

УДК 621.313.8

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ РУЧНОГО ИНСТРУМЕНТА С ВЫСОКООБОРОТНЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

А.Е. Антонов, докт. техн. наук

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

E-mail: aoe@ied.org.ua

Рассмотрены особенности работы ручного электроинструмента, снабженного высокооборотным электроприводом. Построена математическая модель состояния такого устройства с учетом нежесткой связи корпуса прибора с руками оператора. Особенность работы устройства состоит в возникновении гироскопического момента для оператора. При исследовании использованы элементы теории гироскопических систем. Получены количественные показатели, характеризующие движение корпуса с учетом гироскопической реакции. Приведены данные об экспериментальном исследовании времени затухания нутационных колебаний устройства. Библ. 4, рис. 3.

Ключевые слова: магнитоэлектрический двигатель, высокооборотный электропривод, гироскопический момент.

Введение. Повышение производительности ручного режущего электроинструмента непосредственно связано с увеличением полезной мощности приводного двигателя, которое достигается за счет увеличения момента вращения и оборотов ротора. В результате растет линейная скорость режущей кромки инструмента, что и обуславливает рост его производительности. Особенно эффективно применение в подобных малогабаритных устройствах стабилизированного по скорости электропривода, построенного на основе двигателей магнитоэлектрического типа. Высокая эффективность современных магнитоэлектрических двигателей обусловлена отсутствием затрат энергии на возбуждение ротора и применением для возбуждения магнитного потока высококоэрцитивных интерметаллических композиций редкоземельных металлов [4]. Дополнительные преимущества таким двигателям дает беспазовая компоновка статора в сочетании с расположением всех элементов магнитной системы только на роторе, благодаря чему исключаются потери на вихревые токи и гистерезис в стали, что особенно актуально при высокой частоте вращения ротора [1]. По такой схеме построен электропривод мощностью 2 кВт, разработанный в ИЭД НАН Украины специально для высокооборотного электроинструмента.

Однако перенос всех элементов магнитной системы двигателя на вращающуюся часть приводит к увеличению момента инерции ротора и появлению ощутимой гироскопической реакции на изменение углового положения ротора двигателя. Реакция проявляется в виде возникающего гироскопического момента и пространственных колебаний ротора, которые передаются на корпус инструмента, а затем на руки работающего с ним оператора.

Величина гироскопического момента определяется кинетическим моментом ротора и угловой скоростью его поворота. Чем резче поворот корпуса с массивным высокооборотным ротором, тем больше гироскопический момент. В результате действия гироскопического момента режущий инструмент движется по неожиданной для работающего с ним оператора траектории, что и становится иногда причиной тяжелого травматизма работника. Негативные последствия могут проявляться и при пересадке кожи во время ее снятия высокооборотным вращающимся ножом дерматомом, когда либо травмируется пациент, либо приходит в негодность снятый участок кожи. Поэтому исследование поведения ручного режущего инструмента, снабженного высокооборотным магнитоэлектрическим приводом, и разработка рекомендаций по снижению негативных последствий из-за действия гироскопического момента представляется актуальной. Подобные исследования проводятся впервые, что подтверждается отсутствием публикаций по этой проблеме.

Цель работы состоит в определении характера и количественных характеристик движения электроинструмента при изменении его пространственного положения с учетом действия гироскопического момента при значительной величине кинетического момента ротора приводного двигателя.

Содержание и результаты исследований. Для качественной оценки характера движения инструмента составим и исследуем математическую модель такого устройства. С точки зрения механики устройство представляет собой быстровращающийся массивный ротор, установленный в опорах

корпуса, обладающего тремя степенями свободы по вращению относительно инерциального пространства. Пространственный разворот корпуса при этом обеспечивается оператором, который удерживает его в руках во время работы.

Интерес для исследования представляют движения только вокруг осей, нормальных оси собственного вращения ротора, так как поворот корпуса вокруг оси, совпадающей с осью вращения, никакой негативной реакции не вызывает.

