

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИМ МОМЕНТОМ ДВИГАТЕЛЯ-МАХОВИКА

О.Ю. Завьялова, Ю.М. Казанцев  
(ОАО «НПЦ «Полюс»)

*Предложен способ повышения точности реализации управляющего (динамического) момента двигателя-маховика, сущность которого заключается в прогнозировании пульсирующей составляющей тока силовой цепи. Разработана имитационная модель электропривода с двигателем-маховиком. Приведены результаты моделирования.*

**Ключевые слова:** *двигатель-маховик, динамический момент, прогнозирование, пульсирующая составляющая тока силовой цепи, система ориентации космического аппарата.*

Двигатели-маховики являются силовой управляющей частью системы ориентации космического аппарата и предназначены для создания по трём или четырём (в зависимости от способа резервирования) осям, связанным с осями аппарата, управляющих (динамических) моментов  $M_d$ , под действием которых происходит его ориентация в пространстве [1].

При этом управляющий момент, прикладываемый к корпусу аппарата, определяется выражением

$$M_d = J \frac{d\omega}{dt},$$

где  $J$  – момент инерции ротора маховика;  $\frac{d\omega}{dt}$  – угловое ускорение.

Принято считать, что задача электропривода двигателя-маховика – обеспечение управляющего момента, пропорционального входному сигналу  $I$ . Качество управления положением космического аппарата обусловлено точностью реализации данного момента и уровнем его пульсаций, особенно в зоне частот менее 50 Гц. Для этого, как правило, используется частотно-токовый способ управления, который предполагает «следящее» регулирование токов в обмотках двигателя по заданным синусоидальным или близким к ним сигналам. При этом обеспечивается равномерность вращения двигателя. Частота и фаза тока определяются частотой вращения и угловым положением ротора, а токи в обмотках статора  $i_{\phi 1}$ ,  $i_{\phi 2}$  формируются по уравнениям

$$I_{\phi 1} = I \sin \varphi$$

$$I_{\phi 2} = I \cos \varphi$$

где  $\varphi$  – угол положения ротора;  $I = k_T N_y$  – заданный ток. В свою очередь,  $k_T$  – коэффициент пропорциональности;  $N_y$  – управляющий сигнал.

Электропривод двигателя-маховика состоит из электронного блока управления и двухфазной синхронной машины с возбуждением от постоянных магнитов и датчиком положения ротора [1].

Поскольку потокосцепление ротора такой машины постоянно, а проекция вектора тока на продольную ось  $I_d$  равна нулю, электромагнитный момент двигателя  $M_{эм}$  пропорционален току по поперечной оси  $I_q$ , который равен заданному току:

$$M_{эм} = k_{эм} I,$$

где  $k_{эм}$  – коэффициент пропорциональности.

Уравнение движения ротора принимает вид

$$J \left( \frac{d\omega}{dt} + \frac{d\Omega}{dt} \right) = k_{эм} k_T N_y \pm M_c,$$

где  $\frac{d\Omega}{dt}$  – ускорение объекта управления (преднебрежимо мало и в дальнейшем принимается равным нулю);  $M_c$  – момент сопротивления вращению ротора (сухое и вязкое трение в опорах ротора, аэродинамическое сопротивление среды и т. п.).

В соответствии с данным уравнением при регулировании электромагнитного момента с учётом измеренного значения момента сопротивления двигателя регулируется управляющий динамический момент. Точность реализации

