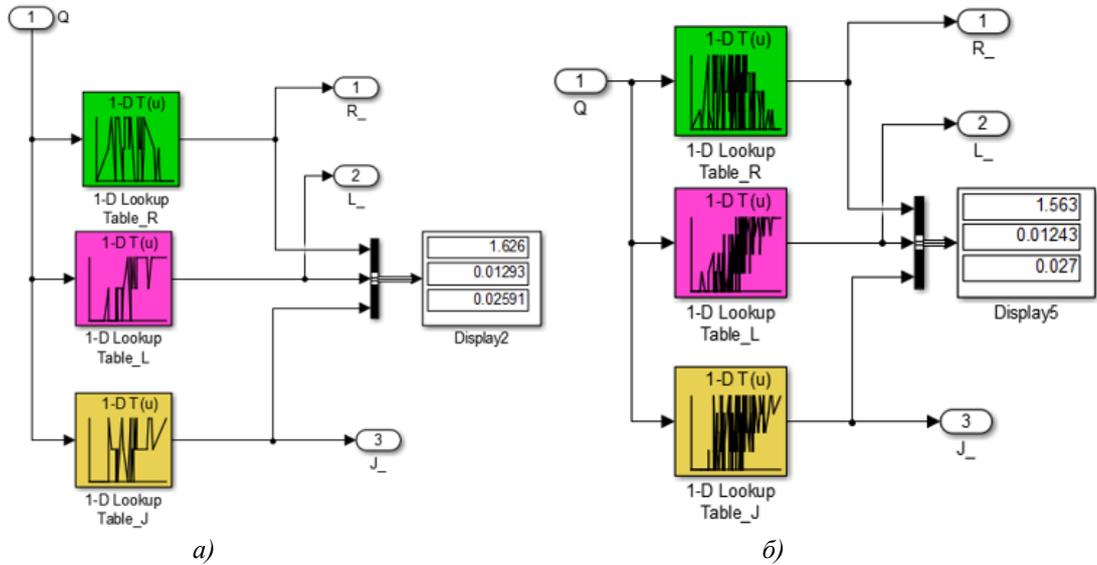


Рис. 8. Simulink-модель подсистем X-dependencies: а) $\beta = 3$; б) $\beta = 5$

Моделирование проводилось при следующих значениях параметров:

- $R=1,358; L=0,0108; J=0,0235; c=0,63;$
- $R1=1,15 \cdot R; \% 1,5617$
- $L1=1,15 \cdot L; \% 0,01242$
- $J1=1,15 \cdot J; \% 0,027025$

Графики, отражающие процесс текущего контроля параметров, показаны на рис. 9-11.

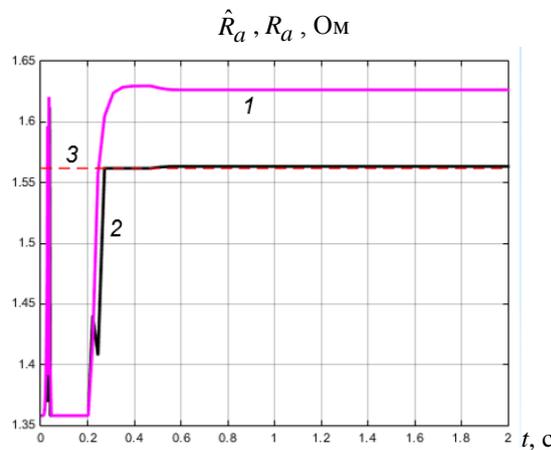


Рис. 9. Зависимости $\hat{R}_a = f(t)$: 1 – оценка активного сопротивления при $\beta = 3$; 2 – оценка активного сопротивления при $\beta = 5$; 3 – заданное значение активного сопротивления

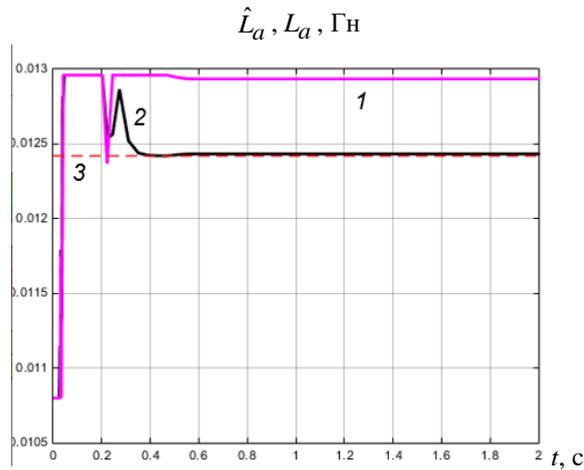


Рис. 10. Зависимость $\hat{L}_a = f(t)$: 1 – оценка индуктивности при $\beta = 3$; 2 – оценка индуктивности при $\beta = 5$; 3 – заданное значение индуктивности \hat{J} , кг·м²