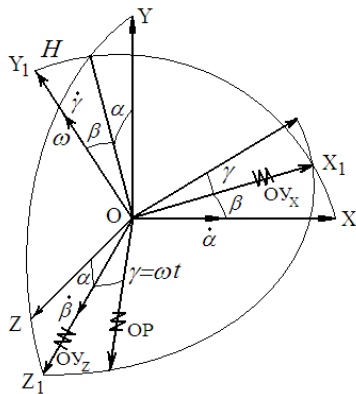


Рис.1

Расположим корпус с ротором в подвижной прямоугольной системе координат $OX_1Y_1Z_1$, развернутой относительно неподвижной системы координат $OXYZ$ на углы α и β таким образом, чтобы ось собственного вращения ротора была направлена вдоль оси OY_1 (рис.1). В качестве привода ротора используем две неподвижные относительно ротора обмотки управления OY_x, OY_z , которые также расположим в подвижной системе координат так, чтобы их электрические оси совпадали соответственно с осями OX_1 и OZ_1 .

Ротор возбуждим обмоткой OP , по которой протекает постоянный по величине и направлению ток. При принятом взаимном расположении координатных осей собственное вращение ротора будет происходить в плоскости OZ_1X_1 вокруг оси OY_1 с постоянной угловой скоростью ω . Пусть в некоторый момент времени мгновенное положение результирующего вектора индукции ротора B_{cp} определяется углом $\gamma = \omega t$, отсчитываемым от оси OZ_1 .

Принимая во внимание возможность пространственного разворота корпуса, при составлении энергетической функции рассматриваемого устройства необходимо учесть энергию, запасенную не только в роторе, но и в массивном корпусе, величина моментов инерции которого относительно координатных осей может в несколько десятков раз превышать осевые моменты инерции самого ротора. Этим подход к построению модели устройств рассматриваемого класса отличается от порядка построения модели электрической машины с трехступенным ротором [3], в которой не принималось во внимание запасание кинетической энергии в миниатюрных элементах двухосного подвеса ротора ввиду ее малости.

В качестве независимых обобщенных механических координат рассматриваемой системы выберем три угла поворота: γ – угол поворота ротора вокруг оси собственного вращения и α, β – углы поворота корпуса совместно с ротором вокруг поперечных осей. При этом поворот корпуса вокруг оси OY_1 не рассматриваем как не представляющий интереса для данной задачи. Соответственно, механическими обобщенными скоростями системы будет угловая скорость вращения ротора $\dot{\gamma}$, а также угловые скорости поворота вокруг поперечных осей $\dot{\alpha}, \dot{\beta}$, общие для ротора и корпуса. Обобщенными электрическими скоростями будут токи в обмотках управления i_x, i_z и ток возбуждения ротора i_p . Тогда с учетом проекций угловых скоростей поворотов элементов системы на оси связанной системы координат выражения для запасаемой механической кинетической энергии ротора T_p и корпуса T_k запишутся в виде $T_p = 0,5 \left[J_p^y (\dot{\gamma} - \dot{\alpha}^2 \sin^2 \beta)^2 + J_p^x \dot{\alpha}^2 \cos^2 \beta + J_p^z \dot{\beta}^2 \right]$; $T_k = 0,5 J_k^x \dot{\alpha}^2 \cos^2 \beta + J_k^z \dot{\beta}^2$, где J_p^x, J_p^y, J_p^z – моменты инерции ротора относительно осей OX_1, OY_1, OZ_1 ; $J_p^y = J_p^{\parallel}$ – полярный момент инерции ротора; $J_p^x = J_p^z = J_p^{\ominus}$ – экваториальные моменты инерции ротора, которые в силу его осевой симметрии равны между собой; J_k^x, J_k^z – моменты инерции корпуса и расположенной в нем статорной системы двигателя со всеми необходимыми крепежными элементами, относительно осей OX_1 и OZ_1 ; $\dot{\alpha}, \dot{\beta}$ – угловые скорости поворота ротора и корпуса вокруг поперечных осей.

В выражении для кинетической энергии корпуса T_k не отражено запасание энергии при его движении вокруг оси OY_1 , поскольку само это движение из рассмотрения исключено.