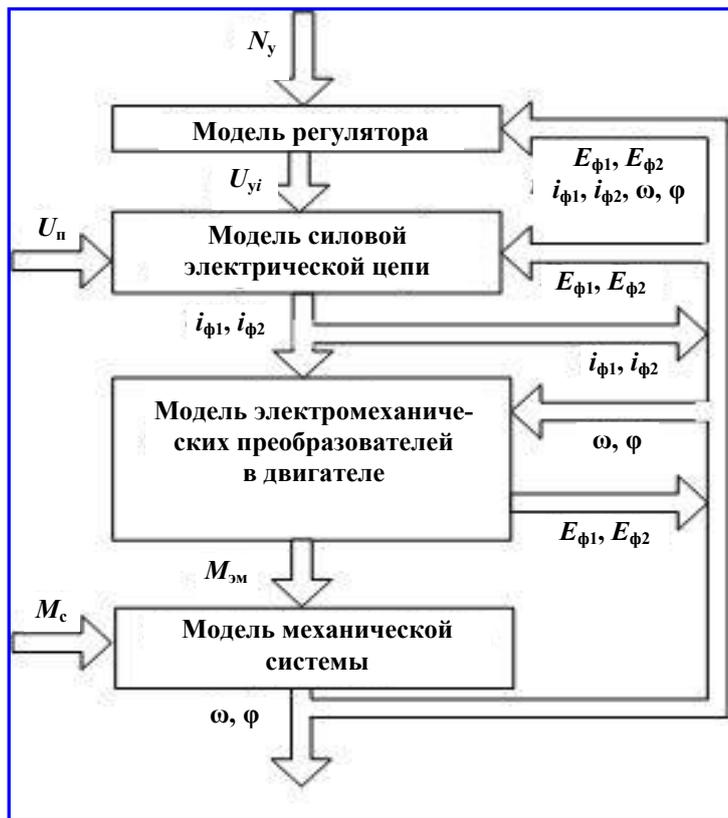


Рис. 1. Функциональная схема имитационной модели

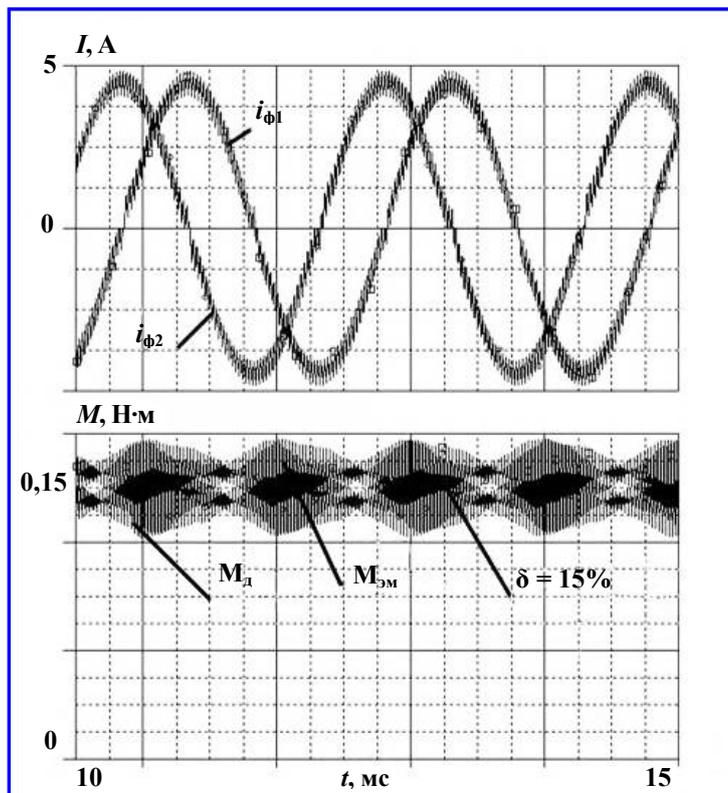


Рис. 2. Изменение токов первой и второй фазы двигателя, электромагнитного и динамического моментов при максимальном управляющем воздействии

динамического момента будет определяться значением момента сопротивления и стабильностью коэффициентов  $k_{эм}$  и  $k_{т}$ . Опыт разработки электроприводов двигателей-маховиков [2] показывает, что погрешность реализации управляющего момента в этом случае достигает 20%.

Для выбора стратегии управления, обеспечивающей минимальную погрешность реализации управляющего момента, и исследования различных режимов работы электропривода двигателя-маховика в программной среде Pspice разработана имитационная модель (рис. 1). Она имитирует работу электропривода, входящего в его состав двигателя и управляющего им регулятора, позиционную коммутацию обмоток двигателя и импульсную модуляцию напряжения питания.

Данная модель состоит из четырёх моделей: силовой электрической цепи, электромеханических преобразований в двигателе, механической системы и регулятора.

Модель силовой электрической цепи на базе двухфазного синхронного двигателя включает в себя по каждой фазе один однофазный мостовой инвертор напряжения, сопротивление, индуктивность и ЭДС обмоток двигателя. Поскольку она реализована на компонентном уровне, можно исследовать режимы работы любого элемента в силовой электрической цепи [3].

