УДК 62-592.117: 621.313.13

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЕ ТОРМОЗНОЕ УСТРОЙСТВО С ПОВЫШЕННЫМ ТОРМОЗНЫМ МОМЕНТОМ ДЛЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Бочкарев Игорь Викторович, *д.т.н., профессор, кафедра «Электромеханика» КГТУ им. И.Раззакова, Кыргызстан, 720044, г.Бишкек, пр.Манаса 66. Тел. 0555 09-07-51, e-mail: elmech@mail.ru, orcid.org/0000-0002-9873-9203.*
Галбаев Жалалидин Токтобаевич*, д.т.н., профессор, кафедра «Электромеханика» КГТУ им. И. Раззакова, Кыргызстан, 720044, г.Бишкек, пр.Манаса 66. Тел. 0772-501-896, e-mail: jalal1603@mail.ru, ORCID ORD 0000-0002-9460-2242.*

Аннотация. Приведены результаты разработки электромеханических тормозных устройств с механическим усилителем тормозного момента в виде пружинно-кулачковой муфты, который за счет эффекта самоусиления позволяет увеличить тормозной момент без увеличения усилия тормозной пружины и, соответственно, без увеличения габаритных размеров растормаживающего электромагнита. Получены аналитические выражения, позволяющие выбирать основные параметры механического усилителя при проектировании тормоза.

Ключевые слова: электромеханическое тормозное устройство, фрикционный узел, растормаживающий электромагнит, механический усилитель момента, пружинно-кулачковая муфта, тормозной момент, уравнение движения ротора электродвигателя.

ELECTROMECHANICAL BRAKE DEVICE WITH HIGH BRAKE MOMENT FOR ELECTRIC MOTORS

Bochkarev Igor Viktorovich*, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department "Electromechanics" KSTU. I. Razakova, Kyrgyzstan, 720044, Bishkek city, Manasa avenue 66. Tel. 0555 09-07-51, e-mail: elmech@mail.ru, orcid.org/0000-0002-9873-9203.*
Galbaev Jalalidin Toktobaevich, *Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Electromechanics, KSTU. I. Razakova, Kyrgyzstan, 720044, Bishkek city, Manasa avenue 66. Tel. 0772-501-896, e-mail: jalal1603@mail.ru, ORCID ORD 0000-0002-9460-2242.*

Abstract. The results of the development of electromechanical braking devices with a mechanical brake torque enhancer in the form of a spring-clutch coupling are presented. Due to the

self-amplification effect, it is possible to increase the braking torque without increasing the brake spring force and, correspondingly, without increasing the size of the disinhibiting electromagnet. Analytical expressions are obtained that allow choosing the main parameters of a mechanical amplifier when designing a brake.

Key words: electromechanical braking device, friction unit, disinhibiting electromagnet, mechanical moment amplifier, spring-clutch coupling, braking torque, motor motor rotor motion equation.

Введение. Повышение технического уровня технологического оборудования, в первую очередь, связано с совершенствованием характеристик и расширением функциональных возможностей их электропривода. Проведенный анализ показал, что по условиям эксплуатации различного автоматизированного оборудования все шире требуются электропривода, которые должны осуществлять быстрое принудительное торможение и последующую фиксацию или позиционирование различных подвижных органов в разомкнутых и замкнутых системах регулирования. К электродвигателям таких приводов предъявляются жесткие требования к времени пуска и останова. Поэтому для обеспечения требуемых параметров быстродействия, а также для повышения безопасности работы в таких приводах необходимо применение специальных тормозных устройств, которые при отключении электродвигателя от сети обеспечивают быстрый останов ротора и связанных с ним движущихся частей оборудования. При отключении питания электродвигателя даже при отсутствии специальных тормозных устройств возникает процесс самоторможения и движение прекращается под действием момента M_c сил сопротивления. Но за счет того, что применяемые на практике механизмы передачи движения обычно не самотормозящиеся и значения M_c невелики, то время самоторможения оказывается большим и заметно влияет на производительность труда. Кроме того, используя свободное самоторможение невозможно обеспечить точное приведение рабочих органов в заданное положение и таким образом, высокую точность выполнения заданных технологических операций. Следовательно, для повышения производительности за счет уменьшения длительности вспомогательных действий, выполняемых оборудованием (взаимные подводы и отводы инструментов и заготовки, остановка и фиксация в точке позиционирования различных рабочих органов и кинематических звеньев и т.п.), а также для повышения точности обработки, электроприводы должны иметь специальные тормозные устройства для принудительного ускоренного торможения. Кроме того, для повышения качества позиционирования необходимо иметь большую и стабильную величину тормозного усилия F_m как на период торможения, так и после отключения напряжения питания.

