

УДК 621.313.5

**ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ДВИГАТЕЛИ
С ЛЕНТОЧНОЙ НАМОТКОЙ**

А.Г. Иванова, В.М. Мартемьянов, Р.Э. Кодермятов

Томский политехнический университет

E-mail: ivanovatonya@tpu.ru

Иванова Антонина Геннадьевна, аспирант кафедры точного приборостроения Института неразрушающего контроля ТПУ.

E-mail: ivanovatonya@tpu.ru
Область научных интересов: исследование и разработка исполнительных электро-механических элементов систем автоматики.

Мартемьянов Владимир Михайлович, канд. техн. наук, доцент кафедры точного приборостроения Института неразрушающего контроля ТПУ.

E-mail: ivanovatonya@tpu.ru
Область научных интересов: исследование и разработка электромеханических элементов приборных устройств.

Кодермятов Радик Эмирханович, студент кафедры точного приборостроения Института неразрушающего контроля ТПУ.

E-mail: ivanovatonya@tpu.ru
Область научных интересов: исследование электромеханических элементов.

Рассмотрен принцип действия исполнительных устройств с активными пакетным и ленточным элементами. Приведены варианты применения такого исполнительного устройства в схемах моментного двигателя и вентильного двигателя, у которых активный элемент выполнен из тонкой электропроводящей ленты. Рассмотрен импульсный режим работы моментного двигателя с ограниченным углом поворота ротора.

Ключевые слова:

Активный пакетный элемент, распределенный ток, электропроводящая пластина, силовая характеристика, моментный двигатель, вентильный двигатель, импульсный режим.

При разработке новых видов электромеханического приборного оборудования в ряде случаев возникают проблемы, связанные с жесткими требованиями по габаритным ограничениям и развиваемому моменту. В частности, когда доступные серийные исполнительные элементы не вписываются в заданные объемы, приходится разрабатывать исполнительные устройства индивидуального назначения. Достаточно распространенными исполнительными элементами в системах автоматики являются магнитоэлектрические моментные двигатели. В сочетании с высококоэрцитивными постоянными магнитами на основе редкоземельных элементов и большими воздушными зазорами в таких двигателях можно полу-

чить индукцию, достаточную для создания требуемых управляющих моментов. Рост момента на валу двигателя может быть осуществлен путем увеличения тока, протекающего по обмотке. Указанное увеличение тока не будет влиять на магнитный поток возбуждения, так как показано, что реакция якоря в машинах с ротором из редкоземельных магнитов незначительна [1]. Однако увеличение тока с целью создания большего момента на валу ограничено допустимым перегревом провода обмотки. Форма сечения провода обмотки, характер ее укладки в пазах статора, наличие пазовой изоляции приводят к увеличению теплового сопротивления, ухудшению отвода тепла, перегреву обмотки и в конечном итоге к ее разрушению. Различные приемы охлаждения обмоток, особенно принудительные с использованием воздуха и жидкости, существенно усложняют конструкцию электрической машины и ее эксплуатационные возможности [2].

В связи с этим поставлена задача разработать исполнительное устройство, в котором активный элемент смог бы обеспечить необходимый ток в заданных габаритах машины и при этом дал возможность относительно простого отвода тепла на корпус двигателя, где оно будет рассеиваться в окружающей среде.

Принцип действия исполнительного устройства с пакетным элементом поясняется рис. 1. Однородная электропроводящая пластина прямоугольной формы подключена к электрической цепи таким образом, что точки подключения находятся в вершинах двух ее диагонально

расположенных углов. Полный ток, протекающий по пластине, является распределенным. Считаем, что пластина выполнена из однородного материала и имеет во всех ее точках одинаковую толщину. Вид линий тока, приведенный на рисунке, получен с помощью программного продукта COMSOL Multiphysics. В каждой точке M_i пластины элемент тока J_{Mi} имеет две компоненты: продольную J_{Mix} и поперечную J_{Miy} .

