

А. Ю. Ивойлов, аспирант, iau13hv@mail.ru, В. А. Жмудь, д-р техн. наук, доц.,
В. Г. Трубин, ст. преподаватель,
Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск

Методика определения параметров двигателя постоянного тока

Рассматривается методика получения математической модели двигателя постоянного тока. Несмотря на то, что классическая математическая модель широко известна и хорошо изучена, нередко возникает необходимость ее уточнения и определения ее параметров экспериментальным путем. В технической документации не всегда могут быть указаны все интересующие параметры двигателя, иногда о двигателе может не быть вообще никакой информации. К тому же на практике в реальном двигателе могут присутствовать особенности, которые не учитывает классическая модель. В начале статьи рассматривается традиционная модель двигателя, его статические и динамические характеристики. Выявляются параметры модели, которые необходимо определить экспериментально. Далее проводится анализ особенностей, которые отличают поведение реального двигателя от поведения, предсказываемого моделью. К таким особенностям можно отнести работу коллекторного узла привода, особенности его геометрии и влияние редуктора. Путем проведения различных экспериментов изучается влияние этих особенностей на работу двигателя и определяются условия, при которых следует получать параметры его модели. Далее на основе проведенного анализа предлагается методика получения математической модели. В основе методики лежит экспериментальное определение соотношений тока и крутящего момента с одной стороны, и приложенного напряжения и скорости вращения — с другой стороны. При этом методика учитывает влияние трения вала двигателя, которое возрастает при наличии нагрузки на нем. Предлагается способ компенсации этого эффекта для исключения его влияния на результат определения математической модели. Далее приводится пример применения описанной методики для определения параметров модели сервопривода Lego NXT Motor. Представлены численные значения параметров и графические данные. В завершение проводится сравнение поведения реального двигателя и поведения, рассчитанного по модели, полученной ранее. В качестве демонстрационной системы используется система автоматического управления углом поворота вала двигателя на основе пропорционального регулятора.

Ключевые слова: двигатель постоянного тока, системы автоматического управления, математическая модель, экспериментальное определение характеристик, особенности модели

Введение

В настоящее время широкое применение во многих областях автоматизации находят различные типы электроприводов постоянного тока. Примером могут служить роботизированные устройства или лабораторные стенды, в которых они применяются в качестве исполнительных механизмов. В большинстве случаев для разработки системы автоматического управления объектом необходима математическая модель привода. Степень ее точности и необходимость учета различных эффектов зависит от конкретной задачи. Однако на практике не всегда доступна информация обо всех интересующих параметрах электродвигателя. Нередко в технической документации приводятся лишь основные параметры привода, такие как номинальное напряжение, момент и частота вращения. При этом, например, данные об активном сопротивлении обмоток и их индуктивности, моменте инерции вала двигателя могут отсутствовать. Это обстоятельство

может быть существенным, поскольку данные параметры определяют динамические свойства двигателя и, следовательно, могут иметь большое значение при проектировании системы автоматического управления. Особенно остро эта проблема проявляется при проектировании прототипов устройств, когда в качестве привода может применяться двигатель, который есть в наличии и о котором неизвестно вообще ничего. В связи с этим возникает задача определения параметров двигателя, необходимых для получения его математической модели.

Математическая модель двигателя постоянного тока в настоящее время хорошо изучена и описана во многих работах, например, в [1, 2]. В работе [3] приводится способ получения уравнений математической модели двигателя при проектировании системы автоматического управления. Кроме того, реальный привод может обладать рядом особенностей, таких как наличие редуктора, особенности работы коллекторного узла и др., усложняющих его мо-

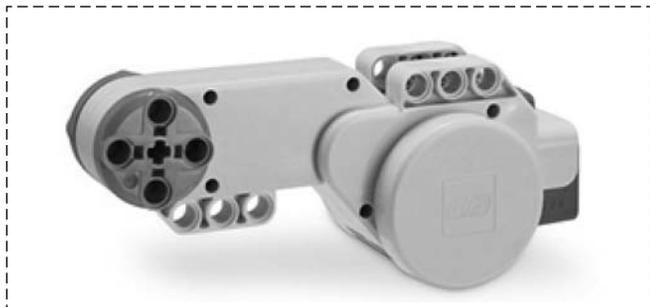


Рис. 1. Двигатель Lego NXT Motor

дель. Эти особенности могут оказывать существенное влияние на работу конечной системы и потому должны быть учтены. В данной работе рассмотрена методика определения параметров математической модели двигателя постоянного тока (ДПТ) с учетом наличия особенностей, встречающихся в реальных устройствах, проведена оценка степени линейности модели. В качестве примера в статье рассматривается сервопривод *NXT Lego Motor* (рис. 1). Это устройство представляет собой электропривод постоянного тока с постоянными магнитами. В сервопривод встроены редуктор и квадратный энкодер, который имеет 360 отсчетов на период и значительно упрощает оценку угла и скорости вращения вала.

Классическая модель двигателя постоянного тока

В данном разделе приведены теоретические соотношения, описывающие поведение двигателя постоянного тока. Классическая модель ДПТ включает следующие уравнения:

$$U = L \frac{di}{dt} + Ri + E; \quad (1)$$

$$E = K_e \omega; \quad (2)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_m - M_L - M_f; \quad (3)$$

$$M_m = K_T i. \quad (4)$$

В табл. 1 приведены параметры модели ДПТ, их физический смысл и единицы измерений. Отметим также, что в общем случае момент трения двигателя M_f включает статический момент, определяемый внутренним трением

Параметры модели ДПТ

Обозначение	Физический смысл	Единица
U	Напряжение на обмотках двигателя	В
E	ПротивоЭДС	В
i	Ток в обмотках двигателя	А
ω	Скорость вращения вала двигателя	рад·с ⁻¹
M_m	Крутящий момент двигателя	Н·м
M_L	Момент нагрузки на валу двигателя	Н·м
M_f	Момент трения	Н·м
L	Индуктивность обмоток двигателя	Гн
R	Сопротивление обмоток двигателя	Ом
J	Момент инерции вала двигателя	кг·м ²
K_e	Коэффициент передачи скорости	В·с·рад ⁻¹
K_T	Коэффициент передачи тока	Н·м·А ⁻¹

ротора и элементов редуктора, и дополнительный момент сухого трения, создаваемый внешней нагрузкой на валу. Значение этого момента определяется нагрузкой, свойствами вала и редуктора двигателя, а также конструкцией устройства, в котором применяется ДПТ. Подробнее этот вопрос будет рассмотрен ниже.

