

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

С.Г. Воронин, А.И. Согрин, К.В. Романов

В работе предложена методика выбора и расчета параметров электропривода, предполагающая совместный выбор двигателя и передаточного отношения редуктора, что гарантирует заданную динамику движения с учетом необходимости минимизации энергопотребления и массогабаритных показателей всей аппаратуры. Предложены соотношения для расчета основных участвующих в выборе параметров электропривода: динамической добротности, требуемой мощности и оптимального передаточного отношения редуктора. Параметры электропривода в предлагаемой методике представлены в виде функций заданных динамических показателей и определены простыми аналитическими соотношениями. Кроме того, приведены соотношения для расчета основных размеров двигателя, позволяющие приблизительно оценить его массогабаритные показатели, в случае если стандартную электрическую машину подобрать не удалось. Представлена динамическая модель электропривода для проверки и уточнения сделанного выбора.

Ключевые слова: исполнительный электропривод, быстродействие, оптимизация параметров, оптимальное передаточное отношение редуктора, исполнительный электродвигатель, математическое моделирование, динамическая модель электропривода.

SELECTION OF PARAMETERS OF THE QUICK-OPERATING ELECTRIC DRIVE

S.G. Voronin, A.I. Sogrin, K.V. Romanov

The paper proposes the method for the selecting and the calculating the electric drive parameters, which implies a joint choice of the engine and the gear ratio of the gearbox. It guarantees the specified driving dynamics, taking into account the need to minimize the energy consumption and the weight and size parameters of all equipment. The proposed expressions for calculating the main parameters of the electric drive are: the dynamic quality, the required power and the optimal gear ratio of the gearbox. The electric drive parameters in the proposed method are presented as functions of given dynamic indicators and they are determined by simple analytical relations. In addition, expressions are given for calculating the main dimensions of the engine, allowing an approximate estimate of its weight and dimensions, if it was not possible to select a standard electric machine. In conclusion, a dynamic model of the electric drive is presented for checking and refining the choice made.

Keywords: executive electric drive, speed of operation, optimization of parameters, optimal gear ratio of reducer, executive electric motor, mathematical modeling, dynamic model of electric drive.

Введение

Появление новых электромагнитных материалов и электронных компонентов, обеспечивающих повышение удельных массогабаритных и энергетических показателей электропривода, позволило существенно расширить область применения последнего. В частности, электропривод успешно используется в исполнительных органах систем управления летательными аппаратами, промышленных роботах и манипу-

ляторах. В перечисленных устройствах, кроме традиционных требований по моменту, мощности и диапазону скоростей, электропривод дополнительно должен обеспечивать заданные динамические свойства. Выбору и расчету компонентов исполнительного электропривода с заданным быстродействием посвящено множество работ, подробный обзор которых приведен в публикации [1]. Среди наиболее значимых исследований в данной области можно отме-

тить работу [2], где определено оптимальное передаточное отношение редуктора для чисто инерционной нагрузки. В работах [3–6] предлагаются методы совместного выбора параметров двигателя и редуктора, обеспечивающих оптимизацию динамических показателей привода. В работе [7] дополнительно освещена проблема обеспечения необходимой точности привода. Развитию указанных идей и их практическому применению посвящены работы [8–12]. В приведенных работах детально рассмотрено влияние различных факторов на свойства проектируемого электропривода, предложены методики выбора его параметров, обеспечивающие заданные свойства. Вместе с тем, для оценки параметров привода на начальном этапе проектирования зачастую предпочтительнее иметь простые аналитические соотношения для выбора электродвигателя и передаточного отношения редуктора. Кроме того, иногда для обеспечения заданных свойств привода приходится использовать нестандартный электродвигатель, и возникает необходимость предварительной оценки его массогабаритных показателей.

В настоящей статье предлагается методика комплексного выбора или приближенного определения параметров, необходимых для проектирования двигателя и преобразующего механизма (редуктора) исходя из условий обеспечения заданных динамических свойств привода с учетом необходимости минимизации энергопотребления и массогабаритных показателей всей аппаратуры.

