

НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПРИ ВНЕШНИХ ИМПУЛЬСНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ*

С.Г. Воронин, Д.А. Курносов, П.О. Шабуров
г. Челябинск, ЮУрГУ

RELIABILITY OF SYSTEMS OF THE ELECTRIC DRIVE AT EXTERNAL PULSE INFLUENCES

S.G. Voronin, D.A. Kurnosov, P.O. Shaburov
Chelyabinsk, South Ural State University

Показан процесс распространения импульсного воздействия для моделирования изменения надёжности системы под влиянием внешнего импульсного возмущения. Для заданной принципиальной схемы привода составлен граф исследуемой системы и проведены результаты численного эксперимента при приложении возмущения к некоторым вершинам графа системы.

Ключевые слова: надёжность, импульсное воздействие, граф, электропривод, контур графа, дискретные моменты времени.

The process of pulse influence distribution for simulation of change of the system reliability under the influence of external pulse indignation is shown. The graph of the investigated system for the principal drive circuit is made, the numerical experiment results obtained when opposing the oscillation to some points of the graph system are given.

Keywords: reliability, pulse influence, graph, electric drive, graph contour, discrete-time points.

Поставим задачу прогноза характеристик надёжности электропривода, как некоторой абстрактной системы в конкретных условиях применения с учётом действующих внешних возмущений. От модели надёжности потребуем, чтобы она содержала динамическую модель распространения внешних воздействий в системе и оценку их влияния на показатели надёжности отдельных элементов и системы в целом.

В этой связи продуктивным является подход к моделированию надёжности систем, предлагаемый рядом авторов [1, 2, 3]. Для формализации отношений между элементами системы используется аппарат дискретной математики и теория графов. От модульной структуры переходят к графам. При этом считаются тождественными следующие понятия: граф системы и структура системы, вершина графа и элемент системы, ребро графа и связь между элементами системы. Проведём исследование надёжности системы с этих позиций.

В качестве показателя надёжности элемента

системы примем *вероятность безотказной работы*, т. е. вероятность $P(t < T)$ того, что элемент не откажет до момента времени T с начала эксплуатации [1]. Возможно использование других показателей надёжности.

Предположим, что импульсное воздействие при прохождении от одного элемента к другому затухает. Это соответствует реальной физической картине процессов отказов и сбоев.

Начальную надёжность элементов системы и степень затухания воздействия при переходе от одного элемента к другому можно получить расчётным путём, экспериментально или на основании экспертного анализа.

Таким образом, на орграфе $G = (V, E)$ системы для вершин $V = \{v_i\}$, $i = \overline{1, n}$, весами

$$w_i(t) = P_{v_i}(t < T) \quad (1)$$

являются величины надёжности элементов системы, а весом дуг

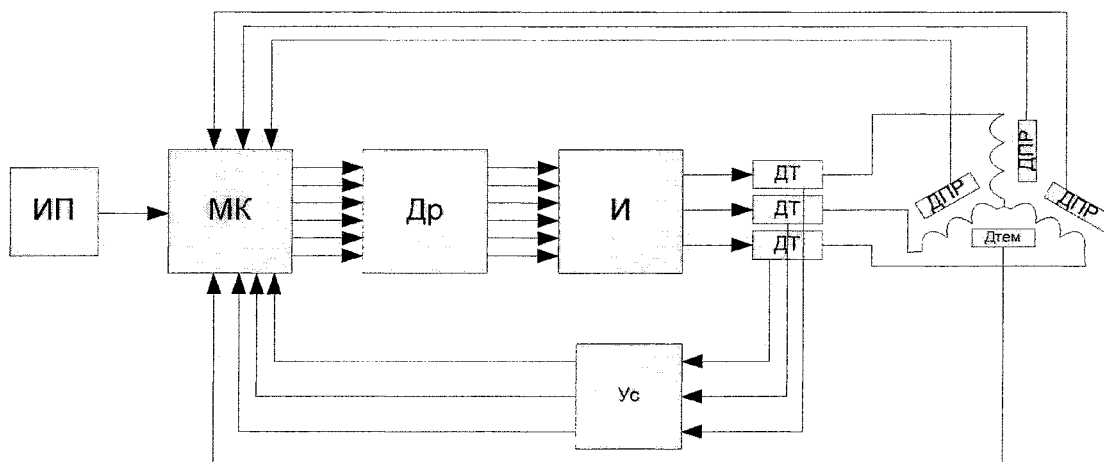
*По материалам НИР, выполняемой в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры России» на 2009–2013 годы по государственному контракту от 1 сентября 2010 года №14.740.11.0029.