Статические свойства ДПТ (т. е. свойства в установившемся режиме) определяются параметрами K_T , K_e и R . Уравнение, описывающее поведение ДПТ в установившемся режиме, выводится из основных соотношений при условии $\frac{d\omega}{dt} = 0$ и $\frac{di}{dt} = 0$:

$$\omega = \frac{1}{K_e} U - \frac{R}{K_T K_e} (M_L + M_f). \quad (5)$$

Данное соотношение описывает семейство механических характеристик ДПТ. Динамические свойства ДПТ (постоянные времени переходного процесса) определяются величинами L и J . Следует отметить, что величина J включает не только момент инерции вала ДПТ, но и момент инерции нагрузки, и этот факт необходимо учитывать. Для описания динамики поведения ДПТ выведем передаточную функцию из соотношений (1)–(4), подставив выражение (2) в уравнение (1) и выражение (4) в уравнение (3), принимая $M_L = 0$ и $M_f = 0$:

$$U = L \frac{di}{dt} + Ri + K_e \omega; \quad (6)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = K_T i. \quad (7)$$

Подставляя оператор дифференцирования $p = \frac{d}{dt}$ в уравнения (6)–(7), после чего подставляя (7) в (6), получим

$$U = \left(\frac{LJ}{K_T} p^2 + \frac{RJ}{K_T} p + K_e \right) \omega,$$

откуда

$$W(p) = \frac{\omega}{U} = \frac{1/K_e}{p^2 T_3 T_M + p T_M + 1}, \quad (8)$$

где

$$T_3 = \frac{L}{R}; T_M = \frac{RJ}{K_T K_e}.$$

Для ДПТ, как правило, $T_3 \ll T_M$. В этом случае выражение (8) можно преобразовать к следующему виду:

$$W(p) = \frac{\omega}{U} = \frac{1/K_e}{(T_3 p + 1)(T_M p + 1)}.$$

При этом переходный процесс имеет ярко выраженные быструю и медленную составляющие, каждой из которых соответствует своя постоянная времени (T_3 и T_M соответственно). Это свойство можно использовать для вычисления значений данных величин.

Анализ особенностей двигателя

Для выбора способа определения параметров ДПТ и корректного проведения опыта необходимо рассмотреть некоторые особенности ДПТ, которые не учитывает классическая модель. К таким особенностям можно отнести следующие:

- работу коллекторного узла;
- геометрию ДПТ;
- наличие редуктора.

Подробно особенности геометрии ДПТ и работы коллекторного узла рассмотрены в работах [4, 5].

Исследуемый двигатель *Lego NXT Motor*, как было сказано выше, представляет собой ДПТ с постоянными магнитами. На рис. 2 представлены переходные процессы силы тока на холостом ходу. Графики силы тока соответствуют различным уровням эквивалентного напряжения, приложенного к обмоткам двигателя. Значение эквивалентного напряжения

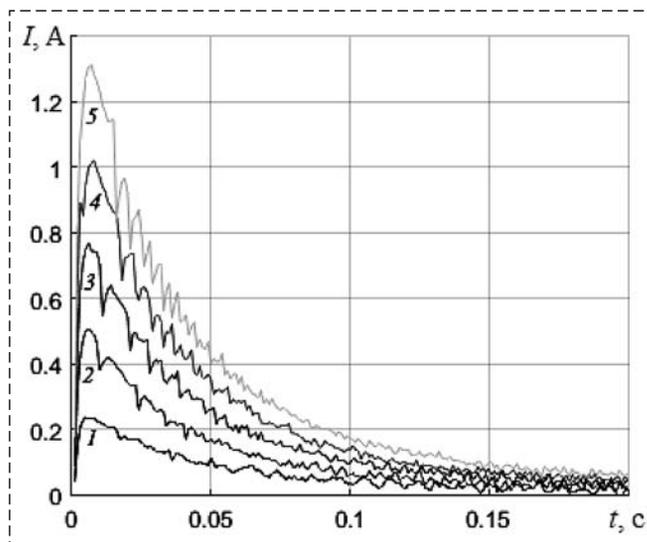


Рис. 2. Переходные процессы тока при различных уровнях скважности ШИМ:

1 – 15 %; 2 – 30 %; 3 – 45 %; 4 – 60 %; 5 – 75 %

задавалось с помощью ШИМ с определенными значениями скважности. Из рис. 2 видно, что сила тока пульсирует, при этом период пульсаций пропорционален скорости вращения вала двигателя. Возникновение пульсаций связано с работой коллекторного узла (коммутацией обмоток) и геометрией ДПТ (расположение магнитов и щеток). В первом приближении для определения момента, создаваемого ДПТ (из соотношения (4) следует, что он пропорционален току), можно использовать средние за период пульсации значения силы тока.

С геометрией ДПТ связан еще один эффект. Он проявляется в следующем: при одинаковой нагрузке на валу и различных значениях напряжения на обмотках якоря сила тока в обмотках имеет большее значение, если ротор неподвижен, чем в случае, если он вращается. Рис. 3 иллюстрирует этот эффект. На рис. 3 представлены графики силы тока двигателя при различных значениях скважности напряжения и одинаковой нагрузке. При наименьшем напряжении U_1 ротор неподвижен: $\omega_1 = 0$. При напряжениях $U_2 > U_1$ и $U_3 > U_2$ ротор вращается с частотами $\omega_2 > 0$ и $\omega_3 > \omega_2$ соответственно. При этом сила тока при напряжении U_1 (когда ротор неподвижен) выше, чем при напряжениях U_2 и U_3 . Таким образом, поведение реального двигателя не вполне соответствует классической модели. Такая особенность ДПТ связана, с одной стороны, с его геометрией,

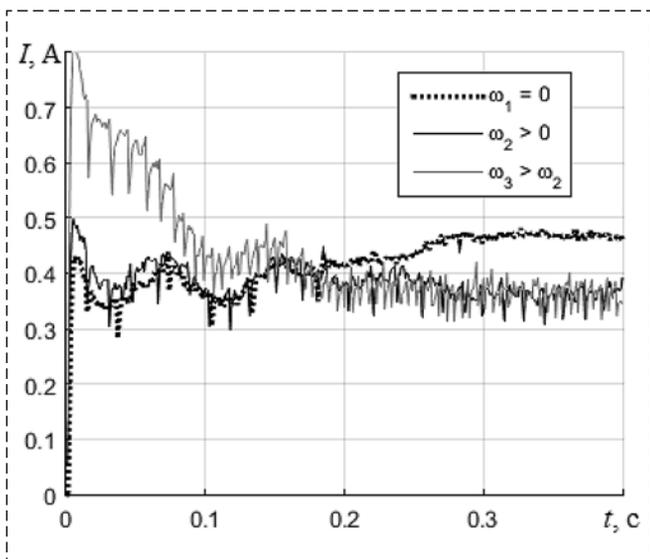


Рис. 3. Ток двигателя при неподвижном и вращающемся вале при одинаковой величине нагрузки