Электрическая энергия в нашем случае накапливается только в индуктивных элементах привода, т.е. в обмотках двигателя

$$W_{\ominus} = 0,5 (L_x i_x^2 + L_z i_z^2 + L_p i_p^2) + 2i_x i_p M_x \sin \gamma + 2i_z i_p M_z \cos \gamma,$$

где L_i – собственные индуктивности обмоток управления и обмотки возбуждения ротора; M_i – амплитудные значения взаимных индуктивностей обмоток управления с обмоткой возбуждения ротора.

В результате энергетическая функция рассматриваемой системы с учетом принятых ограничений и обозначений примет вид

$$L = T_p + T_k + W_3 = 0,5J_p^{\prime\prime}(\dot{\gamma} - \dot{\alpha} \sin \beta)^2 + 0,5J_p^3 \dot{\alpha}^2 \cos^2 \beta + 0,5J_p^3 \dot{\beta}^2 + 0,5J_k^x \dot{\alpha}^2 \cos^2 \beta + J_k^z \dot{\beta}^2 + 0,5(L_x i_x^2 + L_z i_z^2 + L_p i_p^2) + 2i_x i_p M_x \sin \gamma + 2i_z i_p M_z \cos \gamma.$$

Рассеяние энергии в электрической части системы происходит на активных сопротивлениях обмоток. В механической части рассеяние происходит за счет вязкого трения в подшипниках и аэродинамического трения при вращении ротора. Демпфирование движения корпуса, вызванного действием гироскопического момента, осуществляется только за счет мускульной силы рук оператора. Противодействуя такому движению, оператор инстинктивно прикладывает равный по величине момент обратного знака, пытаясь тем самым погасить угловую скорость прецессионного движения прибора. Поскольку угловая скорость поворота корпуса под действием гироскопического момента пропорциональна угловой скорости внешнего воздействия, то и момент силы противодействия тоже должен быть пропорционален этой же угловой скорости, т.е. соответствовать характеру демпфирующего действия вязкого трения. Тогда

$$F = F_M + F_3 = 0,5(\omega_y^2 v_y + \dot{\alpha}^2 v_x + \dot{\beta}^2 v_z + i_x^2 R_x + i_z^2 R_z + i_p^2 R_p),$$

где v_x, v_y, v_z – коэффициенты вязкого трения.

После дифференцирования функций L и F по обобщенным координатам, скоростям и времени, подстановки результатов в уравнения Эйлера-Лагранжа второго рода и исключения членов при $\dot{\alpha}^2$ и $\dot{\alpha}, \dot{\beta}$ ввиду их малости получаем уравнения динамического состояния рассматриваемой системы в виде

$$-H \dot{\beta} \cos \beta + (J_p^3 + J_k^x) \ddot{\alpha} \cos^2 \beta + v_x \dot{\alpha} = m_x; \quad (1)$$

$$H \dot{\alpha} \cos \beta + (J_p^3 + J_k^z) \ddot{\beta} + v_z \dot{\beta} = m_z; \quad (2)$$

$$i_x i_p M_x \cos \gamma - i_z i_p M_y \sin \gamma + v_y \dot{\gamma} = m_y; \quad (3)$$

$$L_x di_x / dt + i_p \dot{\gamma} M_x \cos \gamma + i_x R_x = U_x; \quad (4)$$

$$L_z di_z / dt - i_p \dot{\gamma} M_z \sin \gamma + i_z R_z = U_z, \quad (5)$$

где $H = J_p^{\prime\prime} \cdot \omega$ – кинетический момент ротора при постоянной угловой скорости вращения $\dot{\gamma} = \omega$, $\ddot{\alpha}, \ddot{\beta}$ – угловые ускорения.

Уравнения (4), (5) описывают динамическое состояние электрической части системы. Уравнение (3) – процесс создания момента вращения в двигателе. В правой части (3) записан суммарный момент внешних сил, действующих вокруг оси вращения ротора m_Y . Этот момент вызван действием сил сухого трения подшипниковых опор и внешней нагрузкой и направлен в сторону уменьшения угла γ .