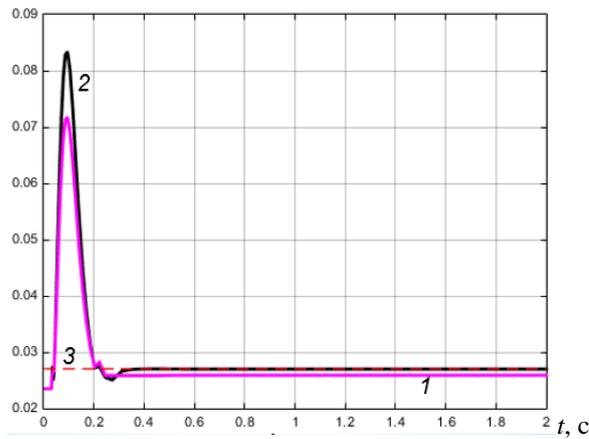


Рис. 11. Зависимость $\hat{J} = f(t)$: 1 – оценка момента инерции при $\beta = 3$; 2 – оценка момента инерции при $\beta = 5$; 3 – заданное значение момента инерции

Из анализа приведенных зависимостей следует, что процесс вычисления оценок параметров электромеханического преобразователя постоянного тока не превышает 0,6 с. Установившиеся значения оценок при $\beta = 3$ составили, соответственно: $\hat{R}_a = 1,637$ Ом; $\hat{L}_a = 0,01286$ Гн; $\hat{J} = 0,0263$, кг·м²; при $\beta = 5$ установившиеся значения оценок совпадают с заданными значениями нестабильных параметров.

Относительные погрешности вычисления нестабильных параметров при $\beta = 3$ $\delta_{R_a} = 4,82\%$; $\delta_{L_a} = 3,54\%$; $\delta_J = 2,68\%$ обусловлены тем, что моделирование проводилось не в «узловых» точках $\chi_{var} = f(\chi; 1,1\chi; 1,2\chi)$, а при изменениях параметров в 1,15 от эталонных значений, тогда как при $\beta = 5$ $\chi_{var} = f(\chi; 1,05\chi; 1,1\chi; 1,15\chi; 1,2\chi)$ моделирование было проведено при $\chi_{ivar} = 1,15\chi_i$, что обеспечило высокую точность оценки параметров двигателя постоянного тока.

Выводы

В настоящей работе рассмотрен метод автоматизированного контроля нестабильных параметров электромеханического преобразователя постоянного тока с применением эталонной модели объекта исследования и моделей чувствительности по активному сопротивлению, индуктивности якорной цепи и моменту инерции. Регистрируемой выходной координатой электромеханического преобразователя является скорость вращения. Метод основан на вычислении линейного интегрального критерия Q , являющегося функцией невязки ε , формировании Q – таблиц и построении χ – зависимостей, позволяющих осуществить оценку нестабильных параметров объекта исследования. Величина погрешности оценки контролируемых параметров на требуемом

интервале их изменения может быть снижена за счет уменьшения заданных отклонений параметров $\Delta\chi_i$ при вычислении линейного интегрального критерия. При этом в соответствии с (10) увеличится количество строк Q – таблицы k и, соответственно, точность контроля параметров объекта исследования. Эталонную модель, модели чувствительности по контролируемым параметрам, алгоритм вычисления линейного интегрального критерия, а также полученные в результате предварительного эксперимента χ – зависимости, целесообразно реализовать в цифровом представлении. На основе метода непосредственного программирования с применением формулы Тастина, и записать в виде программного кода микропроцессора, что обеспечит автоматизацию процесса контроля нестабильных параметров электромеханических преобразователей в режиме реального времени.