а с другой — с тем, что сила трения покоя выше, чем сила трения скольжения. Геометрия ДПТ такова, что магнитный поток распределен неравномерно. Данное свойство проявляется также в наличии устойчивых положений у вала мотора при отсутствии напряжения. Наличие данного эффекта приводит к тому, что для определения параметров ДПТ не вполне корректно использовать опыты, в которых вал двигателя неподвижен (например, измерение давления на опору через рычаг). Кроме того, из-за коммутации обмоток в коллекторном узле, их эквивалентное активное сопротивление также меняется на протяжении периода вращения, поскольку в разные моменты времени может быть подключено разное число обмоток и в разных конфигурациях. Из этого следует, что сопротивление обмоток мотора также правильнее определять в процессе вращения вала.

В исследуемый двигатель встроено редуктор, который имеет колебательные свойства, подобные свойствам крутильной пружины. Для демонстрации этого свойства был проведен следующий опыт. На обмотки двигателя подавалось напряжение различной величины, при этом вал редуктора был зафиксирован. На рис. 4 приведены переходные процессы силы тока. Из рис. 4 видно, что на начальном этапе вал мотора приходит во вращение, однако далее под действием нарастающей силы упругости постепенно останавливается. Для ис-

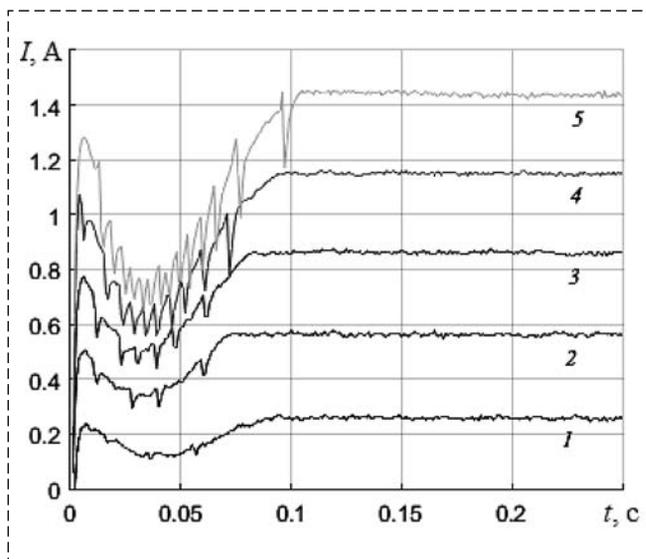


Рис. 4. Амортизирующие свойства редуктора. Кривые тока соответствуют значениям скважности ШИМ:

1 — 15 %; 2 — 30 %; 3 — 45 %; 4 — 60 %; 5 — 75 %

ключения влияния этого эффекта на результат определения параметров ДПТ необходимо исключить колебания редуктора. Один из способов состоит в том, чтобы прикладывать к обмоткам постепенно нарастающее напряжение. Это приведет к тому, что сила тока, а значит и момент, будут нарастать постепенно, что снизит величину возможных колебаний. Второй способ заключается в том, что после приложения напряжения необходимо дождаться полного затухания колебаний, после чего проводить измерения.

Редуктор также имеет еще одно свойство — свободный ход, или люфт. Он может оказывать существенное влияние на поведение нагрузки. Однако при проведении опыта по оценке параметров двигателя влияние данного эффекта легко исключить. Для этого достаточно в ходе опыта вращать вал мотора в лишь одном направлении и не менять его на противоположное.

Таким образом, для того, чтобы при оценке параметров двигателя исключить влияние на результат измерений особенностей, описанных выше, необходимо выполнить следующие условия:

- при проведении опыта необходимо, чтобы вал двигателя находился во вращении;
- при расчетах использовать средние за период пульсации силы тока значения;
- измерять значения величин после затухания колебаний в редукторе.

Описание методики определения параметров двигателя

Для решения поставленной задачи был выбран следующий способ определения параметров ДПТ. На валу мотора размещается катушка, на которую при вращении наматывается нить. На конце нити закрепляются грузы различной массы. В ходе опыта измеряются сила тока через обмотки двигателя и скорость вращения его вала при различных значениях напряжения на обмотках и массы груза. Схема опыта представлена на рис. 5. При выбранном способе проведения опыта следует учитывать влияние момента трения M_f . В данном случае значение момента трения зависит не только от свойств двигателя, но и от нагрузки, приложенной к валу. Связано это с тем, что катушка с грузом образует рычаг, через который передается воздействие силы тяжести груза, что приводит к появлению *дополнительного* момента трения M_f . Рис. 5, б иллюстрирует это свойство.

Таким образом, к статическому моменту двигателя M_s , создаваемому внутренним трением двигателя, добавляется момент сухого трения, пропорциональный дополнительному моменту M_a , а соотношение для полного момента трения выглядит следующим образом:

$$M_f = M_s + K_f M_a,$$

где K_f — коэффициент трения.

Для корректного определения параметров модели двигателя в общем случае требуется вносить поправку на момент трения. Это необходимо сделать, поскольку неизвестны коэффициент трения и статический момент, а значит, неизвестен полный момент, приложенный к валу двигателя. Следовательно, коэффициент передачи тока K_T может быть определен неверно (см. выражение (4)).

