

## **О выборе скорости электродвигателя и передаточного числа редуктора привода руля направления транспортного самолёта<sup>1</sup>**

М.В. Баранов, М.В. Борисов, О.А. Корчагин, Н.В. Крылов, С.Л. Самсонович, В.С. Степанов

### **Аннотация**

Дано обоснование выбора вентильного электродвигателя и волнового редуктора с телами качения для электромеханического привода руля направления транспортного самолёта. Рассматривается влияние передаточного числа редуктора и параметров электродвигателя: коэффициента электрической редукции, индуктивности фаз и способа формирования токов в фазах на общие габаритные размеры в зависимости от выбираемой скорости электродвигателя.

### **Ключевые слова**

исполнительные механизмы приводов; электромеханические приводы; рулевые приводы; вентильные электродвигатели; волновые передачи с телами качения

### **Введение**

Одной из важных проблем при разработке электромеханических приводов нового поколения ЛА является минимизация массогабаритных показателей системы электродвигатель – редуктор. Для выбора типа и параметров электродвигателя и редуктора необходимо теоретически обосновать допустимые минимальные размеры каждого элемента и их взаимовлияние на общие габаритные размеры, т.к. при неизменном развиваемом моменте на выходном валу привода увеличение скорости двигателя приводит к необходимости увеличения передаточного числа редуктора и, как следствие, к росту его габаритов.

Особенностью решения указанной задачи является обеспечение требуемых нагрузочных характеристик в ограниченном выделяемом для размещения электропривода объеме. Нагрузочные характеристики зависят от циклограммы работы электропривода.

---

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках реализации ФПЦ «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы.

Одним из основных факторов, ограничивающих допустимую нагрузку на электропривод, является температура нагрева двигателя. Для транспортных самолетов максимальные скорость и момент имеют место в кратковременных режимах наземной проверки, взлета и посадки. В полёте пиковые нагрузки также носят кратковременный характер или вообще отсутствуют.

При такой циклограмме работы появляется возможность использования электропривода малого габарита, способного работать ограниченное время в форсированном режиме и перегрев которого остается в допустимых пределах.

Целью данной работы является обоснование выбора типов двигателя и редуктора с параметрами, обеспечивающими общие минимальные или заданные габариты.

### **Выбор типа электродвигателя**

В качестве исполнительных электродвигателей целесообразно использовать вентильные электродвигатели с возбуждением от постоянных магнитов. Указанные тип двигателя характеризуется максимальным развиваемым моментом по сравнению с электродвигателями других типов. Достигается это за счет применения магнитов из сплава NdFeBr для возбуждения двигателя, имеющих высокую плотность магнитной энергии [1].

Двигатели данного типа имеют хорошие условия теплоотвода. С одной стороны у двигателя «холодный» ротор на постоянных магнитах, а с другой стороны обмотки расположены на статоре, который имеет хороший тепловой контакт с теплоотводящими элементами конструкции привода.

Для повышения КПД целесообразно использовать моментное (токовое) управление исполнительным двигателем [2].

Как правило, допустимые габариты электропривода заданы конструкцией, в которую встраивается электромеханический привод. Поэтому найти подходящий электродвигатель из номенклатуры серийно выпускаемых, который бы оптимально встраивался, например, в конструкцию крыла самолета сложно. В особенности это относится к синхронным электродвигателям отечественного производства. В связи с этим при разработке электропривода на основе вентильного двигателя с постоянными магнитами необходимо рассматривать вопрос проектирования электродвигателя в заданных габаритах, а также сопрягаемого с ним редуктора.

Для дальнейшего рассмотрения выделим тип электродвигателей с сосредоточенными обмотками, где на каждый зубец одевается своя обмотка. Это уменьшает число

пересекающихся лобовых частей, повышает надежность двигателя из-за меньшей вероятности электрического пробоя и упрощает технологию намотки двигателя.

Двигатель такого типа характеризуется следующим соотношением между электрической редукцией и другими конструктивными параметрами:

$$2p = \frac{z}{m \cdot k} [k \cdot m \pm 1], \quad (1)$$

где  $z$  - число зубцов статора;  $2p$  - число магнитов на роторе,  $p$  - число пар полюсов или коэффициент электрической редукции двигателя;  $k$  - число зубцов в фазной группе;  $m$  - число фаз [2].

Соотношение (1) определяет целый ряд возможных конструктивных исполнений двигателя, отличающихся электрической редукцией.

### **Выбор типа механической передачи редуктора**

Сравнение зависимостей объемов различных типов механических передач, отнесенных к моменту нагрузки, от передаточного числа свидетельствует о целесообразности применения волновых передач с телами качения для достижения наименьших массогабаритных показателей [3]. Поэтому в дальнейшем рассматриваются редукторы, построенные на основе волновых передач с телами качения.

Зависимости наружного и внутреннего диаметров волновой передачи с телами качения от передаточного числа, приведенных в работе [3 (рис. 1.72)], свидетельствуют, что наружный диаметр передачи имеет экстремум в диапазоне  $q = 12 \div 20$  и его величина тем меньше, чем больше число рядов тел качения.

На этом основании целесообразно строить кинематическую схему редуктора в виде последовательно соединенных ступеней, при этом выходная ступень для обеспечения наименьшего наружного диаметра привода должна иметь передаточное число  $q_{\text{вых}} = 12 \div 20$ .

Будем рассматривать, как изменяется объём и масса редуктора при увеличении скорости электродвигателя в 2 раза.