При гармонических законах изменения токов в обмотках управления OY_x и OY_z ($i_x = i_x^0 \cos \omega t$; $i_z = -i_z^0 \sin \omega t$) и установившейся скорости вращения ротора ω , мгновенное значение электромагнитного момента, создаваемого двигателем в момент времени t , составит

$$m_{де} = i_p i_x^0 M_x \cos^2 \omega t + i_p i_z^0 M_z \sin^2 \omega t. \quad (6)$$

Среднее значение момента вращения за полный оборот ротора получаем, разложив (6) в ряд Фурье на интервале 2π : $\bar{m}_{де} = 0,5(i_p i_x^0 M_x + i_p i_z^0 M_z)$. Этот момент идет на преодоление сил сопротивления и внешнего момента нагрузки, который возникает при контакте режущей кромки инструмента с обрабатываемым материалом $0,5(M_x i_p i_x^0 + M_z i_p i_z^0) = v_y \omega + m_y$.

При замене обмотки возбуждения ротора постоянным магнитом выражение для среднего значения момента примет вид [1] $\bar{m}_{де} = 0,5(\Psi_x i_x^0 + \Psi_z i_z^0)$, где Ψ_x, Ψ_z – амплитудные значения потоко-сцеплений обмоток OY_x и OY_z с магнитом ротора.

В механической части рассматриваемой системы происходит следующее. Уравнения (1) и (2) по сути представляют собой «технические» уравнения гироскопа, которые являются приближенными в

силу допущений, принятых для величин второго порядка малости. Отличие (1) и (2) от классических «технических» уравнений гироскопа состоит в учете моментов инерции корпуса прибора и явления демпфирования движения корпуса силами вязкого трения при двухкоординатном пространственном повороте. Из уравнений следует, что при попытке изменения пространственного положения корпуса направление вектора угловой скорости движения корпуса ($\dot{\alpha}$ или $\dot{\beta}$) не совпадает с направлением вектора внешнего момента. В силу гироскопических свойств массивный ротор привода прецессирует в сторону уменьшения угла рассогласования между вектором кинетического момента ротора H и вектором приложенного внешнего момента m_x или m_z . Одновременно возникает реакция на внешнее возмущение в виде гироскопического момента, который создают силы инерции, связанные с ускорением Кориолиса. Векторы возмущающего и гироскопического моментов направлены противоположно, в результате чего поворот ротора вокруг оси, совпадающей с вектором внешнего момента, невозможен, что и ощущается оператором как сопротивление повороту инструмента вокруг какой-либо оси, перпендикулярной оси вращения ротора. Траектория прецессионного движения инструмента является неожиданной для работающего с ним специалиста, что и является иногда причиной травматизма.

Величина гироскопического момента, который разворачивает корпус прибора, и угловая скорость такого разворота по любой из угловых координат может быть подсчитана из так называемых «усеченных» уравнений гироскопа, в которых не учитываются угловые ускорения $\ddot{\alpha}, \ddot{\beta}$, угловые рассогласования α, β и момент вязкого трения ($v_x = v_z = 0$). С учетом такого допущения усеченные уравнения гироскопа примут вид

$$H \dot{\beta} = m_x; \quad H \dot{\alpha} = m_z. \quad (7)$$

Поскольку возникающий гироскопический момент по величине равен моменту возмущения, то (7), по сути, есть выражение для определения величины гироскопического момента при известных параметрах ротора двигателя и принятой скорости поворота прибора $M_r^x = m_x = H \dot{\alpha}$ и $M_r^z = m_z = H \dot{\beta}$.

Из (7) определяются также и угловые скорости прецессионного поворота при известных параметрах двигателя и прикладываемого внешнего момента.