Постановка задачи

Параметры электропривода в предлагаемой методике представлены в виде функций заданных динамических показателей и определены простыми аналитическими соотношениями.

Из всего разнообразия способов задания требуемых динамических свойств рассматривается случай, когда задан максимальный угол φ_0 , на который должен повернуться рабочий орган и минимальное время отработки этого угла t_0 . В таком виде требования формулируются для исполнительных органов систем управления летательными аппаратами, приводов роботов, манипуляторов и так далее. Следует добавить, что изложенная методика может быть использована и при других способах задания динамических свойств, если привести их к заданию максимального ускорения и максимальной скорости.

Рассмотрим электропривод как механическую систему. Одна часть параметров этой системы – момент инерции рабочего органа $J_{\text{н}}$, и момент сопротивления на валу рабочего органа (полезный момент) $M_{\text{нс}}$ – рассматриваются как независимые исходные данные.

Другая часть – требуемые габариты, мощность (P), скорость (ω) и момент инерции ротора двигателя ($J_{\text{д}}$), передаточное отношение редуктора (q) – выбираются или подлежат определению из условия обеспечения заданных динамических свойств привода. При этом на первом этапе во внимание принимается только возможность физической реализуемости механических переходных процессов без учета электромагнитной инерционности двигателя и предполагается, что первичный источник питания имеет неограниченную мощность.

Все исключенные из рассмотрения факторы могут быть учтены в последующем в процессе моделирования привода, спроектированного по результатам предварительного выбора параметров, проведенного по предлагаемой методике.

Выбор двигателя и передаточного отношения редуктора

Предположим, что как у двигателя, так и у рабочего органа механические характеристики абсолютно мягкие, т.е. $M(\omega) = M = \text{const}$ и $M_{\text{нс}}(\omega) = M_{\text{нс}} = \text{const}$. Тогда максимальное быстродействие при отработке угла привод может обеспечить только при реализации релейного старт-стопного управления в соответствии с временной диаграммой (рис. 1), согласно которой в течение времени t_1 двигатель развивает положительный момент $+M$ и разгоняется, а в течение времени $t_2 = t_0 - t_1$ – отрицательный момент $-M$ и тормозится. Причем длительность временных интервалов t_1 и t_2 выбирают

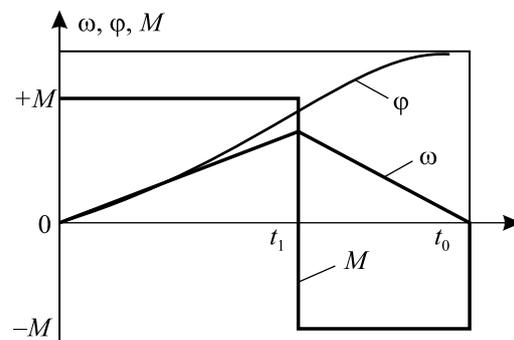


Рис. 1. Диаграмма движения привода при старт-стопном управлении

ся так, чтобы в момент времени $t = t_0$ скорость стала равной нулю, а угол поворота достиг значения $\varphi = \varphi_0$.

Для обоих временных интервалов справедливо уравнение движения, представленное выражением

$$J \frac{d\omega}{dt} = M - M_c, \quad (1)$$

$$J = J_d + \frac{J_n}{q^2}, \quad (2)$$

$$M_c = \frac{M_{nc}}{\eta \cdot q}, \quad (3)$$

где J – момент инерции; M_c – момент статической нагрузки, приведенный к валу двигателя; η – КПД редуктора.