При максимальной скорости электродвигателя  $\Omega_{\text{дв1}} = 5000$  об/мин и максимальной скоростью выходного вала привода  $\Omega_{\text{пр}} = 4 \div 6$  об/мин. Максимальное передаточное число редуктора:

$$q_{\Sigma} = \frac{5000}{4 \div 6} = 1250 \div 833.$$

С увеличением максимальной скорости электродвигателя, например, до  $\Omega_{дв2} = 1000$  об/мин, при той же мощности и скорости выходного вала привода требуется передаточное число редуктора не выше

$$q_{\Sigma} = \frac{10000}{4 \div 6} = 2500 \div 1667.$$

### **Влияние суммарной редукции двигателя и редуктора на тепловыделение в двигателе**

Для оценки влияния передаточного отношения редуктора на мощность потерь, выделяемых на активном сопротивлении обмоток, сопоставим два двигателя одинаковой конструкции и одинаковых размеров с числом витков в фазных обмотках, отличающимся в  $n$  раз и со скоростью ротора также отличающейся в  $n$  раз. Будем считать, что двигатели по конструкции магнитопроводов одинаковы и имеют одинаковый коэффициент заполнения паза. Пусть электродвигатели имеют наружный диаметр статора  $d_1$ , внутренний диаметр статора  $d_2$ . Сопротивление фазы двигателя равно:

$$R = k_{мед} \times \frac{L_{\Phi}}{S_{ПП}},$$

где  $k_{мед}$  - коэффициент удельного сопротивления меди, зависящий от температуры,  $L_{\Phi}$  - длина провода в фазе двигателя,  $S_{ПП}$  - площадь поперечного сечения провода.

Число витков в двигателях отличается в  $n$  раз, поэтому коэффициент противо-ЭДС первого двигателя выше коэффициента противо-ЭДС второго двигателя:

$$K_{E1} = K_{E2} \times n.$$

Мы рассматриваем двигатели с моментным управлением, имеющие глубокую обратную связь по току, при этом момент двигателя практически не зависит от частоты вращения. Тогда коэффициенты двигателя  $K_M$  и  $K_E$  жестко связаны между собой, где  $K_M$  - моментный коэффициент двигателя, определяющий зависимость между развиваемым моментом на валу и током. Запишем моменты, развиваемые первым и вторым двигателем при некотором токе  $I$  и скорости, различающейся в  $n$  раз.

Момент первого двигателя

$$M_1 = K_{M1} \times I,$$

при скорости  $\Omega$ .

Момент второго двигателя при скорости  $\Omega \times n$  составит

$$M_2 = K_{M2} \times I = \frac{K_{M1}}{n} \times I .$$

Двигатели при таких условиях выдают одинаковую механическую мощность.

Коэффициент  $K_M$  прямо пропорционален числу витков на зубце, т.е.

$$K_{M1} = k_1 \times N_1 \text{ и } K_{M2} = k_1 \times N_2 ,$$

где  $k_1$  - коэффициент пропорциональности, а  $N_1$  и  $N_2$  - число витков в каждом двигателе соответственно. Тогда

$$N_1 = n \times N_2 , L_1 ; L_2 \times n ,$$

где  $L_1$  и  $L_2$  - это длина провода в обмотках. Будем считать, что число витков пропорционально площади статора

$$S_{CT} = \frac{\pi}{4} \times (d_1^2 - d_2^2)$$

и обратно пропорционально площади провода

$$S_{PP} = \frac{\pi d_{PP}^2}{4} ,$$

где  $d_{PP}$  - диаметр провода. Тогда

$$N_1 = k_2 \times \frac{S_{CT}}{S_{PP1}} \text{ и } N_2 = k_2 \times \frac{S_{CT}}{S_{PP2}} ,$$

где  $k_2$  - коэффициент пропорциональности, который учитывает коэффициент заполнения пазов двигателя медью. Из этих равенств следует, что

$$S_{PP2} = S_{PP1} \times n .$$

Мощность омических потерь в первом двигателе составит:

$$P_1 = I^2 \times k_{мед} \times \frac{L_1}{S_{PP1}} ,$$

а во втором

$$P_2 = I^2 \times k_{мед} \times \frac{L_2}{S_{PP2}} .$$

Обозначим коэффициент  $I^2 \times k_{мед} = k_3$ , тогда мощность потерь в обмотках двигателей составит:

$$P_1 = k_3 \times \frac{L_1}{S_{PP1}} , \tag{2}$$

$$P_2 = k_3 \times \frac{L_2}{S_{\text{ПР2}}} = k_3 \times \frac{\frac{L_1}{n}}{S_{\text{ПР1}} \times n} = k_3 \times \frac{L_1}{S_{\text{ПР1}}} \times \frac{1}{n^2}. \quad (3)$$

Таким образом, получаем соотношение

$$\frac{P_1}{P_2} = n^2. \quad (4)$$

Выражение (4) показывает, что омические потери мощности в двигателе, работающем на большей в  $n$  раз скорости меньше в  $n^2$  раз.

Если допустимая нагрузка двигателя ограничивается тепловым режимом, то более скоростная система за счет меньших потерь в обмотках может быть нагружена большим током, что даст больший момент на выходе.

При выборе передаточного отношения механического редуктора необходимо одновременно учитывать электрическую редукцию в двигателе, что позволяет рассматривать электрическую редукцию и передаточное число редуктора в комплексе и говорить об итоговом коэффициенте редукции в приводе  $q_n$ .

Следует отметить, что существуют дополнительные факторы, которые приводят к усложнению указанной выше простой зависимости снижения тепловыделения на обмотках при возрастании редукции:

1) снижение суммарного коэффициента редукции и увеличение числа витков при многорядной намотке ведет к утолщению лобовых частей и дополнительному увеличению длины обмоток, что приводит к возрастанию сопротивления обмоток;

2) при рассмотрении влияния коэффициента электрической редукции на мощность потерь обмоток следует учесть, что при одном и том же коэффициенте электрической редукции в соответствии с выражением (1) может быть реализована разная конструкция статора.