где $(v_i, v_j) \in E$, являются числа $0 < \epsilon_{ij} \leq 1$, равные доле передаваемого воздействия при переходе от вершины v_i к вершине v_j .

$$\text{imp}(t+1) = \text{imp}(t) \cdot A_{\text{e}} , \quad (3)$$
$$A_{\varepsilon_{l,j}} = A_{i,j} \cdot \varepsilon_{l,j}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, n}. \quad (4)$$
$$w(t+1) = w(t) \cdot \Delta(t), \quad (5)$$
$$\Delta(t) = \text{diag} \left\{ [\text{imp}(t) + 1]^T \right\}. \quad (6)$$
$$\text{imp}_i(t+1) = \sum_{j=1}^n A_{j,i} \cdot \varepsilon_{j,i} \cdot \text{imp}_j(t), \quad i = \overline{1, n}; \quad (7)$$

$$w_i(t+1) = w_i(t) \cdot \lceil \text{imp}_i(t) + 1 \rceil, \quad i = \overline{1, n}. \quad (8)$$

Проиллюстрируем изложенную методику на примере электропривода с вентильным двигателем постоянного тока [4]. Функциональная схема привода представлена на рис. 1. От функциональной схемы перейдем к оргграфу. Следует отметить, что



41

такой переход до конца не формализован и является творческим процессом [1]. Он требует привлечения специалистов как в области электропривода, электромеханики, мехатроники, электротехники, так и в области надёжности и теории систем. В любом случае, это экспертное сообщество найдёт приемлемый вариант такого преобразования.

В данном случае, учитывая взаимную связь элементов функциональной схемы с точки зрения функционирования привода и взаимной зависимости его элементов, без дополнительных пояснений представим оргграф в виде рис. 2.

Проведём исследование представленного оргграфа. Исследованию подлежат структурные особенности графа, которые существенно влияют на характеристики надёжности системы, на её живучесть и стойкость. К таким особенностям можно отнести связность графа, наличие контуров, уязвимость вершин графа, длины путей и маршрутов и др.

Оргграф системы имеет 14 вершин ($n=14$) и 23 дуги ($m=23$), т.е. мы имеем (14,23)-граф.

Приведём матрицу смежности оргграфа размером 14×14 :

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

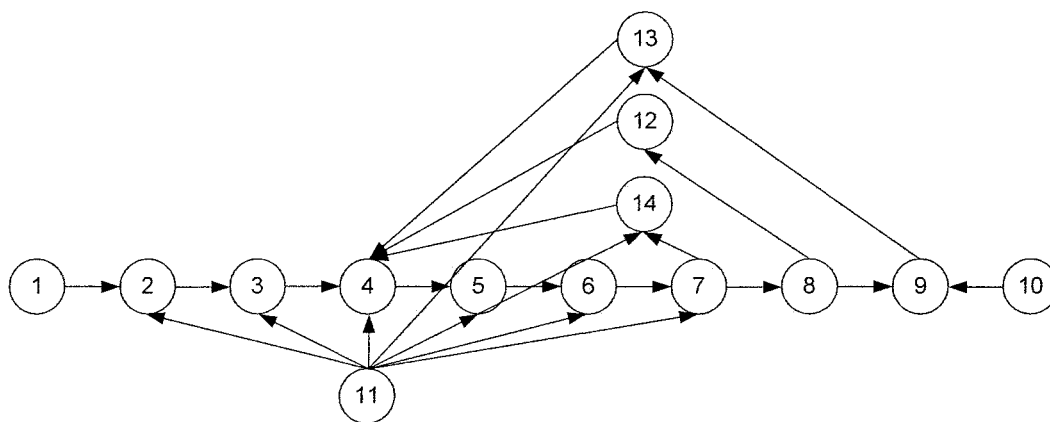


Рис. 2. Граф исследуемой системы:

1 – система верхнего уровня; 2 – интерфейс RS-485; 3 – гальваническая развязка; 4 – микроконтроллер; 5 – драйвер; 6 – полупроводниковые ключи; 7 – датчик тока; 8 – обмотка; 9 – ротор; 10 – нагрузка; 11 – источники питания; 12 – датчик температуры обмотки; 13 – датчик положения ротора; 14 – усилитель тока

Вершины 1, 10 и 11, составляющие базу, соединены *полупутьм*. Такой граф является *слабым*.

У оргграфа существует *сильная компонента связности* – максимально сильный подграф. Вершины с 4-й по 9-ю и с 12-й по 14-ю ($v_4, v_5, v_6, v_7, v_8, v_9, v_{12}, v_{13}, v_{14}$) входят в орцикл. Все они взаимно достижимы. Этот орцикл включает три простых цикла ($(v_4, v_5, v_6, v_7, v_{14}, v_4)$, $(v_4, v_5, v_6, v_7, v_8, v_{12}, v_4)$, $(v_4, v_5, v_6, v_7, v_8, v_9, v_{13}, v_4)$).

Остановимся более детально на анализе влияния контуров системы на её *структурную уязвимость*. Распространяясь по системе, импульсное возмущение, уменьшив надёжность хотя бы одного элемента какого-либо контура графа, уменьшит надёжность и всех остальных элементов контура. Сильно связанные компоненты графа, состоящие из всевозможных контуров (в нашем случае, трех), являются *особо слабыми местами* в структуре системы.

3-й контур (в порядке перечисления) является *изолированным*. 1-й и 2-й являются *промежуточными*, но именно они являются самыми проблемными. Дело в том, что 1-й имеет шесть, а 2-й – пять входов, и оба имеют лишь по одному выходу. Такие контуры можно назвать *«аккумулирующими»*. Кроме того, 1-й контур «вложен» во 2-й, а 2-й в свою очередь «вложен» в 3-й контур. «Вложенность» контуров также является структурной особенностью этой системы.

Теперь охарактеризуем вершины, входящие в контуры системы. Их, напомним, девять из четырнадцати. Вершины 4, 5, 6, 7 «входят» в три (!) контура. Вершина 8 – в два контура. Остальные четыре вершины (9, 12, 13 и 14) – в один контур. Вершины графа 4, 5, 6, 7 обладают *наивысшей структурной уязвимостью*. Они охвачены наибольшим количеством контуров, причём два из них «аккумулирующего» типа и один изолированный. Далее заслуживают внимания сопряжённые (смежные) с ними вершины: 8 и 14.

В целом, необходимо отметить, что наибольшие

проблемы в нашем случае доставляют «аккумулирующие» контуры. Причём, для нашей системы они концентрически «стягиваются» к контуру 1. Этот «контур концентрации» стягивается в свою очередь в вершину конденсации графа.

По-видимому, чем ближе прикладывается импульсное возмущение к этой «точке концентрации» графа, тем разрушительнее его последствия. Эффект автономного импульсного воздействия многократно усиливается вложенными друг в друга контурами «аккумулирующего» типа.

Таким образом, в нашем случае основные усилия по повышению надёжности, живучести и стойкости системы должны быть сосредоточены в подграфе (v4, v5, v6, v7, v8, v9, v12, v13, v14). Необходимо максимально возможным образом *нейтрализовать* отрицательное воздействие сильно связанных компонент орграфа системы.