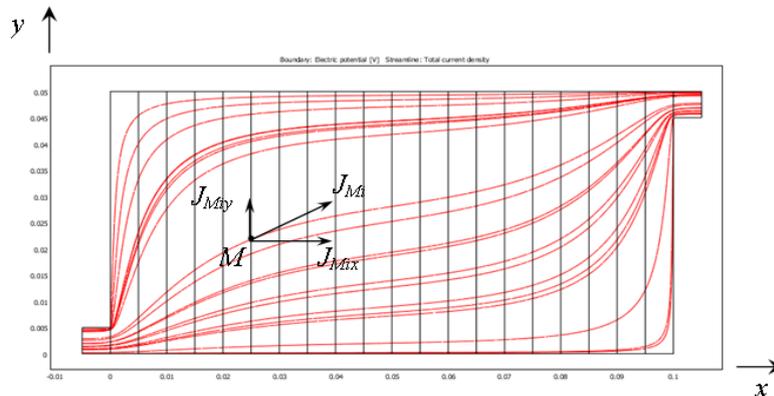


Рис. 1. Распределенный ток, протекающий по пластине

Если рассмотреть суммарное действие таких компонент, находящихся в зоне действия потока постоянного магнита с индукцией B , направленного нормально к поверхности пластины, то ток $J_x = \sum_{i=1}^n J_{Mix}$ вызовет механическую силу F_y , действующую вдоль оси Oy (поперек пластины), а ток $J_y = \sum_{i=1}^n J_{Miy}$ вызовет силу F_x , действующую вдоль пластины. При соответствующем выборе конструкции исполнительного элемента (двигателя) сила F_x будет являться основной, определяющей характеристики последнего, а сила F_y будет действовать только в опорах подвеса подвижной части (ротора). В дальнейшем будем рассматривать только действие силы F_x и вызвавшего ее тока J_y , который будем называть «поперечным».

В каждой точке пластины ток определяется некоторой плотностью тока $\vec{j}(x, y)$, которая зависит от характера распределения тока по пластине. Последнее может быть определено путем решения дифференциального уравнения в частных производных. Выберем точку $M(x_m, y_m)$, лежащую на поверхности пластины (рис. 2). В этой точке имеется элемент тока, плотность которого характеризуется компонентами j_{Mx} и j_{My} . Считаем, что плотности тока будут такими же в точках с координатами x_m и y_m во всех слоях пластины. Величина тока, протекающего по элементарному сечению $dx \cdot dz$ (рис. 2) в направлении оси Oy определится как $j_{My}(x, y) \cdot dx \cdot dz$. В данном случае ось Oz направлена вдоль толщины Δ пластины. В окрестности выбранной точки M выберем элемент тока на участке dy : $j_{My}(x, y) \cdot dx \cdot dz \cdot dy$.

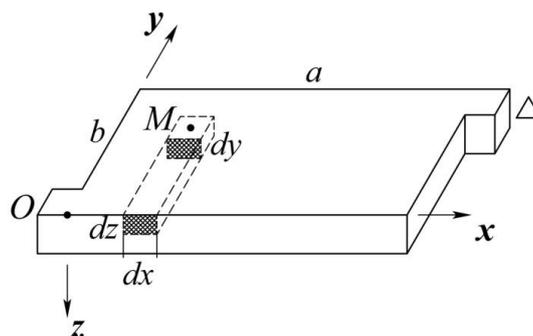


Рис. 2. Элемент тока в окрестностях точки M

Элементарная сила dF_x , создаваемая указанным элементом тока в магнитном поле с индукцией B , направленная по оси Ox , выражается следующим образом:

$$dF_x = B \cdot j_{My}(x, y) \cdot dx \cdot dy \cdot dz.$$

Сила, создаваемая совокупностью элементов тока, находящихся в окрестностях всех точек, принадлежащих зоне действия магнитного потока, определится как

$$F_x = B \cdot \int_{(x-c/2)}^{(x+c/2)} \int_0^b \int_0^\Delta j_y(x, y) \cdot dx \cdot dy \cdot dz. \quad (1)$$

В данном случае полагаем, что индукция магнитного потока B неизменна во всех рассматриваемых точках; по оси Ox выбран диапазон от $(x-c/2)$ до $(x+c/2)$; по оси Oy – диапазон от 0 до b ; по оси Oz – диапазон от 0 до Δ . Здесь b – ширина пластины, Δ – ее толщина, c – ширина постоянного магнита (считаем, что сечение магнитного потока, пронизывающего пластину, соответствует геометрии магнита).