По этой причине привести общую простую зависимость влияния коэффициента суммарной редукции на тепловыделение не представляется возможным.

Увеличение суммарного коэффициента редукции характеризуется и недостатками в части влияния на тепловыделение двигателя. При увеличении редукции увеличиваются потери в материале ротора и статора электродвигателя, увеличиваются потери в магнитах. Рассмотрим влияние скорости вращения ротора на потери в элементах конструкции двигателя. Ротор и статор изготавливают из электротехнической стали. Наилучшими характеристиками с точки зрения магнитной проницаемости и удельных потерь обладают

легированные, холоднокатаные стали. Потери в стали нормируются в ГОСТ 21427.1-83 и ГОСТ 21427.2-83. Для каждой марки определяются потери при фиксированных значениях амплитуды индукции и частоты при синусоидальной намагничивающей силе. Обычно эти данные приводятся для амплитуды индукции 1,5 Тл и частоты 50 Гц, но могут для некоторых толщин и марок сталей определяться при амплитуде индукции 1,0 Тл и частоте 400 Гц, а также при 1,0 Тл и 50 Гц и при 0,75 Тл и 400 Гц. Потери в стали разделяются на потери от токов Фуко, потери от гистерезиса и дополнительные потери. В справочниках приводятся данные для потерь в электротехнической стали при синусоидальном магнитном потоке. Общее выражение для потерь в стали:

$$P_v = C_{dc} K_h f (B_m)^2 + K_c (f B_m)^2 + K_e (f B_m)^{1,5}, \quad (5)$$

где  $P_v$  - удельные потери [Вт/кг],  $C_{dc}$  - коэффициент, учитывающий влияние подмагничивания магнитопровода постоянным потоком,  $f$  - частота перемагничивания в [Гц], прямо пропорциональна коэффициенту суммарной редукиции,  $B_m$  - амплитуда индукции при синусоидальной намагничивающей силе [Тл],  $K_h$  - коэффициент, определяющий гистерезисные потери,  $K_c$  - коэффициент, определяющий потери от вихревых токов в стали,  $K_e$  - коэффициент, определяющий дополнительные потери.

Последние три коэффициента можно найти, используя табличные данные о потерях в стали при фиксированной индукции и частоте.

Необходимо учесть, что по указанной формуле найти потери в стали можно лишь приблизительно, так как реальный поток в магнитопроводе электродвигателя имеет различные значения амплитуды в различных частях двигателя (спинка, зубец). Кроме того, реальный магнитный поток двигателя отличается от потока, при котором определяются потери, приведенные в характеристиках стали в ГОСТ. Преобладающими в формуле (5) являются потери от вихревых токов и дополнительных потерь в стали. Потерями на перемагничивание в холоднокатаной стали в первом приближении можно пренебречь. Амплитуда потока определяется потоком возбуждения от магнитов и током якоря. Будем считать ее постоянной и независимой от частоты перемагничивания.

Редкоземельные магниты NdFeBr имеют конечное сопротивление и в них также существуют потери от токов Фуко. Вихревые токи в магнитах возникают из-за модуляции проводимости магнитной цепи над магнитом. Будем считать, что потери возрастают пропорционально квадрату скорости, то есть пропорциональны квадрату электрической редукиции.

Таким образом, получаем, что потери в магнитопроводе статора и ротора и магнитах определяются 3-мя составляющими, две из которых пропорциональны квадрату частоты и одна полуторной степени от частоты. Примем для упрощения, что составляющая от дополнительных потерь в стали пропорциональна квадрату частоты. То есть приходим к выражению, определяющему зависимость потерь в материале магнитопровода и магнитах от частоты:

$$P_M(f) = K_{МАГ} f^2,$$

где  $P_M$  - потери в магнитопроводе и магнитах,  $K_{МАГ}$  - коэффициент пропорциональности, принятый постоянным при заданной конструкции геометрии магнитопровода и при данных материалах магнитопровода.

Соотношение между частотой потока в электродвигателе и скоростью выходного вала:

$$f = \frac{\Omega \cdot qn}{2\pi},$$

где  $f$  – частота потока в электродвигателе [Гц],  $qn$  – суммарный коэффициент редукции,

$\Omega$  - угловая скорость выходного вала  $\left[ \frac{\text{рад}}{\text{с}} \right]$ .

Из этого выражения следует, что

$$qn = \frac{f \cdot 2\pi}{\Omega}. \quad (6)$$

Ранее было показано, что с ростом редукции снижается мощность омических потерь. Обозначим  $P_0$  - мощность омических потерь при суммарном коэффициенте редукции, равном единице. Это соответствует прямому приводу с возбуждением от одной пары магнитов. Тогда при суммарной редукции  $qn$  мощность в соответствии с выражением (4):

$$P_{ОМ}(n) = \frac{P_0}{(qn)^2}. \quad (7)$$

Подставим в выражение (7) выражение (6), получим:

$$P_{ОМ}(f) = \frac{P_0 \cdot \Omega^2}{4\pi^2} \cdot \frac{1}{f^2}. \quad (8)$$

Обозначим

$$K_{ОМ} = \frac{P_0 \cdot \Omega^2}{4\pi^2},$$

тогда выражение (8) переписывается в виде:

$$P_{OM}(f) = K_{OM} \cdot \frac{1}{f^2}. \quad (9)$$

Суммарные потери:

$$P_{\Sigma}(f) = K_{МАГ} f^2 + K_{OM} \cdot \frac{1}{f^2},$$

при этом будут иметь минимум при частоте, определяемой из уравнения:

$$\frac{dP_{\Sigma}(f)}{df} = 0,$$

из которого следует, что минимум потерь достигается на частоте

$$f = \left( \frac{K_{OM}}{K_{МАГ}} \right)^{0,25}, \quad (10)$$

при которой потери в обмотках и магнитопроводе становятся равными.

