

Торайғыров университетінің
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Торайғыров университета

Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы
1997 жылдан бастап шығады



ВЕСТНИК Торайғыров университета

Энергетическая серия
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

№ 3 (2020)

Павлодар

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Энергетическая серия
выходит 4 раза в год

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания

KZ19VRY00029272

выдано

Министерство информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

публикация материалов в области электроэнергетики,
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных
и информационных систем, электромеханики
и теплоэнергетики

Подписной индекс – 76136

Бас редакторы – главный редактор

Кислов А. П.

к.т.н., доцент

Заместитель главного редактора

Талипов О. М., *доктор PhD, доцент*

Ответственный секретарь

Приходько Е. В., *к.т.н., профессор*

Редакция алқасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я., *д.т.н., профессор*
Новожилов А. Н., *д.т.н., профессор*
Никитин К. И., *д.т.н., профессор (Россия)*
Никифоров А. С., *д.т.н., профессор*
Новожилов Т. А., *к.т.н., доцент (Россия)*
Оспанова Н. Н., *к.п.н., доцент*
Нефтисов А. В., *доктор PhD, доцент*
Шокубаева З. Ж. *технический редактор*

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели
Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов
При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

<https://doi.org/10.48081/JTYK6551>

**Д. М. Алиханов¹, Ю. А. Цыба²,
Н. К. Алмуратова³, Ю. А. Кузьмин⁴**

¹Казахский национальный аграрный университет,
Республика Казахстан, г. Алматы

^{2,3,4}Алматинский университет энергетики и связи
имени Гумарбека Даукеева,
Республика Казахстан, г. Алматы

ХАРАКТЕРИСТИКИ УНИВЕРСАЛЬНОГО КОЛЛЕКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ РАБОТЕ НА ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ

В статье приводится математическое описание универсального коллекторного двигателя при его работе на переменном токе, в котором учтено наличие нелинейностей в скоростной, механической и рабочих характеристиках. Данная математическая модель позволяет обеспечить точность разработки энергосберегающих способов управления двигателем, используемого в массовом электроприводе малой мощности.

В устройствах автоматики и различных электробытовых приборах широко применяются универсальные коллекторные двигатели (УКД) мощностью от нескольких ватт до нескольких сотен ватт, которые могут работать как от источника постоянного тока, так и однофазного тока.

Универсальные коллекторные двигатели (УКД), в принципе, представляют собой двигатели последовательного возбуждения, работающие от сети как переменного, так и постоянного тока при одинаковой скорости вращения якоря в режиме полной нагрузки. Они развивают большой вращающий момент, имеют ограниченные габаритные размеры и массу вследствие их быстроходности. От машин постоянного тока они отличаются только тем, что магнитная система коллекторных двигателей выполняется полностью шихтованной, а катушки обмотки возбуждения состоят из двух секций и имеют промежуточные выводы. Специфическими требованиями характеризуются и электроприводы ручных ударных

электроинструментов, оборудованных УКД. Они находят широкое применение во всех отраслях народного хозяйства. Это обусловило такие их преимущества, как удобство в эксплуатации, возможности работы в производственных и бытовых условиях, портативность и маневренность, высокий коэффициент полезного действия.

Ключевые слова: универсальный коллекторный двигатель, секционирование обмотки, управление, электромагнитный момент.

Введение

При работе УКД на переменном токе имеется ряд специфических особенностей таких как наличие нелинейностей и непредсказуемой нагрузки на его валу, что делает данный двигатель сложным объектом для управления и для математического описания. При этом математический аппарат дает лишь общее представление о механической и скоростной характеристиках двигателя поскольку магнитная система машины насыщена и кривая намагничивания весьма далека от прямой. Для практических расчетов используются обобщенные универсальные характеристики $\bar{\omega} = f_1(\bar{I})$ и $M = \Psi(\bar{I})$, которые не обеспечивают необходимых пределов точности для разработки энергосберегающих способов управления двигателем с учетом нелинейностей его скоростной и механической характеристик, оптимизации динамического КПД путем синтеза структуры и алгоритмов управления. В этом аспекте разработка математической модели и энергосберегающее управление УКД, используемого в массовом электроприводе малой мощности, является актуальной научной и практической задачей.

Объект исследования: универсальный коллекторный двигатель.

Предмет исследования: математическая модель универсального коллекторного двигателя.