Для корректного определения параметров двигателя предлагается провести два опыта (рис. 6). В первом опыте груз размещается не на конце нити, а в точке крепления катушки, при этом на вал действует только момент трения. Измеряется ток в установившемся режиме, который пропорционален только моменту трения:

$$i_f = \frac{M_f}{K_T}.$$

Во втором опыте груз размещается на конце нити, на вал действуют и момент трения, и момент нагрузки. Измеряются сила тока и скорость вращения вала в установившемся режиме. При этом сила тока пропорциональна сумме момента трения и момента нагрузки:

$$i_m = \frac{M_f + M_L}{K_T}.$$

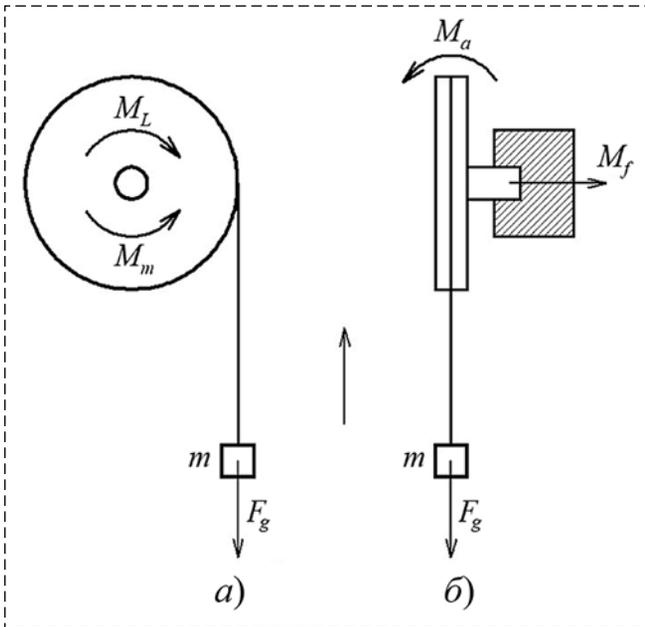


Рис. 5. Схема опыта (а); схема возникновения дополнительного момента трения (б). Здесь M_m — момент, развиваемый двигателем; M_L — момент нагрузки; M_a — дополнительный момент нагрузки; M_f — дополнительный момент трения

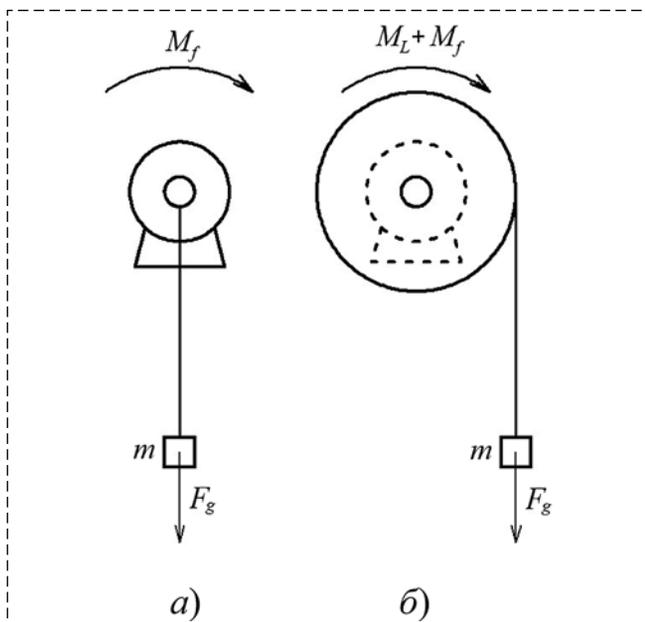


Рис. 6. Схема опыта по измерению момента трения (а); схема основного опыта (б)

Далее вычисляется разность сил токов, в результате чего определяется сила тока, пропорциональная только моменту нагрузки:

$$i_L = i_m - i_f = \frac{M_L}{K_T}.$$

Поскольку момент нагрузки известен, коэффициент K_T будет определен корректно. После этого, зная значение параметра K_T , можно определить момент трения, на основе которого далее вычислить статический момент и коэффициент трения.

С учетом всего вышесказанного предлагается следующая процедура определения параметров модели.

1. Выполнить опыт 1, измерив силу тока i_f при фиксированных значениях напряжения на обмотках и момента нагрузки.

2. Выполнить опыт 2, измерив силу тока i_m и скорости вращения вала ω при фиксированных значениях напряжения на обмотках и момента нагрузки.

3. Вычислить силу тока, пропорциональную только моменту нагрузки: $i_L = i_m - i_f$.

4. Определить параметр K_T с помощью аппроксимации зависимости момента нагрузки от тока $M_L(i_L) = K_T i_L$ при фиксированном значении напряжения.

5. Вычислить параметры M_s и K_f с помощью аппроксимации зависимости дополнительного момента от момента трения $M_f(M_a) = M_s + K_f M_a$. При этом момент трения вычислить

через значения силы тока и коэффициента тока: $M_f = K_T i_f$.

6. Определить параметр K_e на основе зависимости скорости вращения вала от напряжения $U(\omega) = K_e \omega$ при фиксированном значении момента нагрузки.

7. Определить сопротивление обмоток мотора из уравнения (5): $R = (U - K_e \omega) K_T / i_m$.

8. Определить значения L и J с помощью аппроксимации суммой экспонент зависимости $i(t)$ на холостом ходу.

В следующем разделе приведены результаты опыта, проведенного по описанной методике.

Результат определения параметров

В соответствии с описанной выше методикой были проведены два опыта, по результатам которых определены параметры двигателя. В ходе опыта силу тока измеряли с помощью датчика тока, основанного на эффекте Холла, а значение скорости в установившемся режиме определяли с помощью встроенного в двигатель квадратурного энкодера путем измерения угла поворота вала за заданный промежуток времени. Регулирование напряжения проводили с помощью ШИМ на частоте 10 кГц. При такой частоте пульсации тока от ШИМ много меньше, чем пульсации от работы коллектора мотора, и регулирование эквивалентно управлению уровнем напряжения (рис. 7).