Таким образом, при выборе коэффициента суммарной редукции  $q_n$  электродвигателя исходя из минимизации тепловыделения, можно в первом приближении считать наиболее подходящим, тот коэффициент, при котором омические потери и потери в магнитопроводе становятся равными. При этом потери в стали можно вычислять по табличным коэффициентам с учетом зависимости (5), а потери в магнитах можно учитывать с помощью расчета потерь в сплошном проводнике методом конечных элементов.

Необходимо отметить, что при нерациональной конструкции потери в магнитах могуткратно превышать потери в электротехнической стали. Для снижения потерь в магнитах применяют тот же прием, что и для стали. Магниты желательно набирать из сегментов вдоль оси двигателя.

Несмотря на то, что рассматривается зависимость тепловых потерь только от двух параметров (коэффициентов механической и электрической редукции) задача поиска минимума не может быть решена аналитически, поскольку при варьировании этих параметров при их разных значениях могут рассматриваться разные конструкции двигателя или редуктора. Возможный способ решения этой задачи может состоять в переборе вариантов с расчётом в каждом варианте магнитного поля с использованием метода конечных элементов.

## **Влияние индуктивности обмоток двигателя и способа управления двигателем на его тепловыделение**

Кроме описанных выше факторов на тепловыделение привода оказывает влияние способ управления приводом, а также такой параметр как индуктивность фаз двигателя. При управлении токовым контуром двигателем с помощью ШИМ задаётся частота переключений тока относительно средней составляющей. При этом амплитуда высокочастотной составляющей тока не контролируется. При низкой индуктивности фаз двигателя амплитуда высокочастотной составляющей может достигать значительных размеров, что повышает потери на омическом сопротивлении обмоток.

С другой стороны управление можно осуществлять с помощью «токового коридора». При этом контролируется амплитуда отклонения тока от среднего значения. При низкой индуктивности фаз двигателя в этом случае возрастает частота переключений, что является опасным фактором для транзисторных ключей, частота переключения которых ограничена. Кроме того, повышение частоты токового коридора создает высокочастотную модуляцию магнитного потока в магнитопроводе и магнитах, что приводит к повышению тепловых потерь в нём. Амплитуда индукции такой модуляции невелика, но частота может составлять десятки кГц. Потери от токов Фуко пропорциональны квадрату частоты и поэтому могут достигать значительных величин. Этот фактор может оказывать большее влияние на тепловые потери, чем фактор большой амплитуды высокочастотной составляющей тока. Для сравнения этих составляющих необходимо проводить расчеты, наиболее достоверным при этом окажется расчет поля методом конечных элементов, который позволит определить индуктируемые токи Фуко, а соответственно и потери. При недостаточной индуктивности обмоток возможна установка дополнительного дросселя, что требует значительных габаритов, особенно при больших токах фаз двигателя. Кроме того дополнительный дроссель также вносит дополнительные потери. Второй способ – проектирование двигателя при том же коэффициенте электрической редукции, но с меньшим числом зубцов. Это приведет к необходимости увеличения числа витков на отдельной обмотке. При этом собственная индуктивность отдельной обмотки зависит от квадрата числа витков, что даст общий выигрыш в индуктивности фазы.

На тепловые потери влияет способ управления двигателем. Наибольший удельный момент имеет двигатель с трапецеидальной формой ЭДС и алгоритмом «шестишагового» управления двигателем, при котором амплитуда управляющего фазного тока задаётся постоянной при неизменной нагрузке. Синусоидальное управление током каждой фазы или

«шестишаговое» с коммутацией 2 фаз в зависимости от углового положения ротора двигателя [3] оказывают различное влияние на тепловые потери. Синусоидальное управление может оказаться менее эффективным при трапецеидальной форме ЭДС с точки зрения развиваемого момента, но оно характеризуется более плавным изменением фазных токов. «Шестишаговое» управление порождает импульсы тока при переключениях с фазы на фазу. Каждый такой импульс вызывает импульсные потери в магнитопроводе, которые способны достигать значительных величин. Длительность этого импульса зависит от индуктивности и составляет обычно малую часть от периода коммутации фаз. При низкой скорости вращения вала этой особенностью можно пренебречь, но при росте скорости длительность импульса по отношению к периоду коммутации увеличивается, что приводит к дополнительному росту потерь.

### **Анализ массогабаритных показателей двигателей с равной мощностью на выходном валу и скоростью, отличающейся в 2 раза**

В качестве примера оптимизации передаточного отношения с точки зрения потерь энергии рассмотрим 3-х фазный двигатель, в котором используется шестишаговое управление. Внешний диаметр статора 74 мм, длина магнитопровода 50 мм. Максимальный момент магнитного «залипания» 0,03 Н·м. Двигатель рассчитан на максимальную рабочую температуру 170°C. При 100°C сопротивление обмотки одной фазы составляет 1,14 Ом, а её собственная индуктивность - 1,5 мГн. Расчет характеристик велся методом конечных элементов. Максимальная скорость двигателя 5000 об/мин. Рассчитаем потери энергии на этой скорости при заданном токе в фазы 5,5 А, что будет обеспечивать момент на выходном валу не ниже 2,0 Нм. Суммарная площадь статора составляет 1201 мм<sup>2</sup>. Примем коэффициент заполнения статора не ниже 85%. Тогда масса стали статора при указанных параметрах составит:

$$m_{СТ} = \frac{\rho_{СТ} \times S_{СТ} \times l_{СТ} \times k_3}{1000} = \frac{7,8 \times 12 \times 5 \times 0,85}{1000} \cong 0,4 \text{ кг},$$

где плотность стали примем  $\rho_{СТ} = 7,8 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$ ,  $S_{СТ} = 12 \text{ см}^2$  - площадь статора,  $l_{СТ} = 5 \text{ см}$  - длина магнитопровода,  $k_3 = 0,85$  - коэффициент заполнения.