Таким образом, от параметров и характеристик тормозных устройств в значительной степени зависят обеспечение технологических режимов работы оборудования, изготовление продукции с допустимыми геометрическими погрешностями, производительность обработки, а также надежность и безопасность эксплуатации оборудования.

Цели и методы. Одна из основных проблем при разработке электромеханических тормозных устройств (ЭМТУ) для электродвигателей, применяемых в позиционных автоматических электроприводах для станков и промышленных роботов, состоит в необходимости получения значительных тормозных моментов при ограничении массогабаритных показателей тормоза. Как показали проведенные исследования, одновременное выполнение этих взаимоисключающих требований может быть обеспеченно путем использования механического усилителя тормозного момента, который за счет эффекта самоусиления при торможении [1] позволяет увеличить тормозной момент без увеличения усилия тормозной пружины и, соответственно, без увеличения габаритных размеров растормаживающего электромагнита. Поэтому была поставлена и решена задача создания перспективной конструкции электромеханического тормоза с механическим

усилителем тормозного момента в виде пружинно-кулачковой муфты и разработки аналитических выражений, позволяющих выбирать основные параметры этой муфты при проектировании тормоза. Результаты этой работы приведены в данной статье.

Результаты исследования. Конструкция ЭМТУ с механическим усилителем тормозного момента изображена на рис. 1 [2, 3].

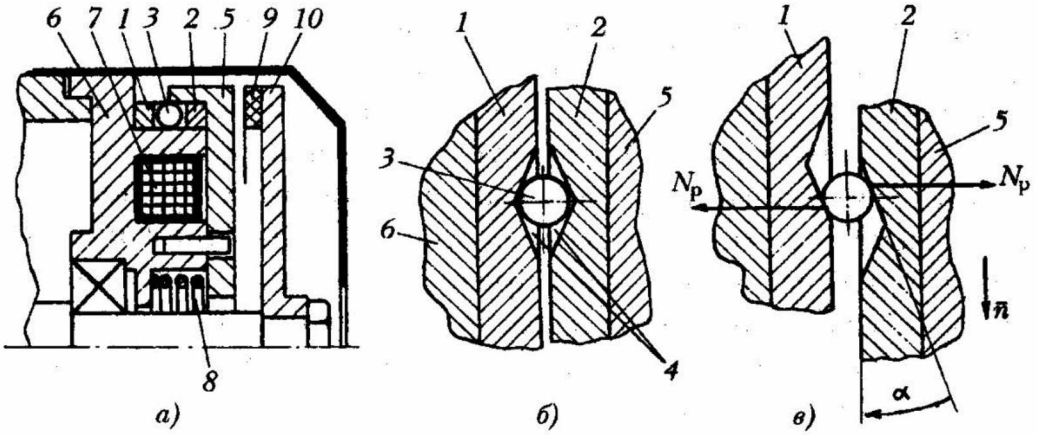

Рис. 1. Тормозное устройство с механическим усилителем тормозного момента:
а – общий вид; б – положение деталей усилителя при разомкнутом тормозе; в – силы, действующие при торможении

Механический усилитель выполнен в виде системы из двух отжимных шайб *1* и *2* и шариков *3*, размещенных в клиновидных канавках *4*, выполненных на смежных поверхностях шайб. При разомкнутом ЭМТУ (рис. 1,*а*) на якорь *5* действует только тяговое усилие растормаживающего электромагнита, за счет чего шайбы *1* и *2* занимают такое положение, при котором шарик *3* не препятствует притягиванию якоря *5* к магнитопроводу *6* (рис. 1,*б*). При отключении обмотки *7* пружины *8* прижимают якорь *5* к фрикционным накладкам *9* тормозного диска *10*. Якорь при этом под воздействием диска *10* совершает угловое перемещение в пределах ограниченного угла поворота относительно направляющих штифтов (направление перемещения *n* показано на рис.1,*в* стрелкой). За счет этого шайба *2* поворачивается относительно шайбы *1* и шарики *3* раздвигают шайбы *1* и *2*. Это приводит к появлению распорной силы N_p, которая совместно с усилием пружин *8* прижимает якорь к тормозному диску, обеспечивая увеличение тормозного момента. Для исключения заклинивания шариков угол α выполняют равным $30 \div 35^0$ [1].