Модель электромеханических преобразований построена на функциональном уровне с реализацией математических операций, описывающих процесс электромеханических преобразований в двигателе:

$$\begin{cases} M_{эм} = k_{эм} i_{\phi 1} \sin \phi + k_{эм} i_{\phi 2} \cos \phi; \\ E_{\phi 1} = \sin \phi \Phi_{\delta} \omega; \\ E_{\phi 2} = \cos \phi \Phi_{\delta} \omega, \end{cases}$$

где  $i_{\phi 1}, i_{\phi 2}$  – ток первой и второй фаз двигателя;  $\Phi_{\delta}$  – магнитный поток;  $E_{\phi 1}, E_{\phi 2}$  – ЭДС вращения обмоток двигателя;  $\omega$  – частота вращения вала двигателя.

При этом приняты следующие допущения: не учитываются насыщение и потери в

магнитопроводе, а воздушный зазор в двигателе принимается равномерным [1].

Модель механических преобразований описывается следующим уравнением:

$$M_d = M_{эм} \pm M_c,$$

где  $M_c = k_c H + M_T \text{sign}(H)$  – момент сопротивления вращению. В свою очередь,  $k_c$  – коэффициент пропорциональности по угловой скорости;  $H = J\omega$  – кинетический момент (где  $J$  – момент инерции вращающейся части двигателя-маховика);  $M_T \text{sign}(H)$  – момент трогания.

Результаты моделирования работы электропривода двигателя-маховика с параметрами:

- максимальный кинетический момент  $H_{\text{макс}} = 15 \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$ ;
- максимальный электромагнитный момент  $M_{эм.\text{макс}} = 0,15 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ;
- максимальная скорость вращения ротора  $\omega_{\text{макс}} = \pm 628 \text{ рад/с}$  – при частотно-токовом способе управления силовыми ключами инвертора иллюстрируются диаграммами фазных токов  $i_{\phi 1}$ ,  $i_{\phi 2}$ , электромагнитного и динамического моментов  $M_d$  и  $M_{эм}$ .

Анализ диаграмм (рис. 2) показал, что отклонение  $\delta$  электромагнитного момента от заданного значения в установившемся режиме превышает 15 %.

Эффективным способом увеличения точности электропривода в установившемся режиме является использование алгоритмов оптимального прогнозирующего управления, которые находят всё более широкое применение в связи с активным развитием силовой электроники и микропроцессорной техники. Сущность таких алгоритмов заключается в прогнозировании результатов управления на некотором малом временном интервале (интервале управления) и определении оптимальной управляющей последовательности, наилучшим образом удовлетворяющей задаче управления. Подобные стратегии управления предполагают наличие математической модели объекта управления, определяющей векторы переменных состояния и возмущений, а также состав управляющих воздействий и их возможные физически реализуемые