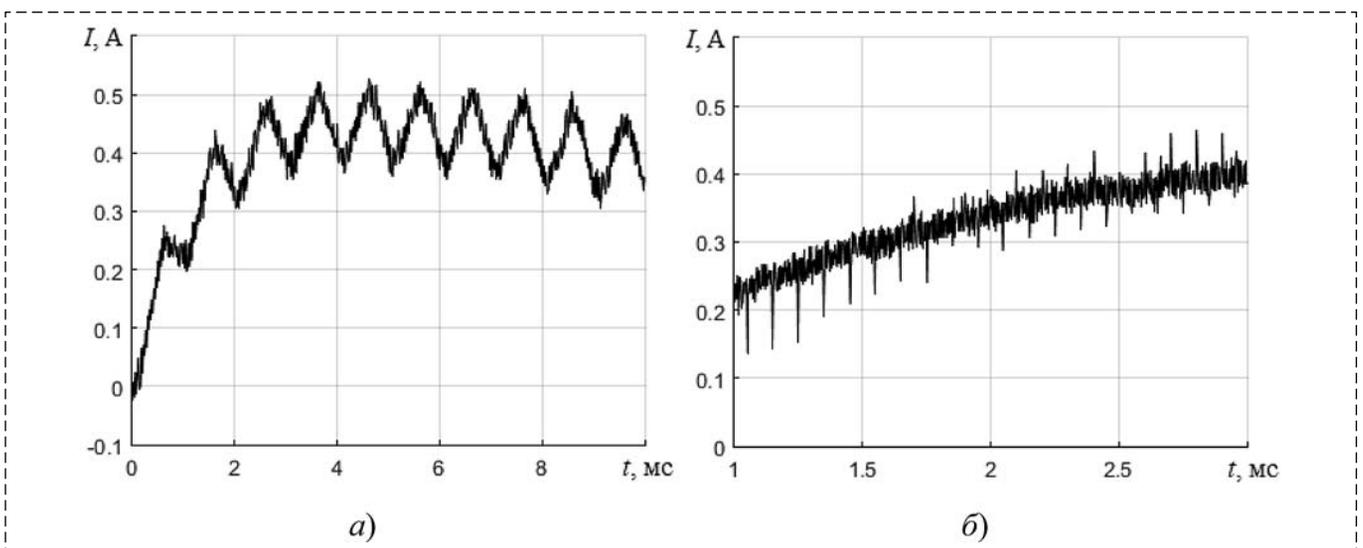


Рис. 7. Осциллограммы тока при использовании ШИМ:

a — при частоте 1 кГц; *б* — при частоте 10 кГц

Для проведения опытов были выбраны 5 точек фиксированного напряжения и 13 точек фиксированного момента нагрузки. Данные точки приведены в табл. 2 и 3. При этом отбрасывались точки, в которых вал мотора не вращался из-за большой нагрузки, для того чтобы данные не были искажены из-за эффекта, описанного в разделе 2 (см. рис. 3). Полученные данные были обработаны с помощью пакета MATLAB. Результаты представлены на рис. 8—17. В табл. 4 приведены вычисленные значения параметров двигателя.

Таблица 2

Точки напряжения

Скважность	0,15	0,30	0,45	0,60	0,75
Эквивалентное напряжение, В	1,35	2,70	4,05	5,40	6,75

Таблица 3

Точки момента нагрузки

Масса, г	Момент нагрузки M_L , Н·см	Дополнительный момент M_a , Н·см
0	0	5,61
45	2,51	7,37
91	5,08	9,17
136	7,60	10,93
186	10,39	12,90
231	12,90	14,66
277	15,47	16,46
322	17,99	18,23
371	20,72	20,15
416	23,24	21,91
462	25,81	23,72
507	28,32	25,48
556	31,06	27,40