Следует отметить, что время распространения простого импульсного воздействия по орграфу равно длине его максимального простого пути [3, 5]. Изменения надёжности элементов системы в этот интервал времени вызваны автономным импульсным воздействием. Но, как показали расчёты, изменение надёжности происходит и далее. Все изменения надёжностей элементов, происходящие после этого интервала, являются *остаточными* и порождены собственно контуром, как *внутренним* источником импульсных воздействий. Прекращение распространения импульсного воздействия по орграфу возможно только при нейтрализации его контуров обратной связи [2].

При моделировании надёжности используется модель системы (1–8). Результаты моделирования сведены в таблицы. Показатели надёжности элементов в дискретные моменты времени отображаются в столбцах таблиц. Для наглядности и удобства исследования принята равная начальная надёжность элементов: $w_i(0) = P_{vi}(0 < T) = 0,999$;

$i = \overline{1, 14}$. Значения критического уровня надёжности элементов также приняты равными: $cr(v_i) = 0,9$; $i = \overline{1, 14}$. Моменты достижения эле-

ментами системы критических уровней выделены цветом. Приведено начальное значение простого импульсного воздействия и указана вершина графа, к которому оно приложено. «Затуханием» назван вес дуг графа, равный доле передаваемого воздействия при переходе от одной вершины к другой. Здесь для удобства исследования приняты одинаковые весовые коэффициенты. Таким образом, при моделировании принята несколько более простая модель, нежели (1–8), а именно следующая:

$$A_{ei,j} = A_{i,j} \cdot \varepsilon, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, n}, \varepsilon = \text{const},$$

$0 < \varepsilon \leq 1$. Повторим, здесь это сделано только для удобства последующего анализа. Использование «взвешенной» матрицы смежности в модели надёжности, по нашему мнению, очень удачная находка. Величина затухания выбрана 0,75.

В первом опыте (табл. 1) простое импульсное воздействие (–0,05) приложено к вершине 11 (сбой в работе источника питания).

На 3-м шаге распространения внешнего импульса 4-я вершина (микроконтроллер) достигла критического уровня, далее на 4-ом шаге критический уровень у драйвера (вершина 5), на 5-м – у вершины 6 (полупроводниковые ключи), после 10 «дискрет» критического уровня достигли шесть вершин, относящихся к сильной компоненте связности (шесть из девяти).

Второй опыт (табл. 2) демонстрирует процесс распространения импульсного воздействия, приложенного к нагрузке 10 (сбой со стороны нагрузки). Характеристики воздействия те же, что и в первом опыте. Система полностью «справилась» с импульсным воздействием. Ни один элемент не достиг критического уровня надёжности.

Можно также отметить эффект, отмеченный рядом авторов, первоочередного выхода из строя элементов, не получивших импульс воздействия непосредственно. Этот эффект связан со структурными особенностями системы, наличием контуров.

Можно также констатировать существенное влияние на процесс распространения импульсного воздействия по системе точки приложения просто-

Таблица 1

	w0	w1	w2	w3	w4	w5	w6	w7	w8	w9	w10
v1	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999
v2	0,999	0,999	0,9615	0,9615	0,9615	0,9615	0,9615	0,9615	0,9615	0,9615	0,9615
v3	0,999	0,999	0,9615	0,9345	0,9345	0,9345	0,9345	0,9345	0,9345	0,9345	0,9345
v4	0,999	0,999	0,9615	0,8804	0,8433	0,8166	0,7875	0,7665	0,7409	0,7187	0,6998
v5	0,999	0,999	0,9615	0,9345	0,8754	0,8477	0,8275	0,8055	0,7893	0,7696	0,7522
v6	0,999	0,999	0,9615	0,9345	0,9148	0,8714	0,8507	0,8355	0,8188	0,8065	0,7914
v7	0,999	0,999	0,9615	0,9345	0,9148	0,9003	0,8683	0,8528	0,8414	0,8288	0,8195
v8	0,999	0,999	0,999	0,9709	0,9504	0,9354	0,9243	0,8996	0,8876	0,8787	0,8688
v9	0,999	0,999	0,999	0,999	0,9779	0,9625	0,951	0,9426	0,9237	0,9145	0,9076
v10	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999
v11	0,999	0,949	0,949	0,949	0,949	0,949	0,949	0,949	0,949	0,949	0,949
v12	0,999	0,999	0,999	0,999	0,9779	0,9625	0,951	0,9426	0,9237	0,9145	0,9076
v13	0,999	0,999	0,9615	0,9615	0,9615	0,99463	0,9351	0,9268	0,9206	0,9068	0,9
v14	0,999	0,999	0,9615	0,9345	0,9148	0,9003	0,8896	0,8659	0,8543	0,8458	0,8362

