

АКТИВНАЯ КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНЫХ МОМЕНТОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТИПА

А.Е. Антонов, докт. техн. наук, **А.А. Филоменко**, вед. инж.

Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

Рассмотрены принципы построения электромеханических преобразователей энергии магнитоэлектрического типа, в которых реактивное действие усилий и моментов, создаваемых в активной зоне преобразования, скомпенсировано электромагнитными силами и моментами обратного знака. Рассмотрены также подходы к компенсации гироскопического момента в высокооборотных приводных устройствах с большим кинетическим моментом вращающейся части. Библ. 2, рис. 4.

Ключевые слова: реактивный момент, бесконтактный магнитоэлектрический двигатель, магнитная пружина, гироскопический момент.

Существует особый класс ручных инструментов с электроприводом, в которых требуется реализовать возвратно-вращательное или возвратно-поступательное движение рабочего органа. Такие инструменты применяются, например, в строительстве при уплотнении грунта или бетонной массы, в инструментальном производстве при ручной шлифовке форм, в авиационной и автомобильной промышленности при выполнении клепальных работ, а также при проведении некоторых процедур в медицине и косметологии. Особенность такого инструмента состоит в реактивном воздействии линейного или вращательного виброускорения на статорную систему привода, а через него на руки работающего с инструментом специалиста. Вибрационное воздействие вызывает быструю утомляемость работника, снижение производительности труда и, в конечном счете, приводит к профессиональным заболеваниям. Применяемые методы снижения такого воздействия путем поглощения энергии знакопеременного движения инструмента малоэффективны и не обеспечивают полной защиты от вибрации.

В промышленности применяются динамические виброгасители, представляющие собой колебательную систему, состоящую из пассивной массы, соединенной с корпусом посредством упругой связи. Подбором массы и жесткости упругой связи достигается равенство частот собственных колебаний системы и частоты колебаний рабочего органа инструмента. Недостаток такого виброгасителя очевиден: он работает только на одной частоте настройки, соответствующей резонансному режиму работы. В случае ручного инструмента при таком способе виброгашения еще и растет удерживаемая в руках масса, поскольку гаситель колебаний жестко крепится на вибрирующем корпусе прибора.

Предлагаем иной подход к решению проблемы виброзащиты, суть которого состоит в создании компенсирующих сил или моментов, действующих синхронно, но противофазно силам, создаваемым основным приводом инструмента во всем диапазоне рабочих частот. При этом компенсирующие усилия могут выполнять полезную работу наравне с основным приводом, не снижая, таким образом, общего КПД устройства.

В случае реализации возвратно-вращательного движения инструмента знакопеременное движение основного ротора, жестко соединенного с инструментом, обеспечивается путем введения упругой магнитной связи между ротором и статором приводного двигателя с помощью магнитной пружины, величина момента упругости которой изменяется по гармоническому закону в зависимости от угла поворота ротора. Чем больше угол отклонения ротора под воздействием управляющего электромагнитного момента, тем больше сила упругости, поэтому при некотором угле отклонения ротора электромагнитный момент оказывается уравновешенным моментом магнитной пружины. В этой точке принудительно меняется знак электромагнитного момента и начинается движение ротора в обратную сторону [1].

Для создания компенсирующих усилий или моментов в электромеханическую часть прибора необходимо ввести второй ротор, совершающий такое же возвратно-вращательное движение, но противофазно первому ротору. Математическая модель системы, состоящей из двух синхронно управляемых подпружиненных роторов, рассмотрена в работе [2]. Из нее следует, что условием компенсации моментов реакции привода является равенство электромагнитных моментов и моментов магнитных пружин, действующих на первый и второй роторы со стороны статора: $M_{Эм1} = M_{Эм2}$; $M_{Мн1} = M_{Мн2}$.

Обеспечение равенства этих моментов и является основной задачей проектирования при построении подобной системы компенсации реактивных моментов. Величины моментов в рассматриваемой магнитоэлектрической системе определяются потокосцеплениями намагниченных роторов с соответствующими обмотками управления и магнитными элементами магнитных пружин:

$$-\Psi_{X1} \cdot i_X \cdot \cos \gamma_1 + \Psi_{Z1} \cdot i_{Z1} \cdot \sin \gamma_1 + \Psi_{X2} \cdot i_X \cdot \cos \gamma_2 - \Psi_{Z2} \cdot i_{Z2} \cdot \sin \gamma_2 = 0,$$

где Ψ_{X1}, Ψ_{X2} – потокосцепления роторов с обмоткой управления; Ψ_{Z1}, Ψ_{Z2} – потокосцепления роторов и обмоток, создающих упругую связь со статором; i_X – ток обмотки управления.