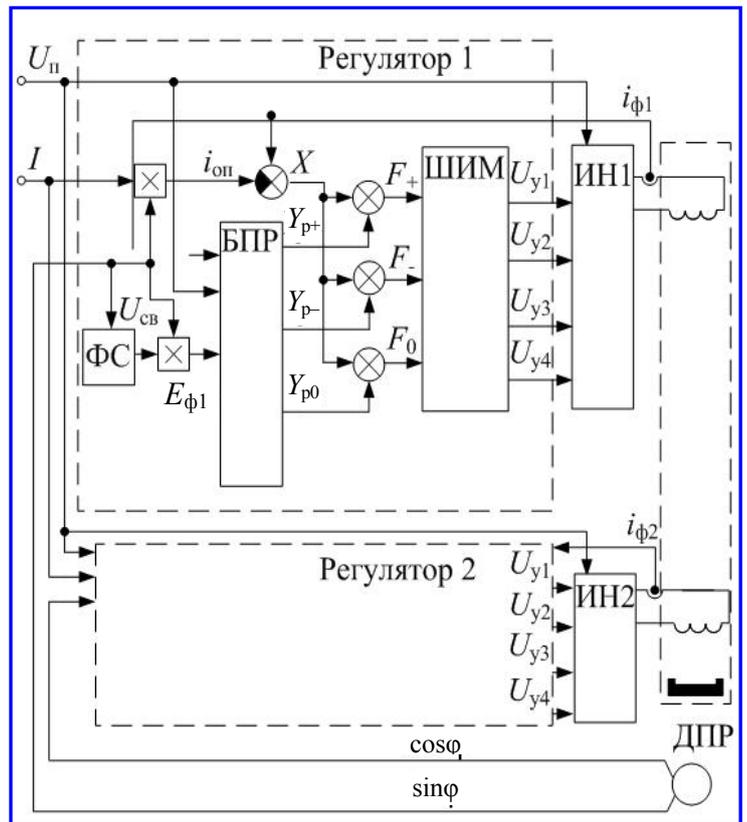


Рис. 3. Модель регулятора, реализующая принцип управления с прогнозированием: ФС – формирователь импульсов скорости; БПР – блок периодических развёрток; ШИМ – широтно-импульсный модулятор; ИН1, ИН2 – инверторы первой и второй фаз;  $U_n$  – напряжение питания; ДПР – датчик положения ротора

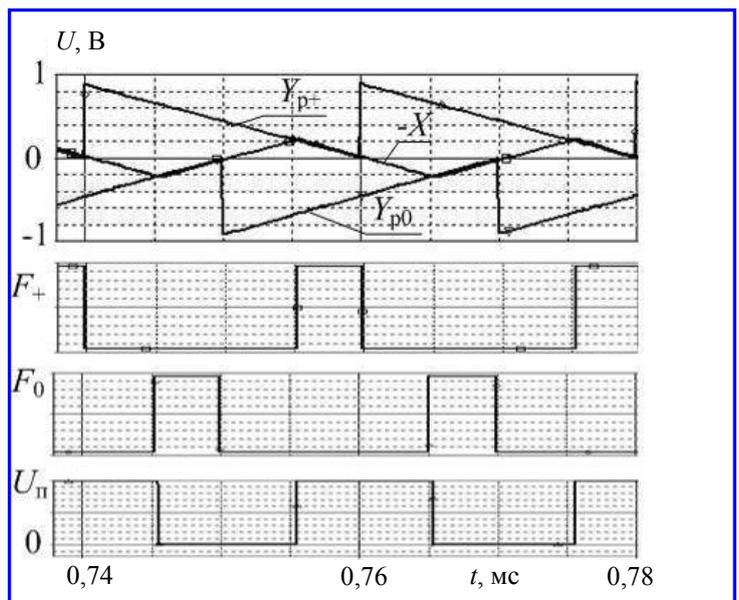


Рис. 4. Диаграммы сигналов  $X$ ,  $Y_{р+}$ ,  $Y_{р0}$ ,  $F_+$ ,  $F_0$ ,  $U_n$  при однополярной двухсторонней широтно-импульсной модуляции

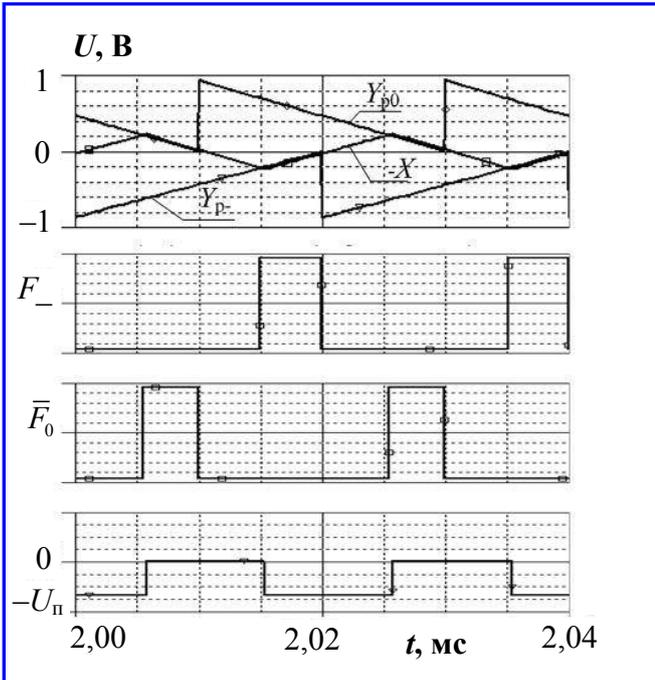


Рис. 5. Диаграммы сигналов  $X$ ,  $Y_p$ ,  $Y_{p0}$ ,  $F_-$ ,  $U_n$  при однополярной двухсторонней широтно-импульсной модуляции