Момент двигателя при прямом включении (разгоне) равен $+M$, при обратном включении (торможении) – $-M$. Тогда скорость двигателя при отработке задания на этапах разгона (ω_1) и торможения (ω_2) определяется выражениями:

$$\omega_1 = \varepsilon_1 t, \quad (4)$$

$$\omega_2 = \varepsilon_1 t + \varepsilon_2 t, \quad (5)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{M - M_c}{J}, \quad (6)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{-(M + M_c)}{J}, \quad (7)$$

где ε_1 и ε_2 – ускорения привода на этапах разгона и торможения соответственно.

Как отмечалось, к концу цикла должны выполняться условия:

$$\varphi(t_0) = \int_0^{t_0} \omega(t) dt = \frac{\varepsilon_1 t_1^2}{2} = \varphi_0 q, \quad (8)$$

$$\omega(t_0) = \varepsilon_1 t + \varepsilon_2 t = 0. \quad (9)$$

Решая систему уравнений (8) и (9) и раскрывая ε_1 и ε_2 согласно выражениям (6) и (7) соответственно, а также введя переменную $\mu = \frac{M_c}{M}$, получаем зависимости:

$$\varphi_0 = \frac{(M - M_{nc} \frac{\mu}{q\eta}) t_0^2}{4(J_d + \frac{J_c}{q^2}) q}, \quad (11)$$

$$t_1 = \frac{(1 + \mu) t_0}{2}, \quad (12)$$

$$t_2 = \frac{(1 - \mu) t_0}{2}. \quad (13)$$

Разрешим уравнение (11) относительно момента M :

$$M = \frac{4J_d q \varphi_0}{t_0^2} + \frac{4J_n \varphi_0}{t_0^2 q} + \frac{M_{nc} \mu}{q\eta}. \quad (14)$$

Полученное выражение момента примечательно тем, что дает наглядное представление о том, на что тратится механическая энергия двигателя. Первая составляющая в правой части показывает, какая часть момента обеспечивает разворот на заданный угол ротора самого двигателя, вторая составляющая – разворот на заданный угол рабочего органа, и третья – преодоление момента сопротивления рабочего органа. Выражение содержит значение момента M в обеих частях уравнения, так как μ является функцией M . Однако, на первом этапе выбора параметров, учитывая, что в динамических режимах всегда $\mu \ll 1$, можно задать его предварительным значением, например, $\mu = 0,1$, также, как и некоторым значением КПД редуктора, например, $\eta = 0,9$. В последующем предварительные значения относительного момента и КПД редуктора могут быть уточнены.

Тогда появляется возможность относительно просто найти значение передаточного отношения редуктора, при котором заданное значение угла будет отработано при минимальном моменте двигателя. Для этого достаточно определить экстремум функции $M(q)$, то есть взять производную от правой части уравнения (14) по q , приравнять ее к нулю и разрешить полученное уравнение относительно q . Кроме того, введем эквивалентное значение момента инерции нагрузки $J_{нэ}$, учитывающее влияние нагрузки на скорость протекания механических переходных процессов:

$$J_{нэ} = J_n + \frac{M_{nc} t_0^2}{4\varphi_0 \eta} \mu. \quad (15)$$

В результате преобразований получим:

$$q_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{J_{нэ}}{J_d}}. \quad (16)$$

Назовем параметр, характеризующий динамические свойства двигателя, динамической добротностью, определив его соотношением:

$$D = \frac{M}{\sqrt{J_d}}. \quad (17)$$

Физически добротность представляет собой удельную силу, обеспечивающую ускорение ротора. Подставим q из выражения (16) в соотношение (14), разрешим полученное выражение относительно M и разделим обе части полученного уравнения на $\sqrt{J_d}$. В результате получим выражение для определения добротности из условия отработки заданного угла за заданное время:

$$D = \frac{8\varphi_0}{t_0^2} \sqrt{J_{нз}}. \quad (18)$$

Выбрав двигатель по добротности, необходимо проверить, обеспечит ли он требуемую для отработки угла мощность, которую можно определить из соотношения:

$$P_{\max} = M\omega_{\max}, \quad (19)$$

где ω_{\max} – максимальное значение скорости, которую развивает двигатель в процессе отработки угла.