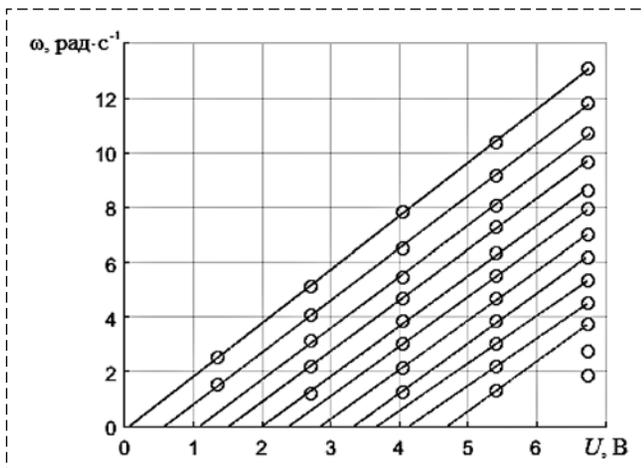


Рис. 8. Статические характеристики ДПТ: зависимость скорости от напряжения

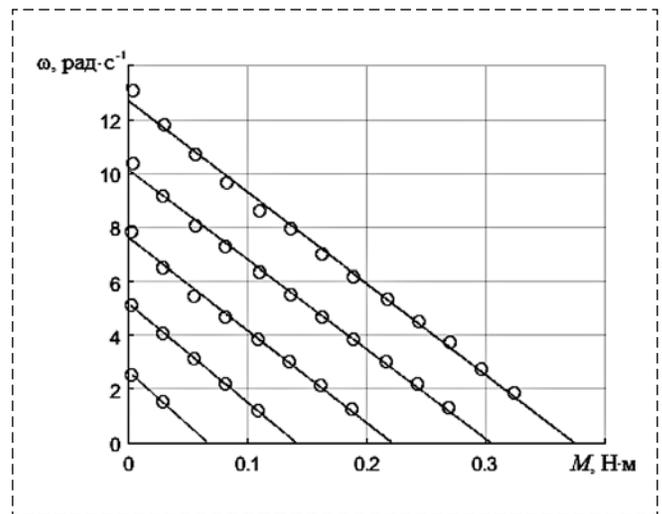


Рис. 9. Статические характеристики ДПТ: зависимость скорости от момента

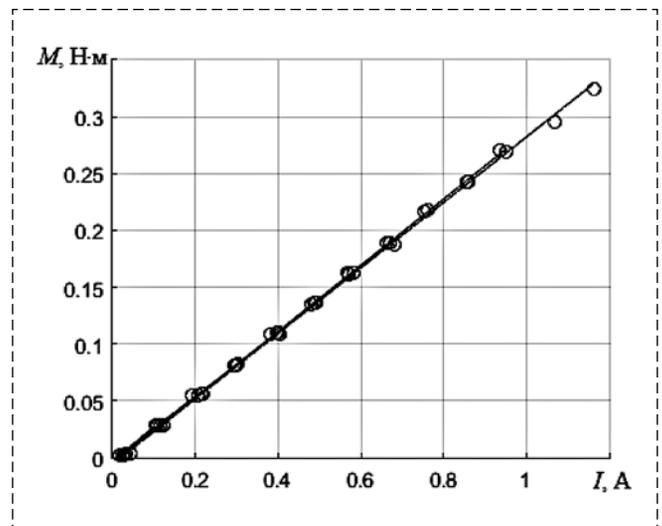


Рис. 10. Зависимость момента от силы тока

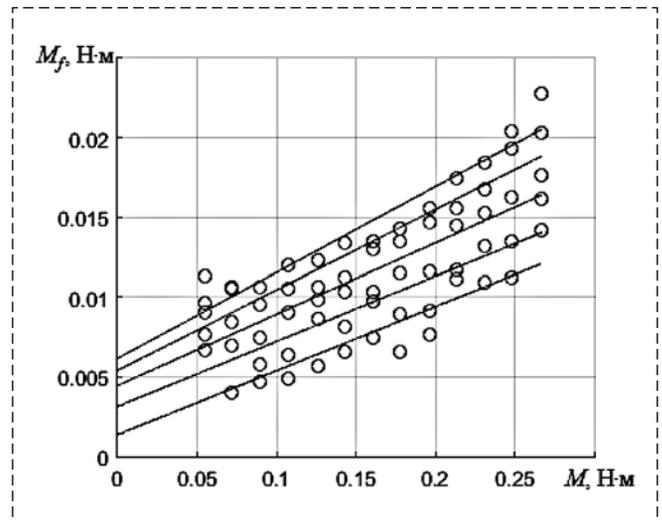


Рис. 11. Зависимость момента трения от дополнительного момента

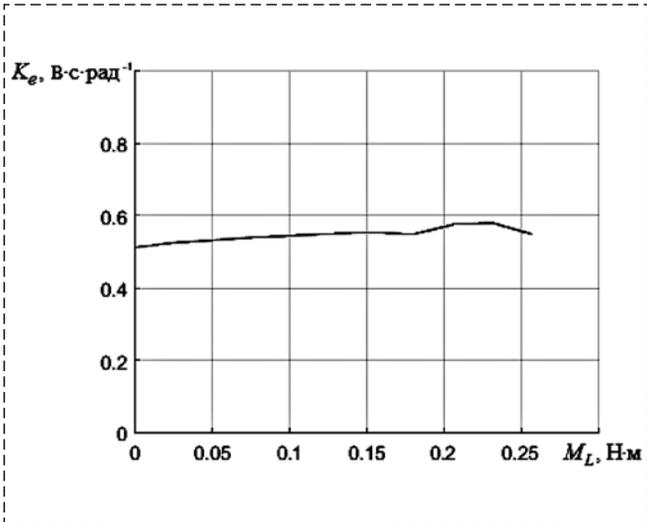


Рис. 12. Коэффициент скорости



Рис. 15. Коэффициент трения

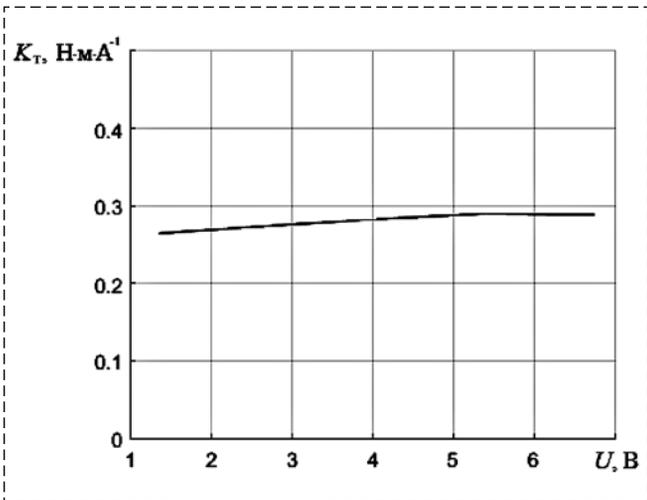


Рис. 13. Коэффициент тока

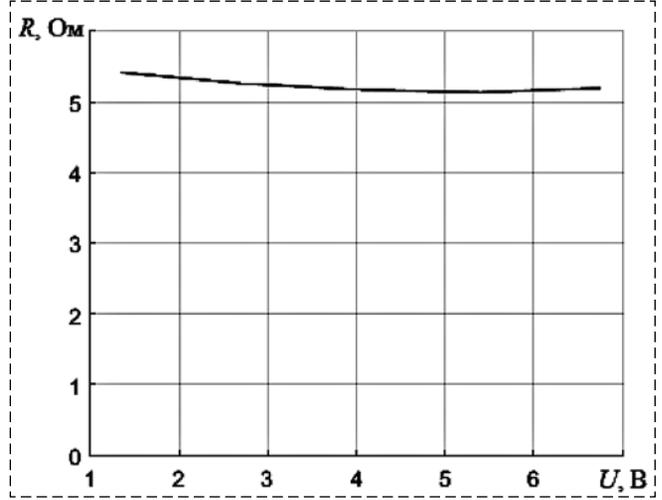


Рис. 16. Сопротивление обмоток мотора

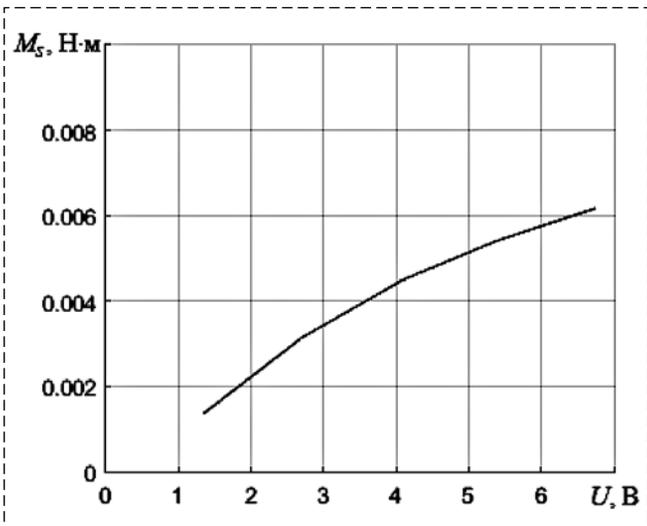


Рис. 14. Статический момент

Таблица 4

Значения параметров двигателя

Обозначение	Физический смысл	Значение	Единица
K_f	Коэффициент трения	0,046	Безразмерный
M_s	Статический момент трения	0,4	Н·см
L	Индуктивность обмоток	8	мГн
R	Сопротивление обмоток	5,2	Ом
J	Момент инерции вала	1,5	г·м ²
K_e	Коэффициент передачи скорости	0,55	В·с·рад ⁻¹
K_T	Коэффициент передачи тока	0,28	Н·м·А ⁻¹