Если учесть замечание, что компонента плотности тока j_y одна и та же для точек с одинаковыми координатами (x, y) , лежащих во всех слоях пластины, т. е. не зависит от координаты z , выражение (1) запишем в виде

$$F_x = B \cdot \Delta \cdot \int_{(x-c/2)}^{(x+c/2)} \int_0^b j_y(x, y) \cdot dx \cdot dy. \quad (2)$$

Известно, что характер распределения тока по пластине, в частности определение компонент плотности тока $j(x, y)$, находится решением уравнения в частных производных. В настоящее время такой результат можно получить при помощи программных продуктов, использующих метод конечных элементов, например COMSOL Multiphysics. Указанный программный продукт позволяет численно оценить не только характер распределения по пластине компонент плотности тока, но также осуществить их интегрирование по выделенным областям, что позволит решить выражение (2).

В процессе аналитических компьютерных исследований задавалась геометрия реальной пластины, являющейся одной из составных частей пакета активного элемента макета двигателя. Это геометрическое описание пластины составлялось из отдельных подобластей, объединяя которые, можно моделировать положение магнита относительно пластины (рис. 3).

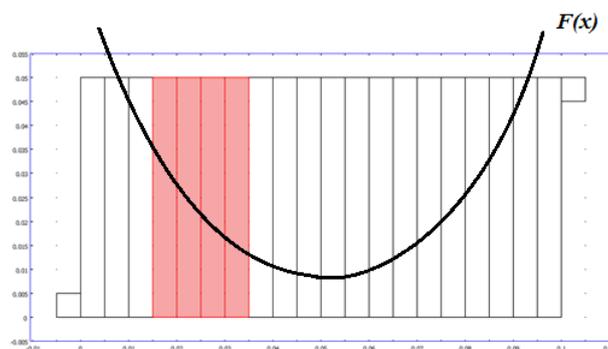


Рис. 3. Характер разбиения пластины на подобласти интегрирования

В результате интегрирования и последующей обработки результатов получена зависимость распределения усилия, создаваемого взаимодействием распределенного по пластине тока и постоянного магнита – источника магнитного поля. На рис. 3 такая зависимость представлена кривой $F(x)$, наложенной на габариты пластины. Приведенная силовая характеристика $F(x)$ соответствует аналогичным, полученным ранее как экспериментальным [3], так и аналитическим путем [4].

Покажем, как многослойный активный элемент, выполненный из ленты, может быть применен в моментном электродвигателе [5], основные элементы которого представлены на рис. 4.