Цель: разработать энергосберегающие способы управления универсальным коллекторным двигателем, по снижению потерь за счет эффективного управления в динамических режимах с оптимизацией динамического КПД путем синтеза структуры и алгоритмов управления.

Задачи: Построить систему уравнений позволяющую более точно учесть нелинейность скоростной, механической и рабочих характеристик УКД при разработке энергосберегающих способов управления универсальным коллекторным двигателем по снижению потерь за счет эффективного управления в динамических режимах с оптимизацией динамического КПД путем синтеза структуры и алгоритмов управления.

Методы и результаты исследования

Универсальный коллекторный двигатель (УКД) устроен принципиально так же, как и двигатель постоянного тока с последовательным возбуждением.

Он отличается от машины постоянного тока только тем, что магнитная система выполняется полностью шихтованной так как в массивных частях магнитной цепи машины постоянного тока при питании ее переменным током возникнут большие тепловые потери, а обмотка возбуждения для переменного тока будет обладать большим индуктивным сопротивлением. Поэтому катушки обмотки возбуждения состоят из двух секций и имеют промежуточные выводы, а симметрирование обмотки возбуждения с обеих сторон якоря позволяет уменьшить радиопомехи, создаваемые двигателем (рисунок 1).

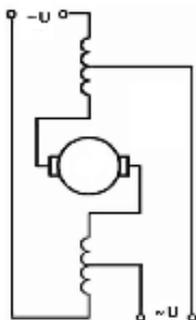


Рисунок 1 – Схема включения универсального коллекторного двигателя

Секционирование обмотки возбуждения делается потому, что в этом режиме из-за падения напряжения в индуктивном сопротивлении двигателя номинальная скорость вращения оказывается меньшей, чем при работе на постоянном токе. Для выравнивания этих скоростей при работе на постоянном токе в цепь якоря включаются все витки обмотки возбуждения, а при работе на переменном токе – только часть их, вследствие чего соответственно уменьшается магнитный поток машины.

Рассмотрим электромагнитный момент при работе УКД на переменном токе. В данном режиме ток якоря i_a и магнитный поток Φ изменяются по синусоидальному закону:

$$i_a = I_{ma} \sin \omega t = \sqrt{2} I_a \sin \omega t; \quad (1)$$

$$\Phi = \Phi_m \sin(\omega t - \gamma), \quad (2)$$

где γ – угол, возникающий из-за потерь в стали.

Мгновенное значение электромагнитного момента определяется выражением

$$M = c_m \Phi_m \sin(\omega t - \gamma) I_{ma} \sin \omega t = \frac{\sqrt{2}c_m}{2} \Phi_m I_a \cos \gamma - \frac{\sqrt{2}c_m}{2} \Phi_m I_a \cos(2\omega t + \gamma). \quad (3)$$

Графики изменения тока i_a , магнитного потока Φ и электромагнитного потока показаны на рисунке 2.

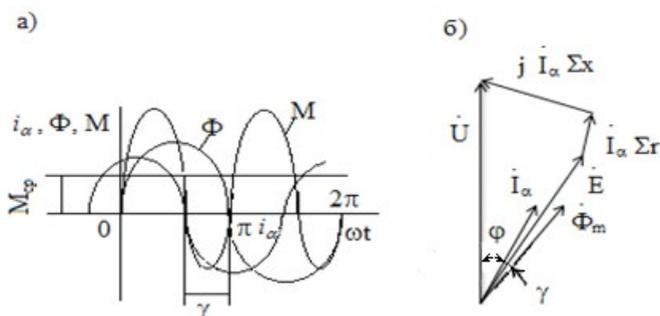


Рисунок 2 – График изменения электромагнитного момента универсального коллекторного двигателя (а) и его векторная диаграмма (б) при работе на переменном токе

Очевидно, что момент двигателя можно представить в виде двух составляющих: постоянной

$$M_{\text{пост}} = \frac{\sqrt{2}c_m}{2} \Phi_m I_a \cos \gamma \quad (4)$$

и переменной, которая изменяется с двойной частотой,

$$M_{\text{пер}} = \frac{\sqrt{2}c_m}{2} \Phi_m I_a \cos(2\omega t + \gamma). \quad (5)$$