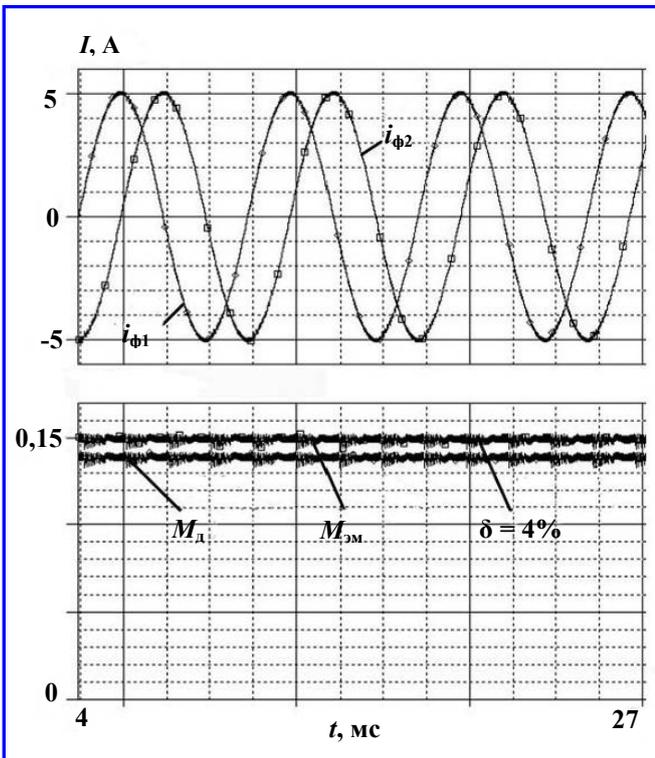


Рис. 6. Изменение токов первой и второй фазы двигателя, электромагнитного и динамического моментов при максимальном управляющем воздействии

значения. Состав независимых координат, управляемых в рамках прогнозирующей стратегии управления, определяется на основе анализа модели [4].

Модель регулятора, реализующая принцип управления с прогнозированием, представлена на рис. 3.

Формирование управляющих сигналов для переключения импульсных элементов инверторов в регуляторе осуществляется узлами сложения в соответствии с выражением

$$F = X + Y_p,$$

где  $X$  – сигнал ошибки;  $Y_p$  – сигнал развёртки.

Сигнал развёртки формируется равным прогнозируемому в моменты коммутации ключей значению пульсирующей составляющей тока в силовой цепи с противоположным знаком:

$$Y_p(t_k) = -\tilde{i}(t_k).$$

Сигнал ошибки формируется узлами сравнения в соответствии с выражением

$$X = i_{\phi i} - i_{опi},$$

где  $i_{\phi i}$  – ток коммутируемой обмотки;  $i_{опi} = I k_i$  – заданный опорный ток обмотки.

ЭДС вращения обмоток вычисляется узлом умножения по формулам

$$E_{\phi 1} = U_{св} \sin \varphi = \Phi_{\delta} \omega \sin \varphi;$$

$$E_{\phi 2} = U_{св} \cos \varphi = \Phi_{\delta} \omega \cos \varphi,$$

где  $U_{св}$  – напряжение, пропорциональное угловой скорости вращения двигателя, полученное после преобразования сигнала датчика положения ротора формирователем импульсов скорости.

Прогноз значений пульсирующей составляющей тока в силовой цепи к моменту коммутации в каждой точке интервала  $t \in (0, T)$ , где  $T$  – период модуляции, осуществляется в соответствии с моделью объекта управления

$$U_{Li} = (U_n - E_{\phi}) = L_{\phi i} \frac{di_{\phi}}{dt}$$

по уравнению

$$Y_p = \frac{1}{L_{\Phi i}} \int_0^t (U_n - E_{\Phi}) dt,$$

где  $L_{\Phi i}$  – индуктивность обмоток двигателя;  $U_{Li}$  – напряжение на индуктивности  $L_{\Phi i}$  на интервале прогноза.