Потерями в роторе пренебрежем, так как модуляция потока в нем значительно меньше из-за подмагничивания постоянными магнитами, а кроме того сама площадь, а следовательно и масса ротора меньше чем статора примерно в 4 раза.

В качестве материала статора примем электротехническую сталь марки 2413 толщиной 0,35 мм. Тогда из характеристик стали, нормируемых ГОСТ, находим потери:  $P_{1,5/50} = 2,5 \text{ Вт/кг}$ . Максимальные значения индукции в материале двигателя при заданном токе 5,5 А не превышают 1,4 Тл, что близко к значению 1,5 Тл, нормируемом в ГОСТ. При скорости 5000 об/мин и указанной конструкции (электрическая редукция равна 6), частота магнитного потока в статоре составит:  $f = \frac{5000 \times 6}{60} = 500 \text{ Гц}$ , что в 10 раз больше, чем частота, нормируемая в ГОСТ. При принятом ранее допущении, о квадратичном росте потерь в стали в зависимости от частоты получим:  $P_{1,5/500} = 2,5 \times 100 = 250 \text{ Вт/кг}$ , тогда потери в статоре составят:  $P_{СТ} = 0,4 \times P_{1,5/500} = 0,4 \times 250 = 100 \text{ Вт}$ . Потери в магнитах от вихревых токов оценивались методом конечных элементов. В среднем их можно оценить величиной 60 Вт. Тогда суммарные потери энергии в материале магнитопровода и магнитах можно оценить величиной 160 Вт. При указанном сопротивлении фазы и токе 5,5 А омические потери составят:

$$P_{ОМ} = 2 \times R_{\Phi} \times I^2 = 2 \times 1,14 \times 5,5^2 \cong 70 \text{ Вт} ,$$

где  $2 \times R_{\Phi}$  - сопротивление 2-х последовательно включенных фаз двигателя при температуре 100°C, I- ток двигателя.

Таким образом, омические потери при скорости 5000 об/мин и развиваемом моменте на валу не ниже 2,0 Нм оказались более, чем в 2 раза ниже, чем суммарные потери в магнитах и статоре. Сумма омических потерь мощности и потерь в материале составит 230 Вт.

Рассчитаем потери в двигателе с той же конструкцией магнитопроводов, имеющем витки, уложенные в два сложения, и работающем на максимальной скорости 10000 об/мин при том же токе в двигателе 5,5 А. При этом момент, развиваемый двигателем упадет в 2 раза (не менее 1 Нм), а мощность на выходном валу останется прежней. При квадратичной зависимости потерь в стали от частоты, примем потери в стали равными 400 Вт. Потери в магнитах при заданном токе 5,5 А достигают 100 Вт. Таким образом суммарные потери энергии в материалах двигателя составляют 500 Вт. Рассчитаем омические потери в двигателе. Так как обмотки укладываются в два сложения, то общее сопротивление сократилось в 4 раза, следовательно  $P_{ОМ} \approx 18 \text{ Вт}$ .

Таким образом, двигатель, сконструированный для развития скорости 10000 об/мин имеет значительно более низкие омические потери, но при этом потери в материалах

составляют 500 Вт против 160 Вт на скорости 5000 об/мин. При этом суммарные потери составляют 518 Вт, что более чем в 2 раза превышает потери на скорости 5000 об/мин.

Дальнейшее увеличение максимальной скорости двигателя в этой конструкции, а следовательно и увеличение передаточного отношения редуктора приведет к еще большему снижению омических потерь, но это не окажет никакого влияния на суммарные потери энергии в двигателе из-за незначительности омических потерь на фоне потерь в материалах электродвигателя.

### **Анализ массогабаритных показателей редуктора на основе волновой передачи с телами качения**

Для реализации передаточного числа редуктора в большинстве случаев требуется две или три ступени волновой передачи с телами качения, при этом объем редуктора будет складываться из объема ступеней:

$$W_{\text{ред}} = W_{\text{вых}} + W_2 + W_3 \quad (11)$$

где  $W_{\text{вых}}$ ,  $W_2$ ,  $W_3$  – объемы выходной (первой), второй и третьей ступеней редуктора,  $W_{\text{ред}}$  – объем редуктора.

Объем каждой ступени, представляющей собой пустотелый цилиндр, выражается зависимостью

$$W = \frac{\pi}{4} (D_{\text{н}}^2 - d_{\text{вн}}^2) L, \quad (12)$$

где  $D_{\text{н}}$ ,  $d_{\text{вн}}$  – наружный и внутренний диаметры ступени,  $L$  – длина ступени,  $W$  – объем ступени.

Габаритные параметры ступени волновой передачи с телами качения можно выразить через диаметр тел качения [2]:

$$D_{\text{н}} = \left( \frac{2,06}{\sin\left(\frac{\pi}{q}\right)} + 1,8 \right) d_{\text{тк}}, \quad (13)$$

$$d_{\text{вн}} = \left( \frac{2,06}{\sin\left(\frac{\pi}{q}\right)} - 4,4 \right) d_{\text{тк}}, \quad (14)$$

$$L = (1,2n_p + 1,8) d_{\text{тк}}, \quad (15)$$

где  $d_{\text{тк}}$  – диаметр тел качения (шарика или ролика),  $n_p$  – число рядов тел качения в ступени.