Несмотря на то, что электромагнитный момент двигателя является переменным, а в отдельные промежутки времени даже тормозным, якорь двигателя вращается с равномерной скоростью, так как он имеет сравнительно большой момент инерции. Среднее значение момента будет равно:

$$M_{\text{ср}} = M_{\text{пост}} = \frac{\sqrt{2}c_m}{2} \Phi_m I_a \cos \gamma = c'_m \Phi_m I_a. \quad (6)$$

Характеристики двигателя при работе на переменном токе. Векторная диаграмма однофазного коллекторного двигателя строится на основании уравнения

$$\dot{U} + \dot{E} = \dot{I}_a \Sigma r + j \dot{I}_a \Sigma x, \quad (7)$$

где Σr и Σx сумма активных и реактивных сопротивлений в цепи обмотки якоря.

Э.д.с., индуцируемая в обмотке якоря,

$$E = c'_e \Phi_m n. \quad (8)$$

Из формул (7) и (8) можно получить зависимость скорости вращения от тока якоря:

$$n = \frac{E}{c'_e \Phi_m} = \left| \frac{\dot{U} - \dot{I}_a \Sigma r - j \dot{I}_a \Sigma x}{c'_e \dot{\Phi}_m} \right|. \quad (9)$$

На основании (6) и (9) строятся зависимости $n = f(I_a)$, $M = f(I_a)$ и $n = f(M)$.

Так как способ возбуждения машины при работе на постоянном и переменном токе остается неизменным, а формулы (6) и (9) имеют такую же структуру, как и формулы (10) и (11) при работе двигателя на постоянном токе:

$$n = \frac{E}{c_e \Phi} = \frac{U - I_a \Sigma r}{c_e \Phi}; \quad (10)$$

$$M = c_m \Phi I_a, \quad (11)$$

то механические характеристики двигателя при работе в двух указанных режимах будут приблизительно одинаковыми. Однако, при переменном токе в числителе (9) появляется дополнительный член $j \dot{I}_a \Sigma x$ сдвигающий механическую характеристику двигателя в область более низких частот вращения (кривая 2 на рисунке 3, а).

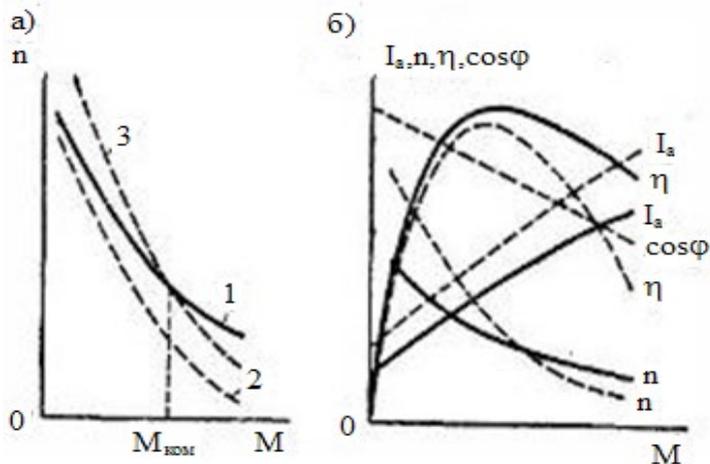


Рисунок 3 – Механические (а) и рабочие (б) характеристики универсального коллекторного двигателя

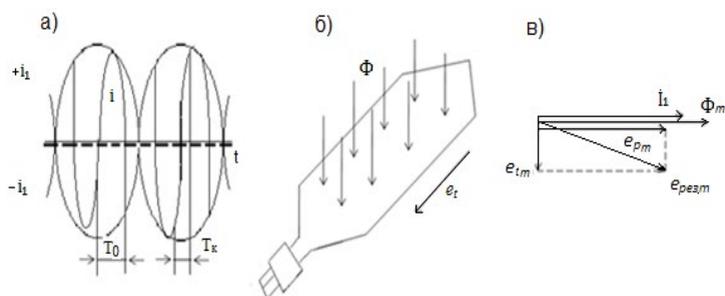
Для того чтобы приблизить ее к механической характеристике, имеющей место при работе на постоянном токе (кривая 1), часть витков обмотки возбуждения при переходе на питание переменным током отключают, т.е. уменьшают магнитный поток машины. При этом обеспечивается одинаковая номинальная частота вращения двигателя в обоих режимах работы (кривая 3). В связи с уменьшением магнитного потока двигателя при переменном токе его магнитная система оказывается менее насыщенной, чем при постоянном токе. Поэтому при работе в рассматриваемом режиме зависимость $M = f(I_a)$ приближается к параболической; $n = f(I_a)$ – к гиперболической в большем диапазоне изменения тока, чем при постоянном токе, а механическая характеристика становится более мягкой.