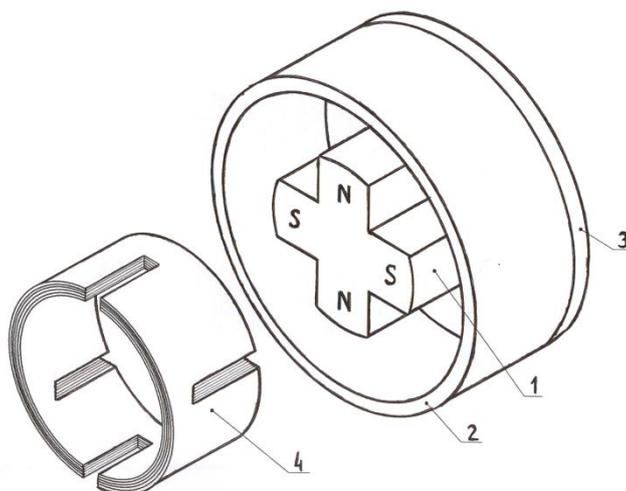


Рис. 4. Основные элементы моментного двигателя

Многополюсный постоянный магнит – 1 соединен с магнитопроводом – 2 немагнитной диафрагмой – 3 в единый узел – ротор двигателя. В зазор между полюсами магнита и магнитопроводом помещается активный элемент – 4, который представляет собой спирально намотанную ленту из электропроводящего материала, преимущественно немагнитного для исключения моментов тяжения при работе двигателя. Лента покрыта слоем изоляционного материала. По боковым краям ленты имеются поперечные вырезы, которые при намотке образуют в активном элементе боковые пазы. Расстояние между центрами получившихся боковых пазов равно полюсному делению магнита. Если к началу и концу ленты подключить источник постоянного тока, то характер протекания тока определяется наличием в ленте поперечных вырезов. Поперечные составляющие этого тока, взаимодействуя с полем постоянного магнита, вызывают появление сил, создающих момент относительно оси вращения ротора моментного двигателя. На рис. 5 представлен элемент ленты, из которой выполняется намотка активного элемента.

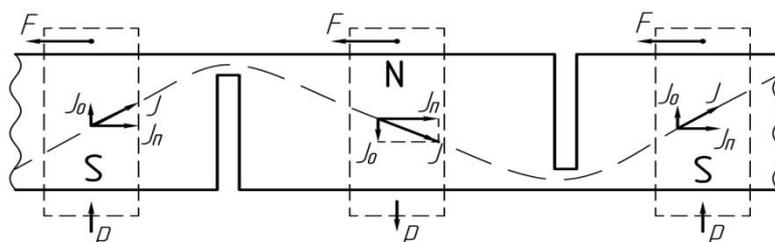


Рис. 5. Фрагмент активного элемента

Поперечные вырезы, выполненные на боковых сторонах ленты, заставляют ток J протекать по диагоналям участков ленты, лежащих между вырезами. При этом ток J имеет две компоненты: J_n – продольную, направленную вдоль ленты, и J_o – поперечную (осевую), направленную поперек ленты в направлении, совпадающем с осью вращения ротора моментного двигателя. Полюсы магнита на рис. 2 изображены прямоугольниками N и S . Предполагается, что полюсы находятся над плоскостью рисунка, и силовые линии магнитного поля, создаваемого полюсом N , входят в плоскость рисунка, а силовые линии полюса S выходят из него. Взаимодействие компонент тока J_o с магнитным полем приводит к появлению сил F , действующих на магнит – источник магнитного поля. Суммарное действие этих сил приводит к появлению вращающего момента, который стремится повернуть магнитную систему относительно неподвижной намотки из ленты. Продольные составляющие тока J_n вызывают появление сил P , которые действуют со стороны магнита на опоры его подвеса. В том случае, если магнит имеет одну пару полюсов, то эти силы создают момент, перпендикулярный оси вращения моментного дви-

гателя, и вызывают радиальную нагрузку на опоры. Если число пар полюсов магнита больше одной, то силы в осевом направлении взаимно компенсируются и в радиальном направлении нагрузки на опоры не создают. Величина полезного момента, создаваемого силами F , будет тем больше, чем больше выполнено витков в намотке, так как под действием магнитного потока полюса будут находиться участки ленты с одним и тем же характером протекания тока.

Основными источниками тепла, выделяемого при протекании тока, будут сужения ленты, образованные вырезами. Однако указанные участки будут охлаждаться за счет оттока тепла в те зоны ленты, где плотность тока невысока, а поверхности охлаждения имеют достаточные размеры. При этом необходимо учесть тот факт, что контактная поверхность активного элемента и трубчатой части корпуса двигателя, на которой монтируется (наматывается) активный элемент, также имеет достаточные размеры для эффективного сброса тепла на корпус, охлаждение которого, в том числе и принудительное, большой технической проблемы не представляет.

Аналогичный многослойный активный элемент может быть применен в конструкции вентильного двигателя [6] (рис. 6), где реализован неограниченный рабочий диапазон углов поворота ротора.