Литература

1. Саушев А.В., Широков Н.В. Диагностирование состояния электротехнических систем в пространстве параметрических элементов // Вестник ГУМРФ им. адм. С.О. Макарова. 2016. №. 2 (36), С. 143-156.
2. Faiz J., Ebrahimi B.V., Sharifian M.B. Different Faults and Their Diagnosis Techniques in Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motors: A Review // Electromagnetics. 2006. V. 26. №. 7. pp. 543-569.
3. Тоноян С.А., Балдин А.В., Елисеев Д.В. Прогнозирование технического состояния электронных систем с адаптивными параметрическими моделями // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Приборостроение. 2016. № 6. С.115-125.
4. Малёв Н.А., Мухаметшин А.И., Погодицкий О.В., и др. Экспериментально-аналитическая идентификация математической модели электромеханического преобразователя постоянного тока с применением метода наименьших квадратов. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019;21(4):113-122.
5. Малёв Н.А., Погодицкий О.В., Любарчук Ф.Н. Анализ вариаций параметров асинхронного электромеханического преобразователя по линейному интегральному критерию с применением эталонной модели // Вестник КГЭУ. 2019. №1. С. 60-67.
6. Xu Chen and Masayoshi Tomizuka. New repetitive control with improved steady-state performance and accelerated transient". In: IEEE Transactions on Control Systems Technology 22.2 (2014), pp. 664-675.
7. Гарькина И.А., Данилов А.М., Тюкалов Д.Е. Сложные системы: идентификация динамических характеристик, возмущений и помех // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1. Ч. 1. С. 88.
8. A. Gambier, E. Badreddin. Multi-objective optimal control: An overview, in: Proceedings of the 16th IEEE International Conference on Control Applications, Singapore. 2007. pp. 170-175.
9. Cacuci D.G., Fang R. Sensitivity and uncertainty analysis of counter-flow mechanical draft cooling towers I: Adjoint sensitivity analysis // Nuclear Technology. 2017. V. 198. N 2. pp. 85-131.
10. Томчина О.П., Кондратова М.Е., Горохов М.М., и тд. Адаптивный регулятор с нелинейной эталонной моделью – в сборнике: Научные достижения современной науки: новация, история, действительность, перспективы и практика реализации: Сборник научных статей по итогам международной научно-практической конференции. СПб.: Изд-во «Культ Информ Пресс», 2017. С. 206-208.
11. Guda A.I. Multi-model methods and parameters estimation approaches on non-linear dynamic system identification // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 4(99). Дніпропетровськ, 2015. С. 3-9.
12. Ramírez A., Garrido R., Mondié S. Integral Retarded Control Velocity Control of DC Servomotors, in IFAC TDS Workshop (Grenoble, France. 2013). Grenoble, 2013. pp. 558-563.
13. Vunder N.A., Ushakov A.V. Peaks emergence conditions in free movement trajectories of linear stable systems // Proc. 13th Int. Conf. on Informatics in Control, Automation and Robotics. 2016. V. 1. pp. 535-538.
14. Polyak B.T., Smirnov G. Large deviations for non-zero initial conditions in linear systems // Automatica. 2016. V. 74. pp. 297-307.
15. Furtat I., Fradkov A., Tsykunov A. Robust synchronization of linear dynamical systems with compensation of disturbances // Int. J. Robust and Nonlinear Control. 2014. V. 24, N. 17. pp. 2774-2784.
16. Kuhn Max and Kjell Johnson. "Applied predictive modeling". V. 26. New York: Springer, 2013.
17. Hastie T., Tibshirani R., and Friedman J. Unsupervised learning. In: The elements of statistical learning. New-York: Springer. 2009. pp. 485-585.
18. Afanasiev A.P., Sokolov A.V., Voloshinov V.V. "Inverse Problem in the Modeling on the Basis of Regularization and Distributed Computing in the Everest Environment" in Data Analytics and Management in Data Intensive Domains: Collection of Scientific Papers of the 19 International Conference

DAMDID / RCDL'2017 (October 10–13, 2017, Moscow, Russia), etc. Moscow: FRC CSC RAS, pp. 132-140.

19. Kim, S., Overbye, T. J. Mixed transient stability analysis using AC and DC models. *IEEE Trans. Power Syst.*, V. 31. N. 2. pp. 942-948.

20. Larsson C. A., Annergren M., Hjalmarsson H, et al. "Model predictive control with integrated experiment design for output error systems", in: *Proceedings of European Control Conference, Zurich, Switzerland. 2013.* pp. 3790-3795.

Авторы публикации

Малёв Николай Анатольевич – доцент кафедры Приборостроение и мехатроника, Казанский государственный энергетический университет.

Погодицкий Олег Владиславович – канд. техн. наук, доцент кафедры Приборостроение и мехатроника, Казанский государственный энергетический университет.

Малацион Алексей Сергеевич – канд. техн. наук, начальник отдела автоматизации ООО «Стэк Мастер».