В соответствии с диаграммой движения привода при старт-стопном управлении получим:

$$\omega_{\max} = \frac{2\varphi_0 q_{\text{опт}}}{t_0}. \quad (20)$$

Принимая во внимание уравнения (16), (17) и (20), можно записать:

$$P_{\text{тр}} = \frac{16\varphi_0^2}{t_0^3} J_{нз}. \quad (21)$$

По требуемой добротности и мощности может быть выбран двигатель. Учитывая, что динамические режимы рассматриваемого вида, как правило, кратковременные, допустима перегрузка двигателя. Коэффициент перегрузки зависит от типа двигателя и общей циклограммы работы. Если двигатель выбран, то нам известен момент инерции его ротора. Следовательно, из выражения (16) можно определить оптимальное передаточное отношение редуктора, а по выражению (20) – максимальную скорость вращения его ротора. В том случае, если номинальная скорость выбранного двигателя окажется меньше рассчитанной по выражению (20), необходимо выбрать другой двигатель и повторить операцию его проверки по скорости вращения. Зная требуемое значение передаточного коэффициента редуктора, выходную скорость и передаваемый момент, следует выбрать редуктор с не-

которым стандартным значением $q = q_{\text{ст}}$ и КПД $\eta = \eta_{\text{ст}}$. При известном моменте двигателя и передаточном отношении редуктора можно уточнить μ . После этого можно повторить расчет $q_{\text{опт}}$ и $D_{\text{тр}}$, и, если расхождение с предварительными значениями этих параметров большое, уточнить расчет и повторить выбор двигателя и редуктора. На практике одного цикла итераций вполне достаточно.

При малых значениях μ можно пренебречь влиянием статического момента на динамику процессов. Тогда $P_{\text{тр}}$, $D_{\text{тр}}$ и $q_{\text{опт}}$ получим из выражений (16), (18) и (21), принимая в них $\mu = 0$:

$$P_{\text{тр}} = \frac{16J_n\varphi_0^2}{t_0^3}, \quad (22)$$

$$D_{\text{тр}} = \frac{8\varphi_0\sqrt{J_n}}{t_0^2}, \quad (23)$$

$$q_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{J_n}{J_d}}. \quad (24)$$

Необходимо отметить, что последние выражения удобны для приближенного решения задачи и могут быть использованы в предварительных расчетах.

В том случае, когда ни один из известных серийных двигателей по каким-то причинам не может быть использован, возникает задача проектирования двигателя, который бы гарантированно обеспечил заданные динамические свойства привода. В такой постановке на начальном этапе требуется лишь очертить область поиска с целью оценки массогабаритных показателей разрабатываемого электропривода. И основной вопрос, который возникает в этом случае, – определение основных размеров двигателя: диаметра и осевой длины воздушного зазора. Полученные выше выражения позволяют соотнести указанные главные размеры двигателя с заданными динамическими показателями электропривода.

Оценка габаритов двигателя исходя из заданных динамических свойств электропривода

Расчетная мощность электродвигателя определяется выражением

$$P_{\text{эм}} = mEI, \quad (25)$$

где m – число фаз двигателя, E – ЭДС воздушного зазора, I – ток фазы. ЭДС в уравнении (25) определяется выражением [17]:

$$E = 4k_B k_{о6} W f B_{\delta} l \tau \alpha_{\delta}, \quad (26)$$

где k_B – коэффициент формы кривой индукции воздушного зазора; $k_{о6}$ – обмоточный коэффициент; W – число витков в фазе обмотки якоря; f – частота тока якоря; B_{δ} – амплитуда индукции воздушного зазора; l – осевая длина воздушного зазора; τ – полюсное деление; α_{δ} – коэффициент полюсного перекрытия.