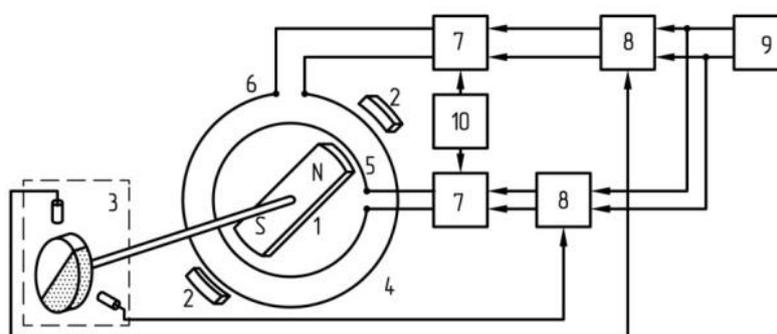


Рис. 6. Структурная схема вентильного двигателя

Ротор в виде постоянного магнита – 1 и магнитопровода – 2 разделены воздушным зазором, в который помещена двухсекционная многосекционная намотка – 4. Переключение секций намотки производится по сигналам датчика положения ротора – 3. В ленте имеются узкие поперечные вырезы, чередующиеся с одного и другого боковых краев так, что центры двух смежных пазов, получаемых при намотке секции за счет совмещения боковых вырезов и расположенных на противоположных торцах секций, находятся на расстоянии, равном полюсному делению магнита ротора. Паза первой секции – 5 сдвинуты на половину полюсного деления магнита ротора относительно аналогичных пазов второй секции – 6. Элементы 7–10 относятся к схеме управления.

Моментный двигатель с ограниченным углом поворота ротора может в некоторых случаях быть использован в импульсном режиме работы. При подаче питания, обеспечивающего достаточно большой ток в намотке, двигатель создает момент, под действием которого происходит вращение ротора (быстрый набор скорости). Начальное положение каждого постоянного магнита ротора относительно соответствующего сектора намотки (рис. 7) задается арретирующим устройством, которое освобождает ротор от зацепления при подаче питания на намотку.

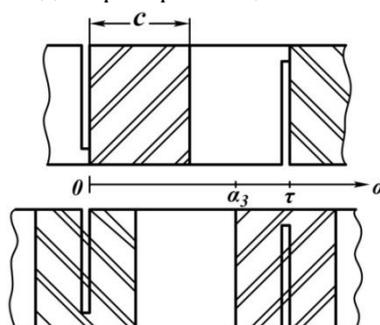


Рис. 7. Взаимное положение ротора и статора

Прекращение подачи тока производится посредством датчика положения ротора, который срабатывает в тот момент, когда центр магнита находится над вырезом, разделяющим две части катушки, в которых направления поперечных токов противоположны. В итоге движение ротора при поданном питании будет осуществлено на угол, соответствующий $(\tau - c/2)$, где τ – полусное деление, c – ширина магнита. Развиваемый при этом момент вызовет вращение ротора с частотой, которую можно определить, решая однородное линейное дифференциальное уравнение $J_M \ddot{\alpha} = M(\alpha)$. Здесь α – угол поворота ротора; $M(\alpha)$ – силовая (моментная) характеристика двигателя.

Экспериментальные и теоретические исследования двигателя показали, что такая зависимость существенно нелинейна (рис. 8). Предложено провести линейно-кусочную аппроксимацию этой зависимости (рис. 9).