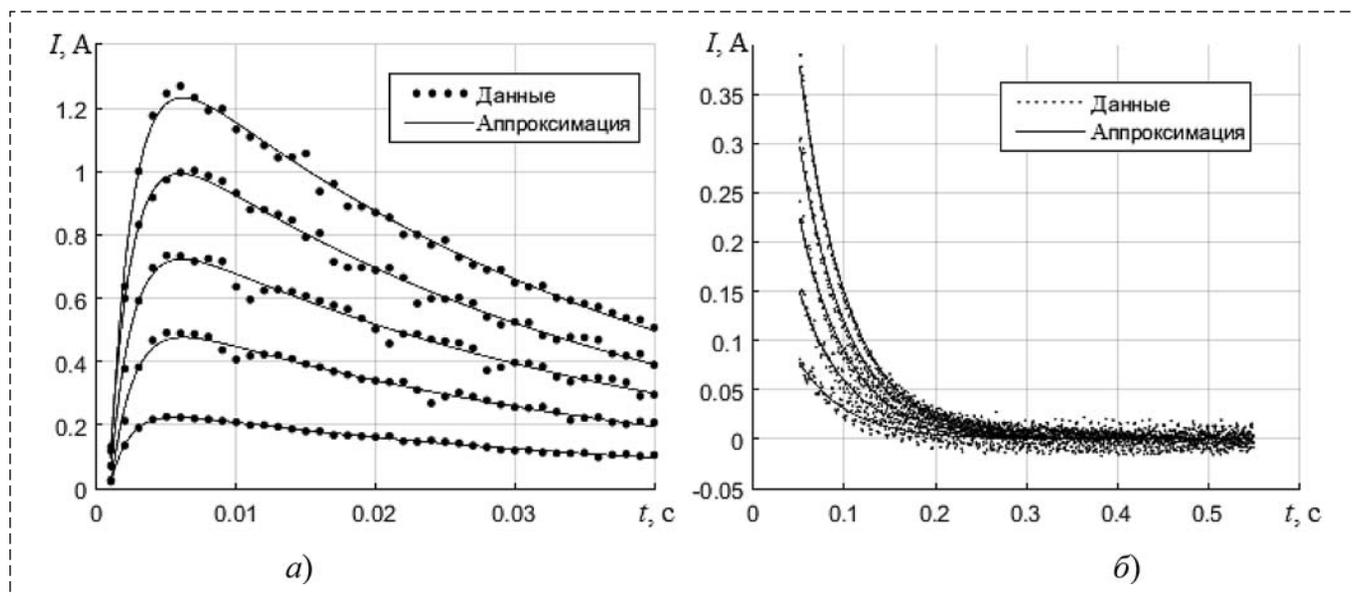


Рис. 17. Аппроксимация переходного процесса тока для получения значений его постоянных времени:

a — электромагнитная постоянная времени (быстрый процесс); *б* — механическая постоянная времени (медленный процесс). Кривые тока были смещены на величину среднего установившегося значения (к нулевому уровню) для корректной обработки данных

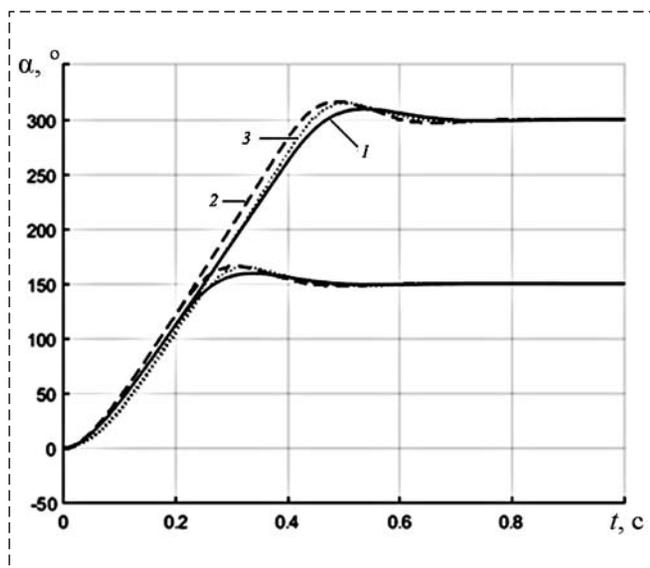


Рис. 18. Результат проверки модели:

1 — результат моделирования; 2 — переходный процесс при старте вращения из положения, когда механический зазор не пройден; 3 — переходный процесс при старте вращения из положения, когда зазор пройден

Численное моделирование

Для оценки точности полученных параметров модели был написан программный модуль, реализующий простейший пропорциональный регулятор. На рис. 18 представлен результат работы системы и результат моделирования. Схема моделирования системы приведена на рис. 19. Как видно из рис. 18, кривая, полученная при моделировании, имеет отличие от кривой реального устройства. С одной стороны, это связано с тем, что модель не учитывает наличие механического зазора в редукторе. Из рис. 18 видно, что при старте двигателя из двух крайних положений, когда зазор еще не пройден и когда зазор пройден, переходные процессы отличаются. С другой стороны, параметры системы имеют некоторую нелинейность, что также искажает реальную характеристику. Тем не менее, в данном случае

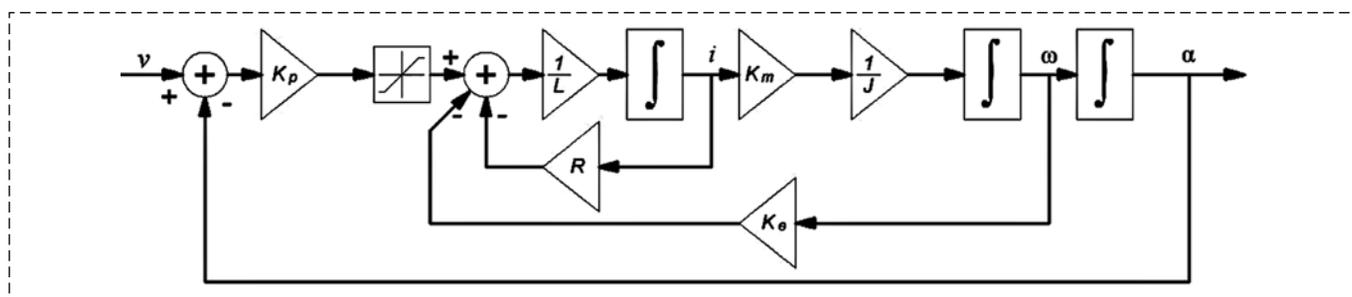


Рис. 19. Схема моделирования системы. Параметры взяты из табл. 4. Значение коэффициента регулятора принято $K_p = 8$

отличие модели и реального привода количественное, но не качественное.

Заключение

По результатам проделанной работы можно сделать следующие выводы.

1. Математическая модель реального ДПТ имеет существенные отличия от линейной модели, связанные с особенностями его конструкции. Отдельный вклад вносит редуктор, если он применяется. Это проявляется в наличии следующих эффектов:

- пульсация тока в обмотках ДПТ вследствие работы коллектора;
- наличие механического зазора;
- появление колебательных свойств.

2. Для корректной оценки значений статических характеристик ДПТ необходимо, чтобы в процессе измерения выполнялись следующие условия:

- при проведении опыта необходимо, чтобы вал двигателя находился во вращении;
- при расчетах нужно использовать средние за период пульсации тока значения;
- измерять значения величин нужно после затухания колебаний в редукторе.