Подсчитаем величину угловой скорости прецессии ротора при попытке повернуть корпус инструмента, снабженного приводным двигателем, кинетический момент ротора которого, вращающегося с частотой 2407 1/с (23000 об/мин), составляет 1,814 кг·м²/с. Руки оператора при работе с режущим или шлифовальным инструментом расположены так, как показано на рис. 2. Вектор кинетического момента двигателя H направлен вдоль продольной оси корпуса. Если оператор при вращающемся на холостом ходу роторе попытается рывком повернуть машину против часовой стрелки вокруг оси, нормальной плоскости рисунка и проходящей через центр масс (точка **Цм**), приложив при этом момент величиной, например, 10 н·м, то ротор начнет прецессировать вокруг оси O_1-O_1 с угловой скоростью 5,5 1/с (315 град/с), стремясь вырвать продольную рукоятку машины из правой руки оператора, двигая ее вниз. При этом сила, прикладываемая к точке **Цс**, соответствующей примерно середине кисти правой руки оператора (рис. 2), равна 40 Н, и она суммируется с силой веса всего устройства, приходящейся на эту руку.

Реакция ротора на внешнее воздействие проявляется безинерционно, т.е. мгновенно, и если внешний момент был приложен рывком, то и гироскопический момент, и угловая скорость прецессии также возникают рывком. И если не быть готовым к такой девиации прибора, то при некоторой величине момента инерции ротора корпус с вращающимся инструментом можно просто выронить из рук.

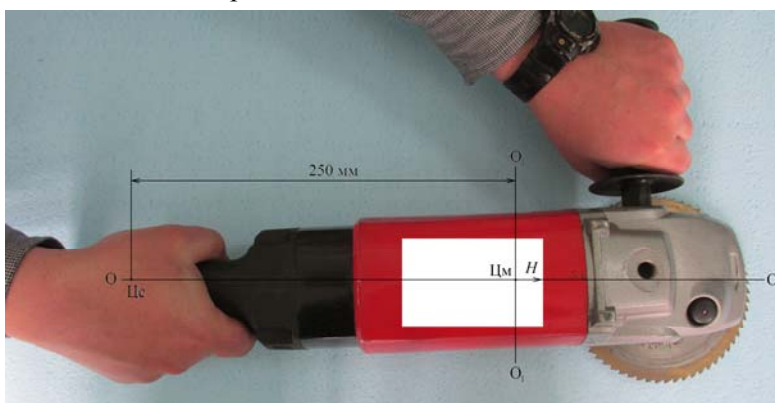


Рис. 2

Прецессионное движение ротора приводного двигателя не единственная особенность, присущая работе с высокооборотным электроинструментом. Пытаясь остановить прецессионное движение, оператор инстинктивно прикладывает противодействующий момент и, тем самым, изменяет направление прецессии ротора,

который в силу гироскопических свойств начинает двигаться в ортогональной плоскости. В результате корпус инструмента колеблется вокруг поперечных осей с затухающей амплитудой и, в конце концов, успокаивается, если величина гироскопического момента не превысит мускульные возможности кисти оператора. Явление возникновения колебаний ротора при приложении управляющего момента известно в теории гироскопических систем, где в результате приложения внешнего момента возникают нутационные колебания, которые накладываются на прецессионное движение и затухают благодаря трению в опорах карданового подвеса ротора. В нашем случае рассеяние энергии инерционного движения ротора происходит благодаря мускульной силе рук оператора, но суть явления остается той же.

В соответствии с общей теорией гироскопических систем [2] и с учетом принятых нами обозначений частота f и амплитуда λ затухающих нутационных колебаний определяются так:

$$f = H \left[(J_P^\partial + J_K^X)(J_P^\partial + J_K^Z) \right]^{-1/2}; \quad \lambda = mH^{-1} e^{-Gt/(J_P^\partial + J_K^\partial)} \left[f^2 + G^2 / (J_P^\partial + J_K^X)(J_P^\partial + J_K^Z) \right]^{-1/2},$$

где G – коэффициент демпфирования или удельный момент вязкого трения, m – прикладываемый момент вращения.