Рабочие характеристики двигателя (рисунок 3 б) при его работе на постоянном (сплошные линии) и переменном (пунктирные линии) токе имеют приблизительно одинаковую форму. При переменном токе ток якоря больше, чем при постоянном токе, из-за появления реактивной составляющей и увеличения активной составляющей вследствие возрастания потерь в стали. По этим же причинам к. п. д. двигателя при переменном токе меньше, чем при постоянном. Величина двигателя уменьшается с увеличением нагрузки, так как при этом растет реактивное падение напряжения $j\dot{i}_a \sum x$, которое во много раз больше $\dot{i}_a \sum r$.

Регулирование скорости вращения при работе на переменном токе осуществляется так же, как и на постоянном: путем включения в цепь якоря

добавочного сопротивления, изменения питающего переменного напряжения и тока возбуждения (шунтированием обмотки возбуждения).

При работе УКД на переменном токе в коммутлируемой секции кроме реактивной э.д.с. e_p индуцируется еще трансформаторная э.д.с. e_t , так как эта секция пронизывается переменным магнитным потоком. Реактивная э.д.с. возникает так же, как и в машине постоянного тока, в результате изменения тока i_a в коммутлируемой секции при переходе ее из одной параллельной ветви в другую. Однако в данном случае токи $+i_a$ и $-i_a$ в каждой параллельной ветви (рисунок 4, а) не остаются постоянными, а изменяются по синусоидальному закону $i_a = i_{am} \sin \omega t = \frac{\sqrt{2}I_a}{2a} \sin \omega t$.



а – изменение тока в коммутлируемой секции; б – индуцирование трансформаторной э.д.с.; в – векторная диаграмма э.д.с. e_p и e_t коммутлируемой секции.

Рисунок 4 – Возникновение реактивной и трансформаторной э.д.с. в универсальном коллекторном двигателе

Следовательно, реактивная э.д.с. e_p , пропорциональная производной $\frac{di}{dt}$, будет зависеть от величины тока i_a в момент коммутации, т.е. в разные моменты времени она будет различной.

Если пренебречь периодом коммутации T_k по сравнению с временем T_0 между двумя последовательными коммутациями, то можно считать, что

$$\frac{di}{dt} = \frac{2i_a}{T_k} = \frac{\sqrt{2}I_a}{aT_k} \sin \omega t, \tag{12}$$

а реактивная э.д.с

$$e_p = -L_{pez} \frac{\sqrt{2}I_a}{aT_k} L_{pez} \sin \omega t = e_{pm} \sin \omega t, \tag{13}$$

где $e_{pm} = \frac{\sqrt{2}I_a}{aT_k} L_{pez}$ – максимальное значение реактивной э.д.с, которое имеет место при максимальном токе якоря.

Таким образом, реактивная э.д.с. совпадает по фазе с током якоря. Она пропорциональна скорости вращения (период коммутации T_k обратно пропорционален n) и току якоря I_a , так же как в машинах постоянного тока.

Трансформаторная э.д.с. индуцируется в коммутируемой секции переменным магнитным потоком машины (рисунок 4, б). Так как магнитный поток изменяется по закону $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$, то при установке щеток на геометрической нейтрали

$$e_t = 2\pi f w_c \Phi_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right), \quad (14)$$

где w_c – число витков в секции.

Следовательно, если не учитывать незначительную величину угла γ , то она будет сдвинута относительно реактивной э.д.с. на 90° (рисунок 4, в). Результирующая э.д.с. в коммутируемой секции будет изменяться по синусоидальному закону и в некоторые моменты времени будет иметь максимальное значение

$$e_{pez.m} = \sqrt{e_{pm}^2 + e_{tm}^2}. \quad (15)$$

Дополнительные полюса обеспечивают компенсацию e_p , а e_t , остается некомпенсированной и создает добавочный ток, замыкающийся через щетки. Это ухудшает коммутацию машины и может вызвать опасное искрение и значительные радиопомехи. Особенно неблагоприятные условия возникают при пуске двигателя, когда e_t , достигает большой величины из-за увеличенных значений пускового тока и потока возбуждения. По этой причине коллекторные машины переменного тока средней и большой мощностей не получили широкого применения. В универсальных коллекторных двигателях малой мощности e_t , невелика и практически не ограничивает его нагрузку, как это имеет место в более мощных машинах.