Таблица 2

	w0	w1	w2	w3	w4	w5	w6	w7	w8	w9	w10
v1	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999
v2	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999
v3	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999
v4	0,999	0,999	0,999	0,999	0,9779	0,9779	0,9779	0,9779	0,9779	0,973	0,9694
v5	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,9832	0,9832	0,9832	0,9832	0,9832	0,9795
v6	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,9871	0,9871	0,9871	0,9871	0,9871
v7	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,9901	0,9901	0,9901	0,9901
v8	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,9923	0,9923	0,9923
v9	0,999	0,999	0,9615	0,9615	0,9615	0,9615	0,9615	0,9615	0,9615	0,9567	0,9567
v10	0,999	0,949	0,949	0,949	0,949	0,949	0,949	0,949	0,949	0,949	0,949
v11	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999
v12	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,994	0,994
v13	0,999	0,999	0,999	0,9709	0,9709	0,9709	0,9709	0,9709	0,9709	0,9709	0,9709
v14	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,9923	0,9923	0,9923

го импульса. Ущерб, как и предполагалось ранее, при смещении точки приложения по направлению к «точке концентрации» увеличивается, элементы системы раньше достигают критических уровней надёжности, стойкость системы падает.

Моделирование также подтверждает мысль, что, если место приложения импульса не принадлежит вершинам, относящимся к сильным компонентам связности, то прохождение импульса протекает относительно благоприятно. Импульсное воздействие, приложенное вне контуров (циклов) быстро затухает и не наносит существенного ущерба, если только не выведет из «работы» вершину, к которой приложено.

На характер распространения импульсного воздействия и, особенно, на его последствия существенно влияет «коэффициент затухания». Если система обладает большими *амортизирующими свойствами* (большим затуханием), то она легче «справляется» с импульсным воздействием, ущерб от внешнего импульсного воздействия снижается.

Предыдущий анализ и последующее моделирование выявили наиболее уязвимые места системы. Здесь возможно использование более надёжных комплектующих и использование резервирования. Однако эти меры полностью не решают проблему структурной стойкости. Можно показать, что при определённых условиях может выйти из строя наиболее надёжный элемент системы. Всё определяется структурой системы и местом этого элемента в структуре.

Меры по повышению надёжности системы, её стойкости к внешним воздействиям должны носить комплексный характер. Эти меры могут быть структурного, схемного (аппаратного), технологического, алгоритмического, программного характера и др.

Изменение структуры системы существенно изменяет её характеристики надёжности. Необходимо изменение порядка связей среди элементов системы с целью повышения её стойкости или улучшение значения некоторых из структурных параметров системы.

Отдельная тема – нейтрализация контуров. Выход из строя контурообразующего элемента остановит циркуляцию импульсного воздействия, что приведёт в конечном итоге к затуханию возмущения. Смена направления дуг, входящих в контур, также эффективна. Но эти «решения» не должны нарушать функционирование системы и должны быть реализуемы с инженерных позиций. Необходимо предусматривать в системе *механизмы* препятствующие распространению импульсных воздействий различной природы, снижающие их разрушительную силу.