$$i_{P1} \cdot M_{X1} = I_{P10} \cdot w_{OY} \cdot w_{P1} \cdot G_{XP1} = \Psi_{X1}; \quad i_{P2} \cdot M_{X2} = I_{P20} \cdot w_{OY} \cdot w_{P2} \cdot G_{XP2} = \Psi_{X2};$$

$$i_{P1} \cdot M_P = I_{P10} \cdot w_{P2} \cdot w_{P1} \cdot G_{P1P2} = \Psi_{P1}; \quad i_{P2} \cdot M_{P2} = I_{P20} \cdot w_{P1} \cdot w_{P2} \cdot G_{P1P2} = \Psi_{P2};$$

$$i_{P1} \cdot M_{Z1} = I_{P10} \cdot w_{P1} \cdot w_{OП1} \cdot G_{ZP1} = \Psi_{Z1}; \quad i_{P2} \cdot M_{Z2} = I_{P20} \cdot w_{OП2} \cdot w_{P2} \cdot G_{ZP2} = \Psi_{Z2},$$

где $G_{XP1}, G_{XP2}, G_{P1P2}, G_{ZP1}, G_{ZP2}$ – взаимные проводимости магнитов ротора и обмоток; $w_{OY}, w_{P1}, w_{P2}, w_{OП1}, w_{OП2}$ – число витков обмоток, в частности $w_{P1}=w_{P2}=1$; I_{P10}, I_{P20} – поверхностные токи магнитов роторов при обесточенной обмотке управления.

Рассмотрим некоторые схемы построения приводов возвратно-вращательного движения. В одном из вариантов в конструкцию устройства вводится компенсирующий ротор, установленный подвижно в опорах корпуса и смещенный относительно первого вдоль его продольной оси (рис. 1). Взаимная ориентация магнитов 1 и 2, оси намагничивания которых должны быть расположены противоположно, обеспечивается за счет взаимодействия с магнитами статора противоположной полярности 3, 4 соответственно, расположенными против полюсов магнитов роторов.

При этом используется только одна обмотка управления 5, состоящая из двух зеркально отраженных и диаметрально расположенных катушек (вторая катушка не показана). Общая длина такой обмотки соответствует длине двух магнитов, технологическому промежутку между ними и суммарной длине спинок лобовых частей. Магниты 1 и 2 располагают относительно обмотки 5 симметрично по длине, чтобы обеспечить равную степень взаимодействия каждого из них с активной частью обмотки. Тогда при протекании по обмотке тока знаки вращающих моментов, действующих на роторы, автоматически становятся противоположными. Недостатком такой схемы построения является то, что в случае неравенства параметров магнитов роторов невозможно автоматически получить полную компенсацию моментов реакции ввиду отсутствия органов их регулирования. Некоторое снижение величины нескомпенсированного момента может быть достигнуто путем смещения ротора с лучшими магнитными параметрами в ту область обмотки, где потокосцепление снижено, т.е. к ее краю. Однако для возможности осуществления такой технологической операции требуется некоторое усложнение конструкции.

Достигнуть более полной компенсации реактивных моментов позволяет схема построения устройства, в которой регулирование развиваемого момента ведется независимо для каждого намагниченного ротора. Электромагнитная структура такой магнитоэлектрической машины (рис. 2) содержит кроме двух роторов 1 и 2, ориентированных по направлению

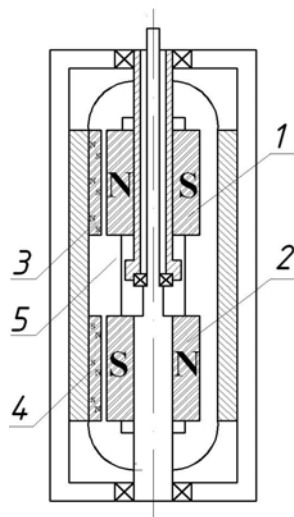


Рис. 1

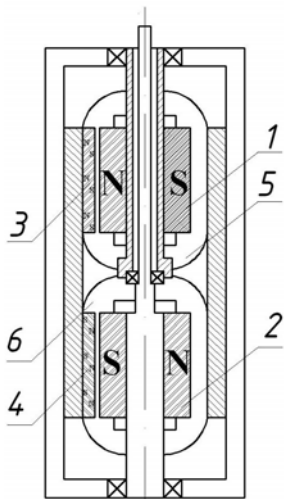


Рис. 2

магнитных полей противоположно, и магнитов статора 3, 4, уже две обмотки управления 5 и 6, каждая из которых может взаимодействовать только со «своим» ротором.