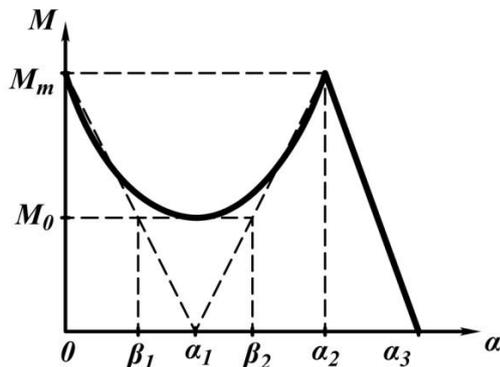


Рис. 8. Силовая характеристика двигателя

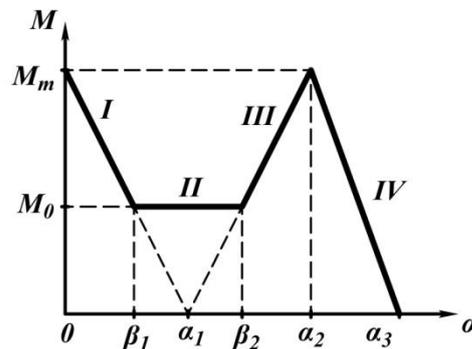


Рис. 9. Линейно-кусочная аппроксимация силовой характеристики

На тех участках, где момент линейно зависит от угла, решаем однородное линейное дифференциальное уравнение, определяем законы изменения $\alpha(t)$, $\dot{\alpha}(t)$, время движения ротора на этом участке. Полученные результаты в конце данного участка будут начальными условиями для решения уравнения на следующем участке.

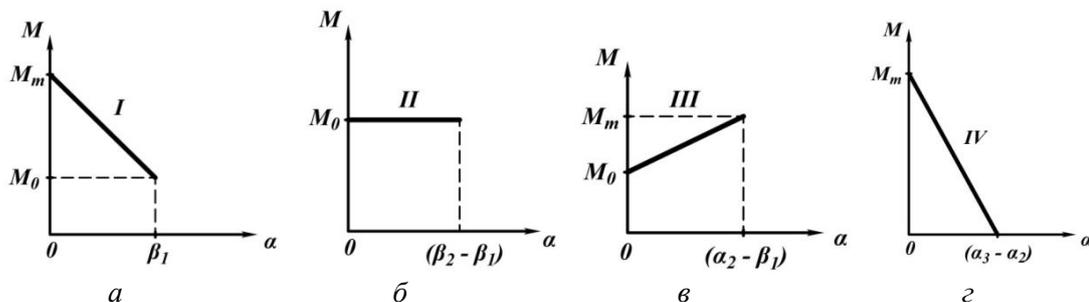


Рис. 10. Линейные участки аппроксимированной силовой характеристики

На участке 1 (рис. 10, а) уравнение движения имеет вид:

$$J_M \ddot{\alpha} = M_m - \frac{M_m}{\alpha_1} \cdot \alpha. \tag{3}$$

Решая уравнение (3), получаем:

$$\alpha(t) = \alpha_1 - \alpha_1 \cdot \cos \sqrt{\frac{M_m}{J \cdot \alpha_1}} \cdot t,$$

$$t_1 = \sqrt{\frac{J \cdot \alpha_1}{M_m}} \cdot \arccos \frac{M_0}{M_m},$$

$$\dot{\alpha}_1 = \sqrt{\alpha_1 \cdot \frac{M_m}{J} \cdot \left(1 - \frac{M_0}{M_m}\right)^2}.$$

Найденный закон изменения скорости $\dot{\alpha}_1$ дает возможность определить начальные условия для расчета движения на втором участке (рис. 10, б), уравнение которого имеет вид:

$$J\ddot{\alpha} = M_0. \quad (4)$$

При решении уравнения (4), получаем:

$$\alpha(t) = \frac{M_0}{2 \cdot J} \cdot t^2 + \dot{\alpha}_1 \cdot t,$$

$$t_2 = \frac{J \cdot \dot{\alpha}_1}{M_0} \left[\sqrt{1 + \frac{2 \cdot M_0^2 \cdot \alpha_2}{J \cdot M_m \cdot \dot{\alpha}_1^2}} - 1 \right],$$

$$\dot{\alpha}_2 = \sqrt{\alpha_1 \cdot \frac{M_m}{J} \cdot \left(1 - \left(\frac{M_0}{M_m}\right)^2\right) \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot M_0^2 \cdot \alpha_2}{J \cdot M_m \cdot \dot{\alpha}_1^2}\right)}.$$

По закону изменения скорости $\dot{\alpha}_2$ определяем начальные условия для расчета движения на третьем участке (рис. 10, в), уравнение которого имеет вид:

$$J\ddot{\alpha} = \frac{M_m - M_0}{\alpha_2 - \beta_2} \cdot \alpha + M_0, \quad (5)$$