References

1. Saushev AV, Shirokov NV. Diagnosis of the state of electrical systems in the space of parameters of their elements. *Bulletin of the.* 2016;2 (36):143-156.

2. Faiz J, Ebrahimi BV, Sharifian MB. Different Faults and Their Diagnosis Techniques in Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motors: A Review. *Electromagnetics.* 2006;26(7):543-569.

3. Tonoyan SA, Baldin AV, Eliseev DV. *Technical State Prediction of Electronic Systems with Adaptive Parametric Models.* Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng., 2016;6:115-125.

4. Malev NA, Mukhametshin AI, Pogoditsky OV, et al. Experimental-analytical identification of a mathematical model of a dc motor using the least squares method. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2019;21(4):113-122.

5. Malev NA, Pogoditsky OV, Lyubarchuk FN. Analysis of changes in the parameters of an asynchronous motor by a linear integral criterion using a reference model. *Bulletin of KSPEU.* 2019;1:60-67.

6. Xu Chen and Masayoshi Tomizuka. New repetitive control with improved steady-state performance and accelerated transient". In: *IEEE Transactions on Control Systems Technology.* 2014. pp. 664-675.

7. Garkina IA, Danilov AM, Tyukalov DE. Complex systems: identification of dynamic characteristics, disturbances and interferences. *Modern problems of science and education.* 2015;1:88. Pt 1.

8. Gambier A., Badreddin E. Multi-objective optimal control: An overview in: *Proceedings of the 16th IEEE International Conference on Control Applications, Singapore, 2007,* pp. 170-175.

9. Cacuci DG., Fang R. Sensitivity and uncertainty analysis of counter-flow mechanical draft cooling towers – I: Adjoint sensitivity analysis. *Nuclear Technology.* 2017;198(2):85-131.

10. Tomchina OP, Kondratova ME, Gorokhov M.M., et al. An adaptive controller with a nonlinear reference model – in the collection: Scientific achievements of modern science: novation, history, reality, prospects and implementation practice: *Collection of scientific articles based on the results of an international scientific and practical conference.* St. Petersburg: Publishing House "KultInform-Press", 2017. pp. 206-208.

11. Guda AI, Mikhalyov AI. Multi-model methods and parameters estimation approaches on non-linear dynamic system identification. System technology. *Regional interuniversity collection of scientific papers.* Dnepropetrovsk, 2015;4 (99):3-9.

12. Ramirez A, Garrido R, Mondié S. *Integral Retarded Control Velocity Control of DC Servomotors, in IFAC TDS Workshop (Grenoble, France. 2013).* Grenoble, 2013. pp. 558-563.

13. Vunder NA., Ushakov AV. Peaks emergence conditions in free movement trajectories of linear stable systems. *Proc. 13th Int. Conf. on Informatics in Control, Automation and Robotics.* 2016;1:535-538.

14. Polyak BT., Smirnov G. Large deviations for non-zero initial conditions in linear systems. *Automatica.* 2016;74:297-307.

15. Furtat I, Fradkov A, Tsykunov A. Robust synchronization of linear dynamical systems with compensation of disturbances. *Int. J. Robust and Nonlinear Control.* 2014;24(17):2774-2784.

16. Kuhn Max and Kjell Johnson. Applied predictive modeling. 2013. V. 26. New York: Springer.

17. Hastie T, Tibshirani R, and Friedman J. Unsupervised learning. *The elements of statistical learning. New-York: Springer,* 2009. pp. 485-585. doi:10.1007/978-0-387-84858-7.

18. Afanasiev AP, Sokolov AV, Voloshinov VV. Inverse Problem in the Modeling on the Basis of Regularization and Distributed Computing in the Everest Environment in *Data Analytics and Management in*

Data Intensive Domains: *Collection of Scientific Papers of the 19 International Conference DAMDID / RCDL'2017* (October 10–13, 2017, Moscow, Russia), etc. Moscow: FRC CSC RAS. 2017. pp. 132-140.

19. Kim S, Overbye TJ. Mixed transient stability analysis using AC and DC models. *IEEE Trans. Power Syst.* 2016;31(2):942-948.

20. Larsson CA, Annergren M, Hjalmarsson H, et al. Model predictive control with integrated experiment design for output error systems. *Proceedings of European Control Conference, Zurich, Switzerland, 2013.* pp. 3790-3795.

Authors of the publication

Nikolai A. Malev – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. E mail: maleev@mail.ru.

Oleg V. Pogoditsky – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Malacion S. Alexey – LLC «Stek Master», Kazan, Russia.

Поступила в редакцию

05.02.2020г.