3. Нагрузка на валу ДПТ помимо непосредственно нагрузочного момента создает также дополнительный момент трения, что также необходимо учитывать.

На основании этого предложена методика проведения опыта по оценке параметров математической модели ДПТ.

Проведение опыта показывает, что механические характеристики реального ДПТ также имеют отличия от линейных. Переходный процесс демонстрационной системы управления положением вала с применением пропорционального регулятора имеет количественные отличия от процесса, полученного при моделировании системы. Из этого можно сделать следующие выводы:

1) при использовании ДПТ для управления объектом с нелинейной моделью влияние особенностей модели ДПТ может стать существенным;

2) регулятор системы управления должен быть робастным, поскольку отклонение модели ДПТ от линейной может меняться от одного двигателя к другому, а также и во времени.

Список литературы

1. Кулик Ю. А. Электрические машины. М.: Высшая школа, 1966. 362 с.
2. Усольцев А. А. Электрические машины: Учеб. пособие. СПб: НИУ ИТМО, 2013. 416 с.
3. Востриков А. С., Французова Г. А., Гаврилов Е. Б. Основы теории непрерывных и дискретных систем регулирования: Учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. 476 с.
4. Вольдек А. И., Попов В. В. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы: учеб. для вузов. СПб.: Питер, 2008. 320 с.
5. Кислицын А. Л. Электрические машины постоянного тока. Ульяновск: УлГТУ, 2005. 122 с.

The Technique of the Direct Current Motor Parameters Determination

A. Yu. Ivoilov, iau13hv@mail.ru, V. A. Zhmud, oao_nips@bk.ru, V. G. Trubin, trubin@ngs.ru

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk

Corresponding authors: Zhmud Vadim A., D. Sc. (Eng), Associate Professor, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Accepted on April 06, 2018

The technique of the direct current motor math model obtaining is considered in this article. Despite the fact that the classical math model is widely known and well studied it often becomes necessary to refine and determine its parameters by experiment. The technical documentation may not specify all motor parameter of interest. Sometimes there is no information about the motor at all. In addition the features that the classical model does not take into account can be presented in a real motor in practice. At the beginning of the paper the traditional model of the motor is under consideration as well as its static and dynamic characteristics. The model parameters to be determined are brought out. Further the analysis of the features that distinguish the behavior of the real motor from the behavior predicted by the model is carried out. These features are commutator operation, the geometry of the motor, and the reducer action on system. The influence of these features on the motor operation is researched by the different experiments and the conditions under which the parameters of motor model should be obtained are determined. Further the technique of math model obtaining based on the analysis done is carried out. The method is based on the experimental determination of current and torque ratio on the one hand and the applied voltage and rotation speed on the other hand. Wherein the technique takes into account the effect of motor shaft friction which is increasing when there is a load on it. The method for compensating this effect to exclude its influence on the math model determining result is proposed. An example of application of the described technique to determining model of Lego NXT servo motor is given further. The numerical values of the parameters and the graphical data are presented. Finally, the behavior of the real motor and the behavior calculated from the model obtained earlier are compared. As a demonstration system, the automatic control system of the motor shaft rotation angle based on the proportional controller is used.

Keywords: DC motor, automatic control systems, math model, experimental parameters obtaining, model features

For citation:

Ivoilov A. Yu., Zhmud V. A., Trubin V. G. The Technique of the Direct Current Motor Parameters Determination, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2018, vol.19, no. 7, pp. 486—496.

DOI: 10.17587/mau.19.486-496

References

1. Kulik Ju. A. *Jelektricheskie mashiny* (Electric machines), Moscow, Vysshaja shkola, 1966, 362 p. (in Russian).
2. Usol'cev A. A. *Jelektricheskie mashiny* (Electric machines), St.Petersburg, NIU ITMO 2013, 416 p. (in Russian).

3. Vostrikov A. S., Francuzova G. A., Gavrilov E. B. *Osnovy teorii nepreryvnyh i diskretnyh sistem regulirovaniya* (Principles of the theory of continuous and discrete control systems), Novosibirsk, Publishing house of NGTU, 2008, 476 p. (in Russian).

4. Vol'dek A. I., Popov V. V. *Jelektricheskie mashiny. Vvedenie v jelectromehaniku. Mashiny postojannogo toka i transformatory* (Electric machines. Introduction to electrical engineering. DC electric machines and transformers), St.Petersburg, Piter, 2008, 320 p. (in Russian).

5. Kislicyn A. L. *Jelektricheskie mashiny postojannogo toka* (Direct current electric machines), Ul'janovsk, UIGTU, 2005, 122 p. (in Russian).



08—12 октября, 2018 г.
Волгоград, Волгоградский государственный
технический университет

VI Международная научно-практическая конференция «Прогресс транспортных средств и систем — 2018»

Во время конференции состоится заседание научного совета РАН по робототехнике и мехатронике и отчетное мероприятие РФФИ по конкурсу «офи-м»: тема 604 «Фундаментальные проблемы группового взаимодействия роботов».

Конференция, в работе которой примут участие ведущие российские и зарубежные ученые и инженеры, ставит целью расширить научные контакты между специалистами, работающими в области транспортных средств и систем, а также обеспечить обмен научно-техническими достижениями между специалистами разных стран.

Направления работы конференции

- Беспилотные транспортные средства
- Перспективы создания транспортных средств на альтернативных источниках энергии
- Конструкции перспективных робототехнических и специальных транспортно-технологических средств
- Вопросы управления движением и эксплуатации робототехнических и специальных транспортно-технологических средств
- Системы коммуникации автомобилей, инфраструктуры и человека
- Системы моделирования дорожной обстановки и движения автомобиля
- Организация и управление перевозок на транспорте
- Интеллектуальные системы управления движением сложных объектов в недетерминированной среде
- Разработка транспортной инфраструктуры
- Обеспечение комплексной безопасности на транспорте

Подробную информацию о конференции см. сайте:

http://www.icpvs.ru/ru/about_ru/

Тел.: + 7 8442 24 81 14, e-mail: icpvs2018@vstu.ru

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

107076, Москва, Стромьинский пер., 4

Телефон редакции журнала: (499) 269-5510, (499) 269-5397

Технический редактор Е. В. Конова. Корректор Н. В. Яшина.

Сдано в набор 26.04.2017. Подписано в печать 18.06.2018. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 8,86. Заказ МН718. Цена договорная.

Журнал зарегистрирован в Комитете Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-11648 от 21.01.02

Учредитель: Издательство "Новые технологии"

Оригинал-макет ООО "Авансед солюшнз". Отпечатано в ООО "Авансед солюшнз".
119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1.