Диаметр тел качения определяется из условия прочности и выражается зависимостью:

$$d_{\text{тк}} = \sqrt[3]{\frac{241 \cdot M_{\text{н}}}{n_p \cdot k_{\text{тк}} \cdot (q-1)} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{q-1}\right)} \quad (16)$$

где  $M_{\text{н}}$  – максимальный момент нагрузки на выходном звене ступени передачи,  $k_{\text{тк}}$  – коэффициент нагрузочной способности тела качения,  $k_{\text{тк}} = 1$  для шариков,  $k_{\text{тк}} = 2$  для роликов с длиной, равной диаметру.

Если принять, что диапазон передаточных чисел в каждой ступени также выбирается из условия минимизации наружного диаметра, в диапазоне  $q_{2,3} = 12 \div 20$ , и учесть, что момент нагрузки, действующей на последующие ступени, уменьшается на соответствующее передаточное число, то объем, занимаемый редуктором, в результате подстановки приведенных зависимостей (12-16) в (11) имеем:

$$W_{\text{ред}} = W_{\text{вых}} + W_{\text{вых}} \cdot \frac{1}{q_{\text{вых}}} + W_{\text{вых}} \cdot \frac{1}{q_{\text{вых}} q_2}, \quad (17)$$

где

$$W_{\text{вых}} = 189 M_{\text{н}} \cdot \frac{1,2n + 1,8}{n_p \cdot k_{\text{тк}} \cdot (q-1)} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{q-1}\right) \cdot \left[ \left( \frac{2,06}{\sin\left(\frac{\pi}{q}\right)} + 1,8 \right)^2 - \left( \frac{2,06}{\sin\left(\frac{\pi}{q}\right)} - 4,4 \right)^2 \right] \quad (18)$$

Учитывая, что объём одной ступени редуктора  $W$  пропорционален моменту нагрузки, то для определения объёмов каждой ступени будем рассматривать отношение  $W/M$ . На рис. 1 приведён график зависимости отношения  $W/M$  от передаточного числа  $q$  при различных значениях  $n_p$ .

Масса редуктора

$$m_{\text{ред}} = \rho k_3 W_{\text{вых}} \left( 1 + \frac{1}{q_{\text{вых}}} + \frac{1}{q_{\text{вых}} q_2} \right), \quad (19)$$

где  $\rho$  – плотность материала основных деталей (стали),  $k_3$  – коэффициент заполнения объема ( $k_3 = 0,7 \div 0,8$ ).

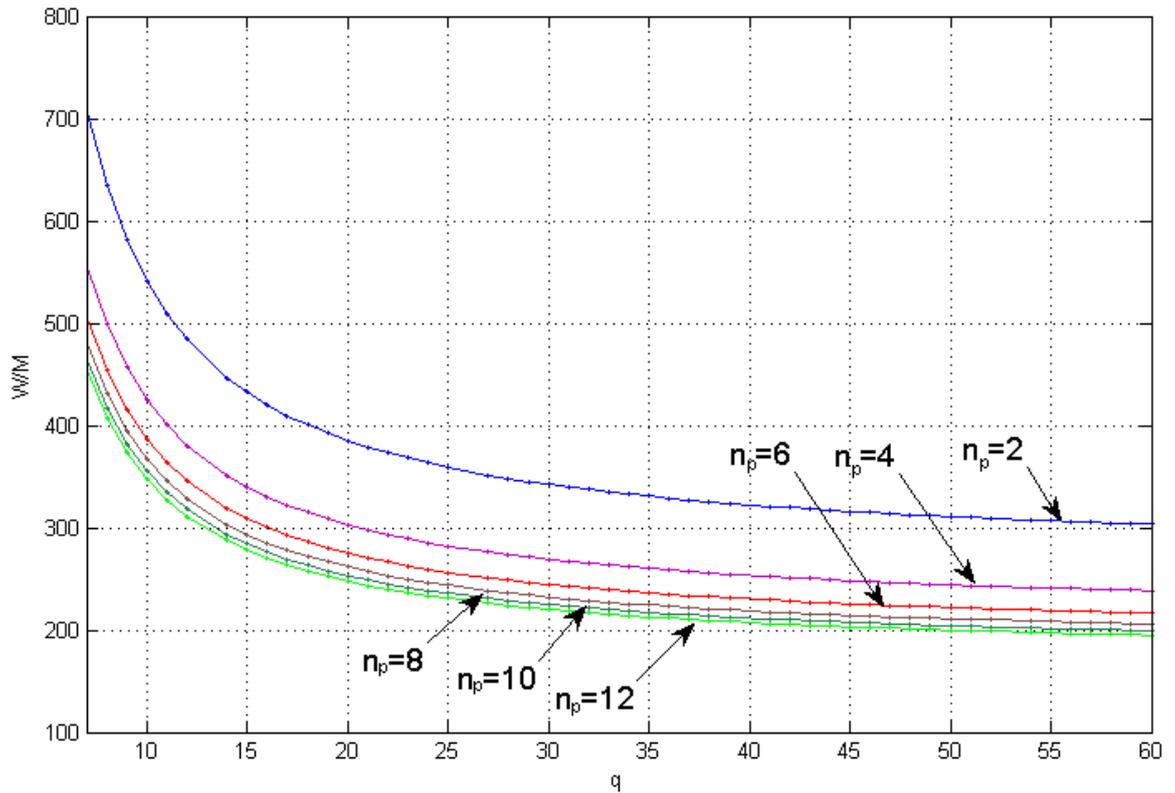


Рис. 1. Зависимость объёма одной ступени, отнесённого к моменту нагрузки, от передаточного числа при разных значениях чисел рядов тел качения

Приведённые зависимости свидетельствуют, что при примерно одинаковых передаточных числах в ступенях и использовании в промежуточной ступени числа рядов тел качения  $n_p = 2$ , а в выходной ступени  $n_p = 3; 4; 6; 8; 10; 12$ . Следует отметить, что основная масса и габариты редуктора определяются выходной ступенью. При этом использование трех или четырех рядов тел качения в ступени позволяет сократить наружный диаметр ступени на 12% и 20% соответственно по сравнению с реализацией ступени с двумя рядами тел качения.