Пренебрегая падением напряжения на импульсных элементах и считая изменение  $U_n$ ,  $E_{\Phi}$  на интервале модуляции незначительным, уравнение можно привести к виду

$$Y_p = \frac{U_n - E_{\Phi}}{L_{\Phi i}} T \left( 1 - \left( \frac{t}{T} \right) \right).$$

Для двухсторонней однополярной широтно-импульсной модуляции рациональным выбором является трёхуровневая система регулирования (1, 0, -1), которая придаёт разработанной модели свойства астатической дискретной системы и оптимизирует управление в моменты переключения силовых ключей инвертора при переходе через нуль опорного сигнала [3]. Поэтому в блоке периодических развёрток формируется три сигнала развертки:  $Y_{p+}$ ,  $Y_{p0}$ ,  $Y_{p-}$ , которые необходимы для формирования управляющих сигналов  $F_+$ ,  $F_0$ ,  $F_-$  в соответствии с выражениями

$$F_+ = X + Y_{p+}, Y_{p+} = \frac{U_n - E_{\Phi i}}{L_{\Phi i}} T \left( 1 - \left( \frac{t}{T} \right) \right);$$

$$F_0 = X + Y_{p0}, Y_{p0} = \frac{-E_{\Phi i}}{L_{\Phi i}} T \left( 1 - \left( \frac{t + T/2}{T} \right) \right);$$

$$F_- = X + Y_{p-}, Y_{p-} = \frac{-U_n - E_{\Phi i}}{L_{\Phi i}} T \left( 1 - \left( \frac{t}{T} \right) \right).$$

Управляющими сигналами  $F_+$ ,  $F_0$ ,  $F_-$  формируется широтно-модулированное напряжение питания обмотки двигателя по следующему алгоритму:

– положительное напряжение питания  $U_n$  подключается к входу обмотки двигателя при  $F_+ > 0$  (рис. 4) и положительной полярности опорного сигнала;

– положительное напряжение питания  $U_n$  отключается с замыканием накоротко входа обмотки двигателя при  $F_0 > 0$  (см. рис. 4);

– отрицательное напряжение питания  $-U_n$  подключается к входу обмотки двигателя при  $F_- > 0$  (рис. 5) и отрицательной полярности опорного сигнала;

– отрицательное напряжение питания  $-U_n$  отключается с замыканием накоротко входа обмотки двигателя при  $\overline{F_0} > 0$ .

Так как управляющий сигнал равен сумме сигнала ошибки и сигнала развертки, то в установившемся режиме максимальное отклонение тока в моменты коммутации от заданного опорного не превышает амплитуды пульсирующей составляющей, а среднее за период значение сигнала ошибки будет равно нулю (см. рис. 4, 5).

### Выводы

Результаты моделирования показали, что разработанный регулятор позволяет формировать ток в фазах двигателя без провалов при переключении обмоток, электромагнитный момент на валу двигателя пропорционален значению сигнала тока задания  $i_y$ , что обеспечивает равномерность вращения, плавное регулирование электромагнитного и, следовательно, динамического момента в широком диапазоне с минимальной ошибкой (рис. 6).

Видно (см. рис. 2, 6), что погрешность реализации электромагнитного момента в установившемся режиме при способе управления с прогнозированием пульсирующей составляющей тока силовой цепи уменьшена с 15 до 4 %, что подтверждает эффективность предложенного метода.

### Литература

1. Математическая модель маховичного электро-механического исполнительного органа / А. Н. Бутков, В. Н. Булдаков, С. Ю. Филонова [и др.] // Электронные и электромеханические системы и устройства: сборник научных трудов НПП «Полус». – Томск : МГП «РАСКО» при изд-ве «Радио и связь», 2001. – С. 340 – 347.
2. Якимовский Д. О. Повышение точности управления моментом двигателя-маховика / Д. О. Якимовский // Гироскопия и навигации. – 2008. – № 3 (62). – С. 46 – 52.
3. Казанцев Ю. М., Лекарев А. Ф. Разработка модели и синтез регулятора бесконтактного электропривода /

- Ю. М. Казанцев, А. Ф. Лекарев // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2003. – № 6. – С. 22 – 25.
4. Прогнозирующее релейно-векторное управление активными преобразователями частоты в системах электропривода переменного тока / Р. Т. Шрейнер, А. А. Ефимов, Г. С. Зиновьев [и др.] // Электротехника. – 2004. – № 10. – С. 43 – 50.

*Поступила в редакцию 07.02.2012*

***Ольга Юрьевна Завьялова, инженер-конструктор, т. (3822) 55-46-94.***

***Юрий Михайлович Казанцев, д-р техн. наук, профессор,***

***зам. главного конструктора, т. (3822) 55-59-63.***

***E-mail: polus@online.tomsk.net.***