Для обеспечения механического усиления тормозного момента однодискового ЭМТУ с двумя парами поверхностей трения, тормозной диск, согласно [4], может быть выполнен из двух частей. На их смежных поверхностях выполнены конические выемки, где помещаются шарики, действие которых при угловом перемещении одной из частей аналогично описанному выше.

Общим недостатком данных конструкций является то, что вся кинетическая энергия подвижных частей электропривода, которые должны быть остановлены тормозом, рассеивается в фрикционном узле, что вызывает его повышенный нагрев и износ.

Для ликвидации указанного недостатка была разработана конструкция тормоза, представленная на рис. 2. В этой конструкции дополнительное тормозное усилие действует со стороны тормозного диска. Ведущая полумуфта *1* жестко закреплена на валу *2*, а ведомая полумуфта *3*, жестко соединенная с тормозным диском-вентилятором *4*, установлена на валу с возможностью осевого перемещения.

В режиме торможения, когда электромагнит отключается от источника питания и якорь *5* прижимается пружиной *6* к тормозному диску *4*, на ведомой полумуфте *3* появляется тормозной момент, и она вместе с тормозным диском *4* перемещается к магнитопроводу *7*, сжимая при этом пружину *6*. Это повышает эффективность торможения. Причем часть кинетической энергии вращающегося вала превращается в потенциальную энергию сжатой пружины *6*, которая после остановки вала используется для возврата якоря и ведомой полумуфты в исходное состояние.

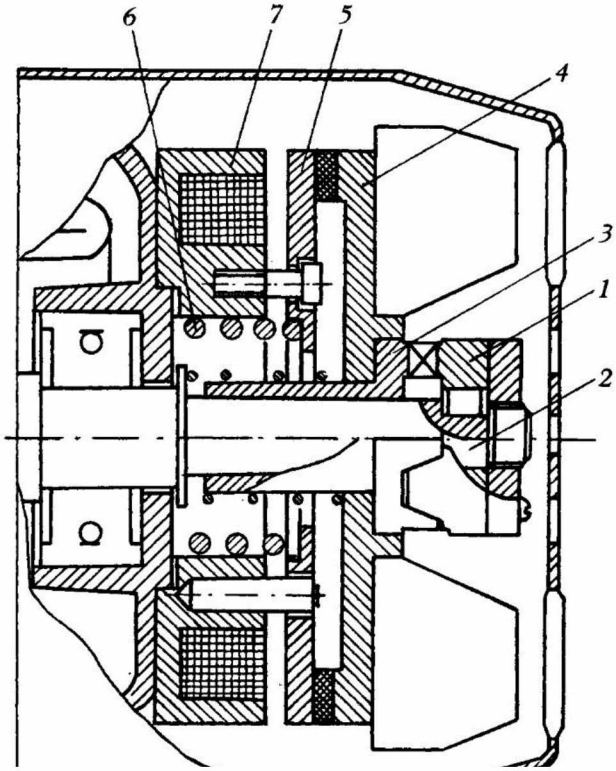

Рис. 2. Тормозное устройство с механическим усилителем тормозного момента в виде пружинно-кулачковой

Полумуфты *1* и *3* образуют пружинно-кулачковую муфту. При этом вал *2* электродвигателя является ведущим, а полумуфту *3* с закрепленным на ней диском-вентилятором *4* следует рассматривать как ведомый вал. Работа тормоза основана на том, что ведомая полумуфта, стремясь выйти из зацепления с ведущей, начинает перемещаться в осевом направлении лишь после того, как осевая составляющая окружного усилия станет больше противодействующей силы пружины $P_{пр}$. Это возможно в том случае, когда момент *M*, нагружающий ведомый вал, превысит некоторое критическое значение $M_{кр}$

$$M > M_{кр} \qquad (1)$$

В этом выражении величина $M_{кр}$ рассчитывается по формуле [5]

$$M_{кр} = \frac{P_{пр} \cdot r_c}{tg\alpha(\alpha - \rho) - k_в \dfrac{r_c}{r_в}}, \qquad (2)$$

где r_c – средний радиус зацепления кулачков муфты; ρ - угол трения в кулачках; k_B – коэффициент трения между валом и ведомой полумуфтой; $r_в$ - радиус вала; α – угол зацепления кулачков муфты.