Теперь регулирование развиваемых моментов может осуществляться как посредством продольных перемещений магнитов 1 и 2, так и путем регулирования величины токов управления в обмотках 5 и 6. При этом возможна как активная регулировка токов с помощью регулируемых источников питания, так и пассивная, путем введения в электрические цепи обмоток переменных балластных резисторов.

Поскольку компенсирующий ротор имеет такие же параметры, как и основной, он также может выполнять полезную работу наравне с основным. В частности, в медицинских и косметологических приборах для проведения процедур биомеханической стимуляции и дерматонии насадки устанавливаются на оба вала (рис. 3). Располагаясь концентрично и двигаясь во встречных направлениях, в сочетании со специальной формой поверхности они производят более эффективное воздействие на тело пациента.

В случае применения такого устройства для шлифовки и полировки литевых форм повышаются производительность и качество работы.

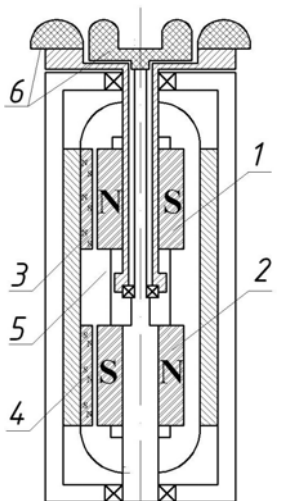


Рис. 3

Другой класс ручных инструментов с электроприводом, в которых целесообразно компенсировать негативное влияние реакции, – высокооборотные шлифовальные машины, дисковые пилы, фуганки и прочие подобные устройства. К этому же классу можно отнести и некоторые хирургические инструменты, в частности высокооборотные дерматомы с вращающимся дисковым ножом, которые применяются для снятия кожи с тела человека при ее пересадках. Обладая ощутимым кинетическим моментом, ротор такого высокооборотного устройства представляет собой объект повышенной опасности, поскольку при угловых девиациях прибора во время работы с ним при вращающемся инструменте возникает гироскопический момент, вектор которого не совпадает с вектором угловой скорости поворота прибора.

Гироскопический момент представляет собой момент сил Кориолиса, который развивает вращающийся ротор при изменении пространственного положения вектора своего кинетического момента. Учитывая, что угловая скорость собственного вращения ротора двигателя Ω намного больше угловой скорости разворота корпуса ω_B и момент количества движения всей подвижной системы K определяется в основном кинетическим моментом тяжелого быстровращающегося ротора H , для количественного определения K могут быть применены положения элементарной теории гироскопов, в соответствии с которой $K \approx H = J \cdot \Omega$, где J – полярный момент инерции ротора.

В этом случае величина возникающего гироскопического момента определяется кинетическим моментом ротора H и возмущающей угловой скоростью поворота корпуса с ротором ω_B : $M_G = H \cdot \omega_B$.

Вектор гироскопического момента ориентирован ортогонально плоскости, в которой расположены векторы \vec{H} и $\vec{\omega}_B$, и направлен так, чтобы совместить вектор кинетического момента с вектором возмущающей угловой скорости (рис. 4 а). Гироскопический момент действует на подшипниковые опоры ротора и через них передается корпусу. В результате резкого движения корпус, удерживаемый в руках, совершает неожиданное для работающего с ним движение, иногда столь энергичное, что бывает проблематично удержать его в руках. При этом вращающийся инструмент может нанести тяжелые травмы и даже увечья. В случае работы с дерматомом серьезные травмы маловероятны, однако несанкционированное движение ножа дерматома может привести к порезу кожи, ее порче и снижению качества среза.

Вектор гироскопического момента ориентирован ортогонально плоскости, в которой расположены векторы \vec{H} и $\vec{\omega}_B$, и направлен так, чтобы совместить вектор кинетического момента с вектором возмущающей угловой скорости (рис. 4 а). Гироскопический момент действует на подшипниковые опоры ротора и через них передается корпусу. В результате резкого движения корпус, удерживаемый в руках, совершает неожиданное для работающего с ним движение, иногда столь энергичное, что бывает проблематично удержать его в руках. При этом вращающийся инструмент может нанести тяжелые травмы и даже увечья. В случае работы с дерматомом серьезные травмы маловероятны, однако несанкционированное движение ножа дерматома может привести к порезу кожи, ее порче и снижению качества среза.