Учтем, что $f = pn/60$, а полюсное деление определяется по выражению:

$$\tau = \frac{\pi D}{2p}, \quad (27)$$

где p – число пар полюсов двигателя; n – частота вращения ротора; D – диаметр расточки якоря. Кроме того, выразим ток через линейную нагрузку якоря A :

$$I = \frac{\pi AD}{2mW}. \quad (28)$$

Тогда, обозначив $\lambda = l/D$ и выразив частоту вращения через угловую скорость, перепишем выражение (25) в следующем виде:

$$P_{эм} = \frac{k_B k_{о6} \pi}{2} \omega B_{\delta} A \alpha_{\delta} \lambda D^3. \quad (29)$$

Требуемое значение мощности, определяемое необходимостью обеспечения заданных динамических свойств, положим равным электромагнитной мощности (29) при максимальном значении скорости, развиваемой двигателем. Раскроем ω_{max} согласно соотношению (20) с учетом выражений (15), (16) и, учтем, что момент инерции ротора, если считать его сплошным цилиндром с наружным диаметром D , можно рассчитать по выражению:

$$J_{д} = \frac{\pi}{32} \gamma l D^4 = \frac{\pi}{32} \gamma \lambda D^5, \quad (30)$$

где γ – средняя плотность материала ротора.

Перепишем выражение (29) в виде:

$$P_{тр} = P_{эм} = k_B k_{о6} \pi B_{\delta} A \alpha_{\delta} \lambda \frac{\varphi_0}{t_0} \sqrt{\frac{J_{нэ} D}{\frac{\pi}{32} \gamma \lambda}}. \quad (31)$$

Последнее выражение разрешим относительно диаметра D , подставив туда $P_{тр}$ из соотношения (21), и получим:

$$D = \frac{8 \gamma J_{нэ} \varphi_0^2}{\pi \lambda \alpha_{\delta}^2 k_B^2 k_{о6}^2 (B_{\delta} A)^2 t_0^4}. \quad (32)$$

Окончательные значения параметров, входящих в выражение (32), выбираются в процессе проектирования двигателя. Для предварительного выбора их значений можно руководствоваться следующими соображениями.

Параметр λ , согласно работам [17, 18], обычно выбирают из диапазона 0,3–3. Малые значения этого параметра обычно не используются в исполнительных двигателях с высоким быстродействием, поскольку приводят к нерациональному использованию объема машины, так как при этом увеличивается относительная длина конструктивных элементов и лобовых частей обмотки. Большие значения λ , с одной стороны, могут быть неприемлемы из-за увеличения прогиба вала, с другой стороны, при существенной осевой длине затрудняется отвод тепла от центральных частей машины, что ведет к необходимости снижения электромагнитных нагрузок. Следует отметить, что тихоходные и моментные двигатели выгоднее выполнять относительно короткими с большим диаметром. Это позволяет увеличить содержание меди в двигателе и, соответственно, линейную нагрузку якоря.

Коэффициент полюсного перекрытия α_{δ} зависит от конструкции магнитной системы ротора и обычно составляет 0,68–0,8 [19, 20]. Коэффициент формы поля в воздушном зазоре k_B может быть принят в предположении о синусоидальности этого поля равным 1,11 [17]. Предварительное значение обмоточного коэффициента $k_{о6} = 0,92 \div 0,96$ [18].

Определяющими для габаритов электродвигателя являются величины электромагнитных нагрузок, допустимые значения которых зависят от типа двигателя, его мощности, схемы охлаждения и режима работы. Для двигателей с возбуждением от высококоэрцитивных постоянных магнитов с самовентиляцией, работающих в продолжительном режиме, целесообразные значения линейной нагрузки якоря A лежат в диапазоне $(7,5–25) \cdot 10^3$ А/м. В двигателях с принудительным воздушным охлаждением линейная нагрузка якоря может достигать значений $(35–40) \cdot 10^3$ А/м [17]. Величина магнитной индукции в воздушном зазоре B_{δ} обычно составляет 0,6–0,9 Тл [17].