Проведенный математический анализ позволяет получить обобщенную математическую модель УКД, при его работе на переменном токе, которую можно представить следующим образом:

$$\begin{aligned}
 i_a &= I_{ma} \sin \omega t = \sqrt{2} I_a \sin \omega t; \\
 \Phi &= \Phi_m \sin(\omega t - \gamma); \\
 M &= c_n \Phi_m \sin(\omega t - \gamma) I_{ma} \sin \omega t = \frac{\sqrt{2} c_n}{2} \Phi_m I_a \cos \gamma - \\
 &\quad \frac{\sqrt{2} c_n}{2} \Phi_m I_a \cos(2\omega t + \gamma); \\
 M_{\text{пост}} &= \frac{\sqrt{2} c_n}{2} \Phi_m I_a \cos \gamma; \\
 M_{\text{пер}} &= \frac{\sqrt{2} c_n}{2} \Phi_m I_a \cos(2\omega t + \gamma); \\
 M_{\text{ср}} &= M_{\text{пост}} = \frac{\sqrt{2} c_n}{2} \Phi_m I_a \cos \gamma = c'_n \Phi_m I_a; \\
 n &= \frac{E}{c'_e \Phi_m} = \left| \frac{\dot{U} - \dot{I}_a \Sigma r - j \dot{I}_a \Sigma x}{c'_e \dot{\Phi}_m} \right|; \\
 \frac{di}{dt} &= \frac{2i_a}{T_k} = \frac{\sqrt{2} I_a}{a T_k} \sin \omega t; \\
 e_p &= -L_{\text{pez}} \frac{\sqrt{2} I_a}{a T_k} \sin \omega t = e_{pm} \sin \omega t; \\
 e_t &= 2\pi f w_c \Phi_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}); \\
 e_{\text{pez.m}} &= \sqrt{e_{pm}^2 + e_{tm}^2}.
 \end{aligned} \tag{16}$$

Выводы

Данная система уравнений позволяет более точно учесть нелинейность скоростной, механической и рабочих характеристик УКД при разработке энергосберегающих способов управления двигателем по снижению потерь за счет эффективного управления в динамических режимах с оптимизацией динамического КПД путем синтеза структуры и алгоритмов управления.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Мин Ту Аунг, Суздорф, В. И.** Энергосберегающее управление двигателем последовательного возбуждения // 4-й международный форум молодых ученых и аспирантов. – Томск : ТПУ. – 10.10.2016.

2 **Усольцев, А. А.** Электрический привод : Учебное пособие. – СПб. : НИУ ИТМО, 2012. – 238 с.

3 **Гарман-Галкин, С. Г.** Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб. : КОРОНА – Век, 2008.

References

1 **Min Tu Aung, Suzdorf, V. I.** E'nergoberegauchee upravlenye dvigatelem posledovatel'nogo возбуждения. 4 mezhdunarodny forum molodix uchenih i aspirantov. [Energy-saving control of a sequential excitation motor] In 4th international forum of young scientists and graduate students. – Tomsk : TPU. – 10.10.2016.

2 **Usoltcev, A. A.** Electricchesky privod : Uchebnoe posobyе. [Electric drive : Study guide]. – St. Petersburg : NIU ITMO, 2012. – 238 p.

3 **Garman-Galkin, S. G.** Matlab & Simulink. Proektyrovanye mexatronnih sistem na PK [Designing mechatronic systems on a PC]. – St. Petersburg : KORONA – Century, 2008.

Материал поступил в редакцию 30.09.20.

Д. М. Алиханов¹, Ю. А. Цыба², Н. К. Алмуратова³, Ю. А. Кузьмин⁴

Айнымалы токпен жұмыс істеу кезіндегі әмбебап коллекторлы қозғалтқыштың сипаттамалары

¹Қазақ ұлттық аграрлық университеті,
Қазақстан Республикасы, Алматы қ.;

^{2,3,4}Ғұмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика
және байланыс университеті,

Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

Материал 30.09.20 баспаға түсті.