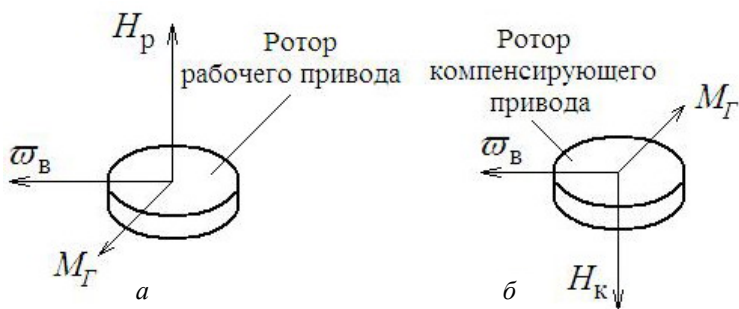


Рис. 4

Компенсация действия гироскопического момента возможна путем создания такого же по величине, но обратного по знаку момента с помощью второго компенсирующего ротора, направление вращения которого противоположно направлению вращения рабочего (рис. 4 б). В результате моменты количества движения двух роторов окажутся взаимно

скомпенсированными, а суммарное действие гироскопических моментов на корпус инструмента – нулевым.

При установке компенсирующего ротора в корпус инструмента необходимо учесть, что его ось вращения должна либо совпадать, либо быть параллельной оси вращения основного ротора. В противном случае векторы возникающих гироскопических моментов не будут пространственно противоположными и компенсация либо не произойдет в полной мере, либо не произойдет вообще. По той же причине желательно, чтобы оси вращения обоих роторов либо проходили через вероятный центр поворота корпуса, либо располагались примерно на равных расстояниях от него.

Компенсирующий ротор не обязательно должен обладать такими же параметрами, как и основной. Поскольку кинетический момент ротора определяется частотой вращения и полярным моментом инерции, то становится возможным, подняв частоту компенсирующего ротора, минимизировать его габариты, т.е. снизить момент инерции. Кроме того, мощность привода компенсирующего ротора должна быть достаточной лишь для преодоления сил сопротивления собственному вращению, т.е. намного меньшей, чем мощность основного. Поэтому общий КПД всей электромеханической системы снизится незначительно относительно КПД основного силового привода. В частных случаях возможно построение приводного устройства и с двумя равноценными роторами, каждый из которых будет выполнять некоторую полезную работу. По такой схеме может быть построена, например, ручная шлифовальная или полировальная машина с двумя рабочими головками.

Выбор режима работы компенсирующего ротора и его параметров с точки зрения оптимизации энергопотребления и габаритов, а также допустимой величины несовпадения $H_p \cdot \omega_B$ и $-H_k \cdot \omega_B$ является предметом проводящихся в настоящее время исследований и анализа.

В заключение заметим, что привод компенсирующего ротора должен быть регулируемым, поскольку при изменении нагрузки на основной ротор и частоты его вращения потребуется соответствующая подстройка частоты вращения компенсирующего ротора. Достаточная точность регулирования и быстроедействие компенсирующего привода также требуют отдельного исследования.

1. Антонов А.Е., Петухов И.С., Филоменко А.А. Магнитоэлектрический двигатель возвратно-вращательного движения с упругой связью ротора // Техн. электродинамика. – 2013. – № 1. – С. 49–55.
2. Филоменко А.А. Двухроторная магнитоэлектрическая система возвратно-вращательного движения и ее математическая модель // Техн. электродинамика. – 2014. – № 4. – С. 114–116.

УДК 621.313.8

О.Є. Антонов, докт. техн. наук, А.А. Філоменко, пров. інж.

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

Активна компенсація реактивних моментів в електричних машинах магнітоелектричного типу

Розглянуто принципи побудови електромеханічних перетворювачів енергії магнітоелектричного типу, в яких реактивну дію зусиль і моментів, що виникають в активній зоні перетворення, скомпенсовано електромагнітними силами і моментами зворотного знаку. Розглянуто також підходи до компенсації гіроскопічного моменту в високооборотних приводних пристроях з великим кінетичним моментом обертової частини. Бібл. 2, рис. 4.

Ключові слова: реактивний момент, безконтактний магнітоелектричний двигун, магнітна пружина, гіроскопічний момент.

О.Е. Antonov, А.А. Filomenko

Institute of elektrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraina.

Active compensation of reactive moments in electric motors of magnetoelectric type

Principles of construction of electromechanical energy converters magnetoelectric type in which the reactive action efforts and moments, generated in the active zone conversion, offset by electromagnetic forces and moments of opposite sign. We also consider approaches to compensate for the gyroscopic moment in high-speed driving device with a large kinetic momentum of the rotating part. References 2, figures 4.

Key words: reactive moment, brushless magnetoelectrical motor, magnetic spring, gyroscopic moment.

Надійшла 23.10.2014

Received 23.10.2014