Зная главные размеры двигателя, можно приближенно оценить его габаритные размеры. Так для двигателя классического исполнения (ротор внутри статора) наружный диаметр статора предварительно может быть определен по выражению [17]:

$$D_0 = (1,3 \div 1,5)D. \quad (33)$$

Наружная длина машины может быть оценена по соотношению:

$$l_0 = (1,3 \div 2)l. \quad (34)$$

Моделирование динамических режимов привода

Для проверки возможности реализации заданных динамических режимов предлагается использовать более точную математическую модель привода, построенную на основе параметров выбранного или рассчитанного двигателя и редуктора (рис. 2).

Учитывая, что в качестве исполнительных двигателей для устройств управления чаще всего используются коллекторные или вентильные двигатели, динамические модели которых могут быть описаны структурно одинаково [13], в предлагаемой модели электромагнитная часть представлена апериодическим звеном первого порядка. Передаточный коэффициент этого звена равен $1/r_a$, где r_a – активное сопротивление обмотки якоря; электромагнитная инерционность якорной цепи учитывается постоянной $T_a = L_a/r_a$, где L_a – индуктивность якорной цепи. Связь между током якоря i и электромагнитным моментом двигателя определяется коэффициентом потокосцепления поля индуктора с обмоткой якоря ψ . Для ограничения тока якоря в схему введен нелинейный элемент типа насыщение с единичным передаточным коэффициентом и ограничением тока значением $i_m = k_f i_n$, где i_n – номинальный ток двигателя; k_f – коэффициент форсирования тока двигателя, учитывающий возможность превышения им номинального значения.

Для более точного отражения влияния нагрузки на общий характер переходных процессов момент сопротивления представлен в виде трех составляющих, как это принято, например, при моделировании исполнительных органов летательных аппаратов [14]

$$M_{nc} = M_{ct} + M_d + M_{ш}, \quad (35)$$

где M_{ct} – момент сухого трения, который моделируется релейным элементом, $M_d = k_d \omega$ – коэффициент демпфирования, пропорциональный скорости перемещения рабочего органа; $M_{ш} = k_{ш} \varphi$ – шарнирный момент, пропорциональный углу поворота рабочего органа.

Управляющий сигнал в виде напряжения U_n подается на вход якорной обмотки. Через время t_1 напряжение меняет знак. Фиксируется скорость ω и угол поворота рабочего органа φ . Если к моменту времени t_0 скорость отличается от нулевой по модулю более чем на $0,01-0,02 \omega_{max}$, следует поменять t_1 так, чтобы достигнуть указанного значения конечной скорости. При выполнении этого условия, необходимо зафиксировать значение угла φ_0 в момент времени t_0 . После этого следует изменить значение q , повторить операцию настройки t_1 и сравнить полученное значение φ_0 с предыдущим. Таким путем можно найти величину q , соответствующую максимальному значению отработанного угла для данной величины момента двигателя. Изменяя напряжение U_n и ток ограничения i_p , мы можем уточнить минимальное значение потребляемой мощности, при которой выполняются требования по динамике привода.