Рассмотрим работу тормоза в различных режимах.

<u>*Растормаживание электродвигателя*</u>. После включении электродвигателя вал *2* вместе с ведущей полумуфтой *1* начинает поворачиваться. При этом ведомая полумуфта *3*, тормозной диск *4* и якорь *5* растормаживающего электромагнита в силу неравенства (1) станут перемещаться вдоль вала в сторону, противоположную действию пружины *6*, до тех пор, пока торец ведомой полумуфты *3* не достигнет упора, выполненного на валу. При этом муфта не выходит из зацепления, а якорь за счет сообщенной ему кинетической энергии проходит рабочий воздушный зазор (0,2÷0,3 мм) и, достигнув магнитопровода *7*, удерживается возле него тяговым усилием растормаживающего электромагнита. Вал *2* вместе с ведущей *1* и ведомой *3* полумуфтами начинает свободно вращаться, тормозной диск-вентилятор *4* с ведомой полумуфтой под действием пружины сцепления возвращается в исходное положение. Это становится возможным в связи с тем, что полумуфты оказываются нагруженными моментов вентилятора, значительно меньшим, чем момент $M_{кр}$.

При растормаживании в зависимости от соотношения конструктивных параметров муфты возможны несколько различных режимов работы:

1. При перемещении ведомой полумуфты вдоль вала проскальзывание в паре трения между якорем *5* и диском *4* отсутствует, если

$$M < M_T \ , \qquad (3)$$

где M_T – тормозной момент:

$$M_T = P_{пр} \cdot k_T \cdot r_T \ , \qquad (4)$$

где k_T – коэффициент трения в паре трения между якорем *5* и диском *4*; r_T – средний радиус действия силы трения.

В этом случае ведомый вал будет нагружен моментом

$$M = M_д - M_c \ , \qquad (5)$$

где $M_д$ – момент двигателя; M_c - момент сил сопротивления, действующих на вал электродвигателя со стороны приводного механизма.

Из (1), (3) и (5) условие работоспособности тормоза определяется как

$$M_к < M_д - M_c < M_T \ . \qquad (6)$$

Из (6) следует, что тормоз должен иметь $M_T > M_к$. Тогда, принимая во внимание (2) и (4), получим

$$tg\alpha(\alpha - \rho) > r_c / (k_T \cdot r_T) + k_в \cdot r_c / r_d \qquad (7)$$

Зависимость (7) позволяет выбрать основные конструктивные параметры муфты на стадии проектирования тормоза.

2. При несоблюдении условия (7), если момент двигателя увеличится до величины $M_д > M_T + M_c$, в паре трения между якорем *5* и диском *4* начинается проскальзывание и ведомый вал нагружается моментом

$$M = M_T + J_в \frac{d\omega}{dt} \ , \qquad (8)$$

где $J_в$ – момент инерции диска-вентилятора *4* с полумуфтой *3*; ω – угловая частота вращения; t – время.

Исходя из закона сохранения энергии, уравнение движения ротора электродвигателя в данном случае запишется в следующем виде:

$$M_д - M_c = M_T + (J_в + J_p)\frac{d\omega}{dt} \ , \qquad (9)$$

где J_p – суммарный момент инерции ротора, вращающихся частей тормоза и приводного механизма, приведенные к оси машины.

Тогда из (9) с учетом (1) и (8) получим

$$\frac{M_к - M_T}{J_в} < \frac{d\omega}{dt} < \frac{M_д - M_c - M_к}{J_p} \ , \qquad (10)$$

Из выражения (10) следует, что растормаживание возможно, если

$$M_д - M_c > M_к(1 + \frac{J_p}{J_в}) - M_T \frac{J_p}{J_в} \ . \qquad (11)$$

Таким образом, видно, что если условие (7) не соблюдается, то растормаживание возможно только для ограниченного ряда нагрузок электродвигателя и обязательно сопровождается проскальзыванием в паре трения «якорь *5* - диск *4*», что определяет повышенный износ фрикционной накладки по сравнению с первым режимом работы, при котором выполняется условие (6).