Суммарные экваториальные моменты инерции корпуса устройства, показанного на рис. 2, совместно со статорной системой двигателя, редуктором и крепежом отличаются между собой незначительно, и если принять их одинаковыми ($J_K^X = J_K^Z = J_K^\partial$), то выражения для расчета частоты и амплитуды колебаний можно упростить

$$f = H / J_\Sigma^\partial = \omega J_P^H / J_\Sigma^\partial; \quad (8)$$

$$\lambda = m / He^{-Gt/(J_\Sigma^\partial)} \left[f^2 + (G/J_\Sigma^\partial)^2 \right]^{-1/2}, \quad J_\Sigma^\partial = J_P^\partial + J_K^\partial. \quad (9)$$

Из (8) следует, что при заданной геометрии ротора, чем ниже частота вращения инструмента и чем массивней корпус устройства, тем ниже частота нутационных колебаний. В частности, частота колебаний рассматриваемого устройства оказалась равной 82,56 1/с (13,15 Гц) при суммарной величине экваториального момента инерции относительно оси O_1-O_1 , проходящей через центр масс, 0,022 кг·м².

Амплитуда этих колебаний пропорциональна приложенному внешнему моменту и затухает тем эффективней, чем выше коэффициент демпфирования G . При величине внешнего момента 10 н·м и при отсутствии демпфирования начальная амплитуда колебаний в момент времени $t = 0$ в соответствии с (9) составит 0,067 рад или 3,83 градуса. Если бы демпфирование отсутствовало, то эти колебания происходили бы бесконечно долго. Но поскольку устройство находится в руках и имеет место постоянно действующее сопротивление прецессионному движению, то колебания затухают, циклически меняя плоскость, в которой они происходят. В результате при одинаковых экваториальных моментах инерции $J_K^X = J_K^Z$ продольная ось $O-O$ будет описывать коническую поверхность с начальным углом при вершине 7,66 градуса, который постепенно снижается до нуля.

Чтобы рассчитать время затухания колебаний необходимо задать коэффициент демпфирования G , определение которого в рассматриваемом случае представляется нам наиболее сложной задачей ввиду отсутствия справочных данных и методических рекомендаций для его расчета. Эту величину мы устанавливали опытным путем, прикладывая фиксированный внешний момент и измеряя время,

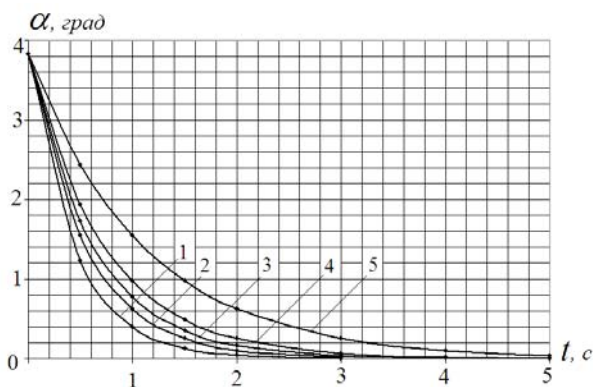


Рис.3

за которое корпус, удерживаемый в руках, прекратит колебательные движения. Оказалось, что в зависимости от физических данных человека и прилагаемых им демпфирующих усилий, интервал времени от начала действия внешнего момента до субъективного невосприятия колебаний корпуса изменяется в пределах нескольких секунд. Принимая за исходный параметр измеренное время гашения колебаний, расчетным путем с помощью (9) были получены величины коэффициентов демпфирования нутационных колебаний корпуса при фиксированной величине внешнего момента 10 н·м. Оказалось, что реализуемый силой

рук взрослого человека коэффициент вязкого трения лежит в диапазоне 0,02...0,05 кг·м²/с. Характер затухания колебаний рассматриваемого электромеханического устройства при различных значениях G показан на рис. 3: кривая 1 – $G=0,05$; 2 – $G=0,04$; 3 – $G=0,035$; 4 – $G=0,03$; 5 – $G=0,02$.

Заметим, что для конкретного устройства время затухания колебаний до некоторого, не воспринимаемого руками минимума, зависит и от величины прикладываемого внешнего момента (9). Время же, за которое амплитуда уменьшится в одинаковое число раз, от исходного значения останется постоянным независимо от величины прикладываемого момента.