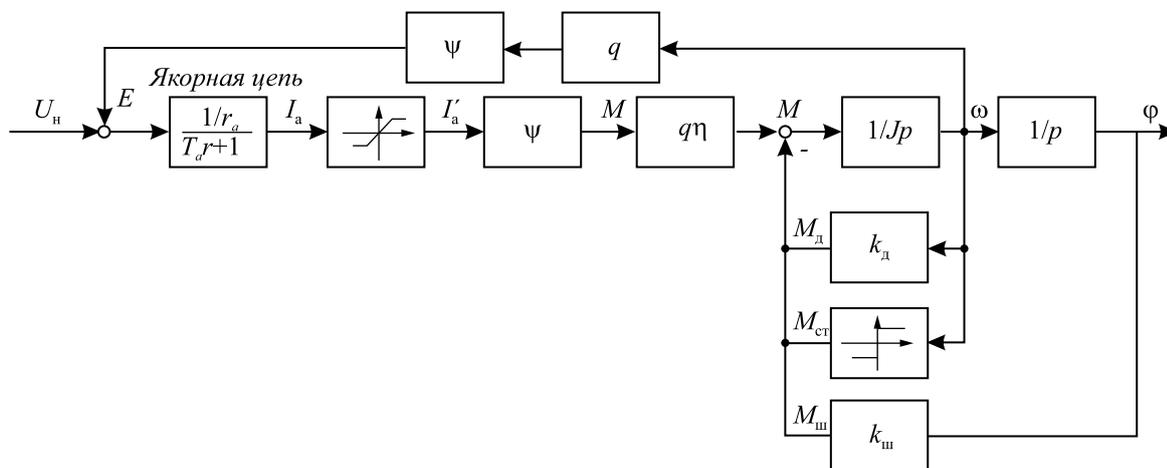


Рис. 2. Математическая модель привода

Представленная модель позволяет оценить правильность выбора или расчета двигателя, уточнить оптимальное значение передаточного коэффициента редуктора и минимизировать потребляемую мощность.

Результаты работы

При выборе компонентов электропривода предлагается руководствоваться следующими положениями:

Выбор электродвигателя, обеспечивающего заданные динамические свойства привода, предлагается осуществлять по величине динамической добротности и требуемой мощности, с последующей проверкой возможности обеспечения им заданной скорости при оптимальном значении передаточного отношения редуктора.

Для расчета требуемого значения мощности и добротности двигателя, а также для определения оптимального передаточного отношения редуктора предлагается использовать полученные в работе простые, физически понятные соотношения, представленные в виде функций заданных динамических показателей привода и известных параметров рабочих органов механизма, в котором он используется. Выбор параметров силовой части электропривода представляется итерационным процессом, на каждом шаге которого уточняются показатели его компонентов. В большинстве случаев выбор может быть произведен при небольшом количестве итераций.

При необходимости может быть спроектирован электродвигатель с заданными динамическими свойствами. В работе представлены соотношения для расчета его основных размеров, выраженные через заданные динамические показатели привода и параметры рабочих органов. Приведенные выражения позволяют приблизительно оценить массогабаритные показатели двигателя.

Проверка корректности произведенного выбора и расчетов, а также уточнение рассчитанных параметров могут быть осуществлены с помощью представленной в работе динамической модели электропривода.

Заключение

Полученные результаты позволяют комплексно подойти к проектированию электропривода с заданными динамическими свойствами исходя из условий обеспечения максимальной энергетической

эффективности и минимальных массогабаритных показателей привода.

Список литературы

1. *Siavash Rezazadeh and Jonathan W. Hurst.* On the optimal selection of motors and transmissions for electromechanical and robotic systems // 2014 IEEE/RSJ international Conference on Intelligent Robots and Systems, IEEE. 2014. P. 4605–4611.
2. *Pasch K., Seering W.* On the drive systems for high-performance machines // ASME Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design. 1984. Vol. 106. P. 102–108.
3. Servo motor selection criterion for mechatronic applications / *H.J. Van de Straete, P. Degezelle, J. De Schutter, and R.J. Belmans* // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 1998. Vol. 3. No. 1. P. 43–50.
4. *Van de Straete H.J., De Schutter J., Belmans R.J.* An efficient procedure for checking performance limits in servo drive selection and optimization // Mechatronics. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 1998. Vol. 4. No. 4. P. 378–386.
5. *Van de Straete H.J., De Schutter J., Leuven K.U.* Optimal variable transmission ratio and trajectory for an inertial load with respect to servo motor size // Journal of Mechanical Design. 1999. Vol. 121. P. 544–551.
6. *Fredrik Roos, Hans Johansson, and Jan Wikander.* Optimal selection of motor and gearhead in mechatronic applications // Mechatronics. 2006. Vol. 16. No. 1. P. 63–72.
7. *Cetinkunt S.* Optimal design issues in high-speed high-precision motion servo systems // Mechatronics. 1991. Vol. 1. No. 2. P. 187–201.
8. *Cusimano G.* Generalization of a method for the selection of drive systems and transmissions under dynamic loads // Mechanism and Machine Theory. 2005. Vol. 40. No. 5. P. 530–558.
8. *Cusimano G.* Choice of electrical motor and transmission in mechatronic applications: The torque peak // Mechanism and Machine Theory. 2011. Vol. 46. No. 9. P. 1207–1235.
9. *Giberti H., Cinquemani S., Legnani G.* A practical approach to the selection of the motor-reducer unit in electric drive systems // Mechanics Based Design of Structures and Machines. 2011. Vol. 39. No. 3. P. 303–319.
10. Selection and design of drive modules for robot joint based on dynamic load characteristics / *Seo Jung-moo, Rhyu Se-hyun, Seo Jang-ho,*