При решении уравнения (5), получаем:

$$\alpha(t) = B(\operatorname{ch}At - 1) + \frac{\dot{\alpha}_2}{A} \cdot \operatorname{sh}At,$$

где $A = \sqrt{\frac{M_m - M_0}{J(\alpha_2 - \beta_2)}}; B = \frac{M_0(\alpha_2 - \beta_2)}{M_m - M_0}.$

Время прохождения третьего участка t_3 находим из уравнения:

$$\operatorname{ch}At_3 + \frac{\dot{\alpha}_2}{M_0} \sqrt{\frac{J(M_m - M_0)}{\alpha_2 - \beta_2}} \cdot \operatorname{sh}At_3.$$

Закон изменения скорости на третьем участке:

$$\dot{\alpha}_3 = A \cdot B \cdot \operatorname{sh}At_3 + \dot{\alpha}_2 \cdot \operatorname{ch}At_3.$$

Найденный закон изменения скорости $\dot{\alpha}_3$ дает возможность определить начальные условия для расчета движения на четвертом участке (рис. 10, г), уравнение движения которого имеет вид:

$$J\ddot{\alpha} = M_m - \frac{M_m}{\alpha_3 - \alpha_2} \cdot \alpha, \quad (6)$$

При решении уравнения (6), получаем:

$$\alpha(t) = (\alpha_3 - \alpha_2) \cdot (1 - \cos Ct) + \dot{\alpha}_3 \sqrt{\frac{J(\alpha_3 - \alpha_2)}{M_m}} \cdot \sin Ct,$$

где $C = \sqrt{\frac{M_m}{J(\alpha_3 - \alpha_2)}}, t_4 = \sqrt{\frac{J(\alpha_3 - \alpha_2)}{M_m}} \cdot \arcsin \frac{\alpha_3 - \alpha_2}{\sqrt{(\alpha_3 - \alpha_2)^2 + \dot{\alpha}_3^2 \cdot \frac{J(\alpha_3 - \alpha_2)}{M_m}}},$

$$\dot{\alpha}_4 = (\alpha_3 - \alpha_2) \cdot C \cdot \sin Ct + \dot{\alpha}_3 \cdot C \sqrt{\frac{J(\alpha_3 - \alpha_2)}{M_m}} \cdot \cos Ct.$$

Таким образом определяется частота вращения ротора в конце цикла (в момент отключения питания) и значение импульса момента $M(t)$ за весь цикл движения ротора под действием магнитоэлектрического момента.

Некоторые вопросы практического применения двигателей с ленточной намоткой и результаты их экспериментальных исследований приведены в [7].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волков Н.И., Миловзоров В.П. Электромашинные устройства автоматики. – М: Высшая школа, 1986. – 335 с.
2. Управляемые бесконтактные двигатели постоянного тока / Н.П. Адволоткин, В.Т. Граценков, Н.И. Лебедев и др. – Л: Энергоатомиздат, Ленинград. отд-ние, 1984. – 160 с.
3. Иванова А.Г., Мартемьянов В.М., Плотников И.А. Линейный двигатель с активным пакетным элементом // Приборы и системы. Управление, Контроль, Диагностика. – 2010. – № 11. – С. 36–39.
4. Иванова А.Г., Мартемьянов В.М., Нестеренко Т.Г., Плотникова И.В. Силовая характеристика линейного двигателя с активным пакетным элементом // Приборы и системы. Управление, Контроль, Диагностика. – 2011. – № 7. – С. 19–21.
5. Моментный двигатель: пат. 2441310 Рос. Федерация. № 2010135113/07; заявл. 20.08.10; опубл. 27.01.12, Бюл. № 3. – 6 с.
6. Вентильный двигатель: пат. 2454776 Рос. Федерация. № 2011100190/07; заявл. 11.01.11; опубл. 27.06.12, Бюл. № 18. – 12 с.
7. Иванова А.Г., Мартемьянов В.М., Татарникова К.А., Екимова О.Ю. Применение исполнительных устройств с пакетным элементом в системах автоматики // Контроль. Диагностика. – 2012. – № 13. – С. 173–178.

Поступила 30.01.2013 г.