Выводы. При эксплуатации ручных электроинструментов с высокооборотным электроприводом в режиме изменения его пространственного положения возникает гироскопический момент, обуславливающий неожиданную для работающего с инструментом специалиста траекторию движения. Возникающее при этом прецессионное движение сопровождается затухающими пространственными колебаниями устройства, величина которых зависит от параметров приводного электродвигателя и физических возможностей работающего с инструментом человека.

Для обеспечения безопасности и комфортности работы с электроинструментом, содержащим массивный быстровращающийся ротор, необходимо компенсировать гироскопическую реакцию привода путем установки в том же корпусе носителя кинетического момента, равного по величине и противоположного по направлению кинетическому моменту ротора основного привода. Параметры компенсирующего электропривода рассчитываются из условия создания кинетического момента заданной величины, а его мощность должна быть достаточной лишь для преодоления сил механического и аэродинамического трения ротора, то есть меньше мощности основного привода примерно на два порядка.

1. Антонов А.Е. Электрические машины магнитоэлектрического типа. – К.: НАН Украины, Институт электродинамики, 2011. – 216 с.
2. Климов Д.М., Харламов С.Л. Динамика гироскопа в кардановом подвесе. – М.: Наука, 1978. – 208 с.
3. Милих А.Н., Барабанов В.А., Двойных Е.В. Трехступенные электрические машины. – Киев: Наук. думка, 1979. – 312 с.
4. Robert C. O'Handley. Modern Magnetic Materials: Principles and Applications. – New York: John Wiley & Sons, 2000. – 768 p.

МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ РУЧНОГО ІНСТРУМЕНТА З ВИСОКООБЕРТОВИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ

О.С.Антонов, докт.техн.наук

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

E-mail: aoc@ied.org.ua

Розглянуто особливості роботи ручного електроінструмента, забезпеченого високооборотним електроприводом. Побудовано математичну модель стану такого пристрою з урахуванням нежорсткого зв'язку корпусу приладу з руками оператора. Особливість роботи пристрою полягає у виникненні гіроскопічного моменту і нутаційних коливань при просторовому розвороті корпусу, що може бути несподіваним і небезпечним для оператора. При дослідженні використано елементи теорії гіроскопічних систем. Отримано кількісні показники, що характеризують рух корпусу з урахуванням гіроскопічної реакції. Приведено дані про експериментальне дослідження часу загасання нутаційних коливань пристрою. Бібл. 4, рис. 3.

Ключові слова: магнітоелектричний двигун, високооборотний електропривод, гіроскопічний момент.

FEATURES OF HAND TOOLS WITH A HIGH-SPEED ELECTRIC DRIVE

A. Antonov

Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine

pr. Peremogy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine.

E-mail: aoc@ied.org.ua

The features of hand tools with a high-speed electric drive are considered. The mathematical model of the state of such device with non-rigid connection between the instrument casing and operator's hands is created. Feature operation of the device consists in the occurrence of gyroscopic moment and nutation oscillations at a spatial turn casing, that may be unexpected for the operator. For research the elements of theory of the gyroscopic systems are used. Quantitative indicator, that characterize motion of casing with the gyroscopic reaction, is received. Information about the experimental research of damping time nutation oscillations of the device are given. References 4, figures 3.

Keywords: magnetoelectrical engine, a high speed electric drive, the gyroscopic moment.

1. Antonov A.E. Electric machines of electromagnetic type. – Kyiv: Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine, 2011. – 216 p. (Rus)
2. Klimov D.M., Kharlamov S.L. Dynamics of gyroscope in a gimbal. – Moskva: Nauka, 1978. – 208 p. (Rus)
3. Miliakh A.N., Barabanov V.A., Dvoynikh E.V. Three-sedate electric machines. – Kyiv: Naukova Dumka, 1979. – 312 p. (Rus)
4. Robert C. O'Handley. Modern Magnetic Materials: Principles and Applications. – New York: John Wiley & Sons, 2000. – 768 p.

Надійшла 16.02.2015
Остаточний варіант 21.04.2015