D. Alixanov¹, Y. Tsyba², N. Almuratova³, Y. Kuzmin⁴

Characteristics of a universal collector engine when operating on AC

¹Kazakh National Agrarian University,

Republic of Kazakhstan, Almaty;

^{2,3,4}Almaty University

of Power Engineering and Telecommunications,

Republic of Kazakhstan, Almaty.

Material received on 30.09.20.

Мақалада айнымалы токта жұмыс істейтін әмбебап коллекторлы қозғалтқыштың механикалық және жұмыстық сипаттамаларында жылдамдықтың сызықсыздығының болмауын ескертіп математикалық сипаттамасы берілген. Бұл математикалық модель бізге аз қуатты көп қолданыс табатын электр жетегінде қолданылатын энергия үнемдейтін қозғалтқышты басқару әдістерінің дәлдігін қамтамасыз етуге мүмкіндік береді.

Автоматтандыру құрылғыларында және әртүрлі электр құрылғыларында тұрақты ток көзінен де, бір фазалы токтан да жұмыс істей алатын бірнеше ватттан бірнеше жүз ваттқа дейінгі күші бар әмбебап коллекторлы қозғалтқыштар (ӘКҚ) кеңінен қолданылады.

Әмбебап коллекторлы қозғалтқыштар (ӘКҚ), негізінен, толық жүктеме режимінде бір арматураның айналу жылдамдығында айнымалы және тұрақты ток желілерінен жұмыс істейтін дәйекті қоздыру қозғалтқыштары. Олар жоғары айналу моментін дамытады, үлкен жылдамдықтың арқасында өлшемдері мен салмағы шектеулі. Олардың тұрақты ток машиналарынан айырмашылығы тек коллекторлы қозғалтқыштардың магниттік жүйесі толығымен ламинатталған, ал өріс орамасының катушкалары екі бөлімнен тұрады және аралық сымдарға ие. ӘКҚ-мен жабдықталған қолмен соғылатын электр құралдарының электр жетектері де нақты талаптармен сипатталады. Олар халық шаруашылығының барлық салаларында кеңінен қолданылады. Бұл олардың пайдаланудың қарапайымдылығы, өндірістік және тұрмыстық жағдайларда жұмыс қабілеттілігі, портативтілік пен маневрлік, жоғары тиімділік сияқты артықшылықтарына әкелді.

Кілтті сөздер: универсалды коллекторлы қозғалтқыш, секциялы орама, басқару, электр магнитті момент.

The article provides a mathematical description of a universal commutator motor when it is running on alternating current, which takes into account the presence of nonlinearities in speed, mechanical and operating characteristics. This mathematical model allows us to ensure the accuracy of the development of energy-saving engine control methods used in a low-power mass drive.

In automation devices and various electrical household appliances, universal collector motors (UCM) with a power from several watts to several hundred watts are widely used, which can operate both from a direct current source and a single-phase current.

Universal collector motors (UCM), in principle, are sequential excitation motors operating from both AC and DC mains at the same armature rotation speed in full load mode. They develop high torque, have limited dimensions and weight due to their high speed. They differ from DC machines only in that the magnetic system of the collector motors is completely laminated, and the field winding coils consist of two sections and have intermediate leads. Electric drives of hand-held percussion power tools equipped with UCM are also characterized by specific requirements. They are widely used in all sectors of the national economy. This led to their advantages such as ease of use, the ability to work in industrial and domestic conditions, portability and maneuverability, high efficiency.

Keywords: universal collector motor, winding sectioning, control, electromagnetic torque.

Теруге 30.09.2020 ж. жіберілді. Басуға 14.10.2020 ж. қол қойылды.
Электронды баспа
2,99 Мб RAM
Шартты баспа табағы 23,30. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.
Компьютерде беттеген: А. Елемесқызы
Корректор: А. Р. Омарова
Тапсырыс № 3707

Сдано в набор 30.09.2020 г. Подписано в печать 14.10.2020 г.
Электронное издание
2,99 Мб RAM
Усл. печ. л. 23,30. Тираж 300 экз. Цена договорная.
Компьютерная верстка: А. Елемесқызы
Корректор: А. Р. Омарова
Заказ № 3707

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған
«Торайғыров университет»
коммерциялық емес акционерлік қоғамы
140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы
«Торайғыров университет»
коммерциялық емес акционерлік қоғамы
140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.
8 (7182) 67-36-69
e-mail: kereku@tou.edu.kz
www.vestnik.tou.edu.kz