Схемные меры могут быть связаны с развязкой контуров, дублированием элементов, резервированием, использованием специальных средств помехозащиты, радиаторов, гасителей вибрации и т. д. Эти меры в какой-то части перекликаются со структурными изменениями.

Технологические меры повышения надёжности это вообще отдельный разговор. Здесь и изготовление двигателя, и трассировка плат и др.

Арсенал алгоритмических и программных средств также очень широк: усреднение, «сбрасывание», «встряхивание», отбраковка, введение уставок и «коридоров», кодирование, шифрование, контрольное суммирование, введение «зоны нечувствительности» в алгоритмы и т.д.

По-видимому, в системе должен быть *диагностический модуль*. Он может быть реализован как аппаратно (второй микроконтроллер, возможно с автономным питанием), так и программно. Он может располагаться как в системе верхнего уровня, так и в самой диагностируемой системе. (Целесообразно, по-видимому, распределять диагностические функции по разным уровням управления). Диагностический модуль должен на основании формальных параметрических (информационных) критериев предостказной (кризисной) ситуации (повысилась температура, выросли вибрации, ток превысил допустимый предел, изменился типичный характер процесса функционирования и т.д.) объявлять «*чрезвычайное положение*» и вводить «*чрезвычайные*» меры по управлению системой.

Литература

1. Животкевич, И.Н. Надежность технических изделий / И.Н. Животкевич, А.П. Смирнов. – М.: Олита, 2003.
2. Кочкаров, А.А. Обеспечение стойкости сложных систем. Структурные аспекты / А.А. Кочкаров, Г.Г. Малинецкий. – Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. – М., 2005.
3. Курносов, Д.А. Оптимальное проектирование бинарных древовидных структур / Д.А. Курносов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энер-

гетика». – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004.

4. Пат. 81399 Российская Федерация, МПК⁷ Н 02 Р 6/08. Интеллектуальный мехатронный модуль управления электроприводом запорной арматурой / С.Г. Воронин, П.О. Шабуров, Д.В. Коробатов, А.Н. Кононов, Н.А. Кононов, И.С. Антонов. – № 2008138680/22; заявл. 29.09.2008; опубл. 13.03.2009, Бюл. № 7.
5. Емеличев, В.А.. Лекции по теории графов / В.А. Емеличев, О.И. Мельников, В.И. Сарванов. – М.: Наука, 1990.

Поступила в редакцию 15.09.2010 г.

Воронин Сергей Григорьевич. Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электромеханики и электромеханических систем, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск. Научные интересы связаны с решением вопросов управления дискретным электроприводом на основе вентильных двигателей. Контактный телефон: 8(351) 267-91-72.

Sergey Grigorievich Voronin is Dr.Sc. (Engineering), Professor, Head of the Electromechanics and Electromechanical Systems Department of South Ural State University, Chelyabinsk. Research interests: design of valve electric drives with direct current. Tel: 8(351) 267-91-72.

Курносов Дмитрий Александрович. Канд. техн. наук, доцент кафедры электромеханики и электромеханических систем, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск. Научные интересы связаны с системами автоматического управления электроприводами. Контактный телефон: 8(351)267-91-72.

Dmitry Aleksandrovich Kurnosov is Cand. Sc. (Engineering), Associate Professor of the Electromechanics and Electromechanical Systems Department of South Ural State University, Chelyabinsk. 454080, 76 Lenin Prospect. Tel.: 8(351) 267-91-72.

Шабуров Павел Олегович. Канд. техн. наук, доцент кафедры электромеханики и электромеханических систем, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск. Научные интересы связаны с разработкой интеллектуальных алгоритмов управления электроприводами на основе вентильных двигателей. Контактный телефон: 8(351) 267-91-72.

Pavel Olegovich Shaburov is Cand. Sc. (Engineering), Associate Professor of the Electromechanics and Electromechanical Systems Department of South Ural State University. Research interests: design of the intellectual algorithms of control of electric drives on the basis of valve engines. 454080, Chelyabinsk, 76 Lenin Prospect. Tel.: 8(351) 267-91-72.