В случае, когда требуется выполнить редуктор с заданным моментом нагрузки  $M_n$  с одним наружным диаметром  $D_n$  следует увеличить число рядов тел качения ступени. Число рядов тел качения выбирается из условия:

$$n_p \geq \frac{241 \cdot M_n}{D_n^3 \cdot k_{TK} \cdot (q_{\text{ВЫХ}} - 1)} \sin\left(\frac{\pi}{q_{\text{ВЫХ}} - 1}\right) \left( \frac{2,06}{\sin\left(\frac{\pi}{q_{\text{ВЫХ}}}\right)} + 1,8 \right)^3.$$

На практике, из компоновочных соображений все ступени редуктора выполняются с одинаковым наружным и внутренним диаметрами. В этом случае ступени отличаются только длиной.

При передаточных числах каждой ступени  $q_{\text{вых}} = q_2 = q_3 = 12 \div 20$  длина второй и третьей ступеней может быть выражена через длину выходной ступени:

$$L_2 = L_{\text{вых}} \sqrt[3]{\frac{1}{q_{\text{вых}}}}$$

$$L_3 = L_{\text{вых}} \sqrt[3]{\frac{1}{q_{\text{вых}} q_2}}$$

Соответственно, объем редуктора можно оценить как

$$W_{\text{ред}} = W_{\text{вых}} + (0,4 \div 0,5)W_{\text{вых}} + (0,15 \div 0,2)W_{\text{вых}},$$

где меньшие значения соответствуют  $n_p = 3$  и  $q = 20$ .

Суммарный объем двух ступеней можно определить по графикам на рис. 2.

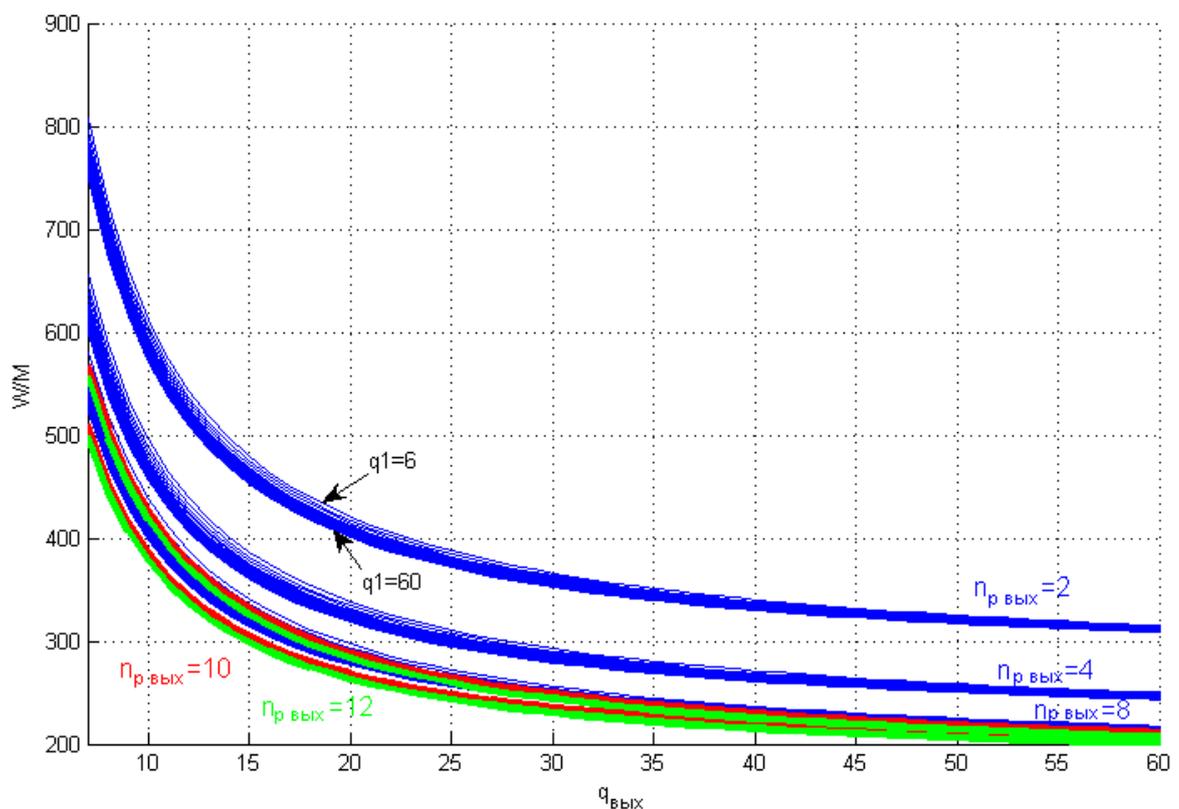


Рис. 2. Зависимость объема двух ступеней, отнесённого к моменту нагрузки, от передаточных чисел при разных значениях чисел рядов тел качения выходной ступени

Здесь построены графики для  $n_{p_{вых}} = 2; 4; 8; 10; 12$  выходной ступени и передаточных чисел промежуточной ступени  $q_1 = 6 \div 60$ . Число рядов промежуточной ступени  $n_{p1} = 2$  для всех графиков. По оси абсцисс отложены значения передаточных чисел выходной ступени. Как видно из графиков, изменение параметра  $q_1$  в указанном диапазоне несущественно влияет на общий объём всего редуктора, т.к. графики при различных  $q_1$  расположены очень близко друг к другу (массивом или полосой) – минимальному  $q_1$  соответствует верхний график полосы, максимальному – нижний график полосы. Из-за того, что массивы графиков при  $n_{p_{вых}} = 10$  и  $n_{p_{вых}} = 12$  накладываются друг на друга, на рис. 2 изображены только крайние графики этих массивов.