Торможение электродвигателя. При выключении электродвигателя обмотка растормаживающего электромагнита также отключается от источника питания. Тяговое усилие электромагнита уменьшается до нуля и усилием тормозной пружины *6* якорь *5*

прижимается к фрикционной накладке тормозного диска *4*. Ведомая полумуфта *3* нагружается моментом M_T и в силу (1) и (7) начинает перемещаться вместе с якорем вдоль вала, сжимая при этом пружину *6* и увеличивая тем самым момент M_T. Кинетическая энергия вала и вращающихся масс приводного механизма частично выделяется в виде тепла в паре трения «якорь *5* - диск *4*» и частично переходит в потенциальную энергию сжатия пружины 6.

Следует отметить, что механический усилитель тормозного момента автоматически увеличивает тормозной момент заторможенного вала при возрастании на нем статической нагрузки (например, в режиме удержания увеличивающегося груза в подъемных устройствах). Это обеспечивается за счет того, что ведомая полумуфта *3* при увеличении нагрузки на валу перемещается вдоль оси к магнитопроводу электромагнита и сжимает тормозную пружину *6*, увеличивая тем самым тормозной момент.

Выводы. Описанное тормозное устройство отличается от известных следующими свойствами:

1. Величина тормозного момента M_T может быть увеличена без увеличения усилия тормозных пружин за счет введения механического усилителя тормозного момента в виде пружинно-кулачковой муфты.

2. Используя простую и надежную однодисковую конструкцию тормозного фрикционного узла можно добиться увеличения тормозного момента M_T до весьма больших значений, например, превышающих величину пускового момента электродвигателя, без применения конусного фрикционного узла или многодисковой конструкции [6], которые существенно усложняют конструкцию, технологию изготовления и условия эксплуатации тормоза.

3. Массогабаритные показатели, потребляемая мощность и стоимость уменьшаются, поскольку растормаживающий электромагнит должен обеспечить тяговое усилие, необходимое только для удержания якоря в притянутом к магнитопроводу положении, а его перевод в это положение обеспечивается в основном кулачковой муфтой.

4. Повышается быстродействие перевода тормоза как в режим растормаживания вала электродвигателя, так и в режим его торможения. Быстродействие при включении двигателя достигается передачей механического усилия, действующего на вал при пуске, непосредственно на якорь растормаживающего электромагнита и быстрым уменьшением тем самым воздушного зазора между якорем и магнитопроводом. Быстродействие тормоза при выключении электродвигателя обеспечивается увеличением усилия тормозной пружины, дополнительно сжимаемой кулачковой муфтой.

5. Уменьшается износ тормозной накладки, поскольку часть кинетической энергии при торможении преобразуется в потенциальную энергию сжатой пружины, которая после остановки вала используется для возврата элементов тормоза в исходное состояние.

6. Тормозной момент автоматически увеличивается при увеличении статической нагрузки на валу электродвигателя.

7. Варьируя углом зацепления α, можно без изменения габаритных размеров растормаживающего электромагнита и фрикционного узла изменять величину составляющей момента электродвигателя, сжимающей тормозную пружину, и, тем самым, регулировать величину тормозного момента на валу электродвигателя.

8. Полученные аналитические зависимости позволяют выбрать основные конструктивные параметры муфты на стадии проектирования тормоза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тормозные устройства: Справочник. М. П. Александров, А. Г. Лысяков, В. Н. Федосеев, М. В. Новожилов / Под общ. ред. М. П. Александрова. – М.: Машиностроение. 1985.

2. А.с. 413586 СССР. Электродвигатель со встроенным в корпус тормозным устройством /Ю. П. Шевель, Э. М. Гусельников. В. И. Агалаков // Открытия. Изобретения. 1974. №4.

3. Тармаев В.Б., Гусельников Э.М. Исследование динамики тормозного электродвигателя с механическим усилителем // Изв. ТПИ, 1974. Т.200.

4. Пат. 4280073 США. Electromagnetically released spring applied friction brake with torque booster / L. Donald Miller. Facet Enterprises Inc/ // 21.07.81.

5. Иванов Е.А. Муфты приводов. – М.: Машгиз. 1959.

6. Бочкарев И.В. Быстродействующие электромеханические тормозные устройства для электродвигателей. – М.: Энергоатомиздат. 2001.