- Jung Hyun-kyo* // International Journal of Control, Automation, and Systems: IJCAS; Heidelberg. 2017. Vol. 15. No. 2. P. 790–801.
11. A motor selection technique for designing a manipulator / *C. Choi, S. Jung, S. Kim, J. Lee, T. Choe, S. Chung, and Y. Park* // Proc. of International Conference on Control, Automation and Systems, 2007. P. 2487–2492.
 12. *Воронин С.Г.* Электропривод летательных аппаратов: Конспект лекций. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006. Ч. 1. – 171 с.
 13. *Полковников В.А., Петров Б.И., Рывкин С.Е.* Электропривод летательных аппаратов: учебное пособие для авиационных вузов: 3-е изд. М.: Машиностроение, 1990. – 352 с.
 14. Динамические модели вентильного двигателя при различных сочетаниях параметров / *С.Г. Воронин, Д.В. Коробатов, Р.Т. Киякпаев, А.С. Кульмухаметова* // Известия Академии электротехнических наук РФ. Издание Академии электротехнических наук РФ. 2011. № 12. С. 47–52.
 15. *Крымов Б.Г., Рабинович Л.В., Стеблецов В.Г.* Исполнительные устройства систем управления летательными аппаратами. М.: Машиностроение, 1987. – 264 с.
 16. *Бут Д.А.* Бесконтактные электрические машины: учеб. пособие для электромех. и электроэнерг. спец. вузов. М.: Высш. шк., 1990. – 416 с.
 17. *Лифанов В.А.* Расчет электрических машин малой мощности с возбуждением от постоянных магнитов: учеб. пособ.: 2-е изд., перераб. и доп. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010. – 164 с.
 18. *Rudolf Richter.* Elektrische Maschinen. Zweiter Band: Synchronmaschinen und Einankerumformer // Springer Basel. eBook ISBN 978-3-0348-4139-9, DOI 10.1007/978-3-0348-4139-9. 707 p.
 19. *Юферов Ф.М.* Электрические машины автоматических устройств. М.: Высш. шк., 1988. – 479 с.

**ВОРОНИН
Сергей Григорьевич**

E-mail: voroninsg@susu.ru
Тел.: (351) 267-93-42

Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Летательные аппараты», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск. Сфера научных интересов: вопросы управления электромеханическими системами. Автор 170 публикаций.

**СОГРИН
Андрей Игоревич**

E-mail: sogrinai@susu.ru
Тел.: (908) 936-20-42

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Летательные аппараты», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск. Сфера научных интересов: специальные электромеханические преобразователи и электроприводы на их основе. Автор 37 публикаций.

**РОМАНОВ
Константин Валерьевич**

E-mail: kost.romanov2012@yandex.ru
Тел.: (951) 488-71-74

Студент, магистрант кафедры «Летательные аппараты», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск. Сфера научных интересов: вопросы создания алгоритмов управления и разработки электромеханических систем, альтернативная энергетика, разработка автономных электрогенерационных систем и комплексов. Автор 7 публикаций.