По приведённым графикам на рис. 2 можно найти приблизительный общий объём редуктора. По выбранным значениям передаточного числа  $q_{вых}$  выходной ступени, числу рядов роликов  $n_{p_{вых}}$  и передаточного числа  $q_1$  промежуточной ступени находится значение параметра  $W/M_H$ . Приблизительный объём редуктора равен произведению найденного значения  $W/M_H$  на требуемый выходной момент.

Определяющими параметрами влияющими на суммарный объём двухступенчатого редуктора, как следует из анализа, являются передаточное число выходной ступени  $q_{вых}$ , число рядов роликов выходной ступени  $n_{p_{вых}}$  и выходной момент редуктора  $M_H$ .

В случае рассматриваемых двигателей с 5000 об/мин и 10000 об/мин приблизительный объём редукторов можно найти следующим образом.

При использовании двигателя с 5000 об/мин  $q_{\Sigma} = 833 \div 1250$  и редуктор целесообразно реализовать из двух ступеней. Для выходной ступени выбираем  $q_{вых} = 20$  как наиболее оптимальное с точки зрения минимизации наружного диаметра. При этом передаточное число промежуточной ступени изменяется в интервале  $q_1 = 42 \div 63$ . В промежуточной ступени целесообразно задавать  $n_{p1} = 2$ . Графики зависимостей отношения суммарного объёма редуктора к выходному моменту от  $q_1$  для различных  $n_{p_{вых}}$  показаны на рис. 3.

При использовании двигателя с 10000 об/мин  $q_{\Sigma} = 1667 \div 2500$  и редуктор целесообразно реализовать из трёх ступеней. Выходная ступень также будет иметь  $q_{вых} = 20$ ; вторая промежуточная ступень, располагающаяся ближе к выходной, будет иметь

$q_2 = 12$  из соображения оптимальности габаритов. А передаточное число первой промежуточной ступени будет лежать в диапазоне  $q_1 = 7 \div 11$ . В обеих промежуточных ступенях целесообразно задать  $n_{p1} = n_{p2} = 2$ . Графики зависимостей отношения суммарного объёма редуктора к выходному моменту для различных  $n_{p\text{вых}}$  и  $q_1$  показаны на рис. 4.

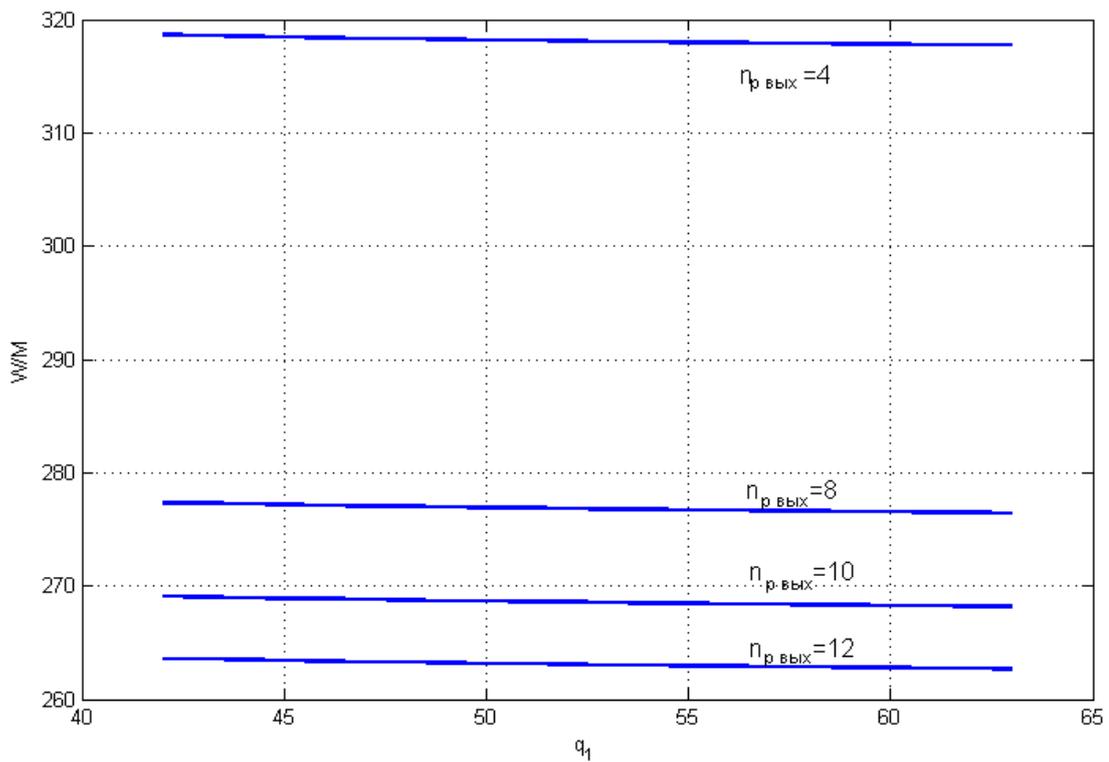


Рис. 3. Зависимость объёма двух ступеней, отнесённого к моменту нагрузки, от передаточных чисел промежуточной ступени при  $q_{\text{вых}} = 20$ .

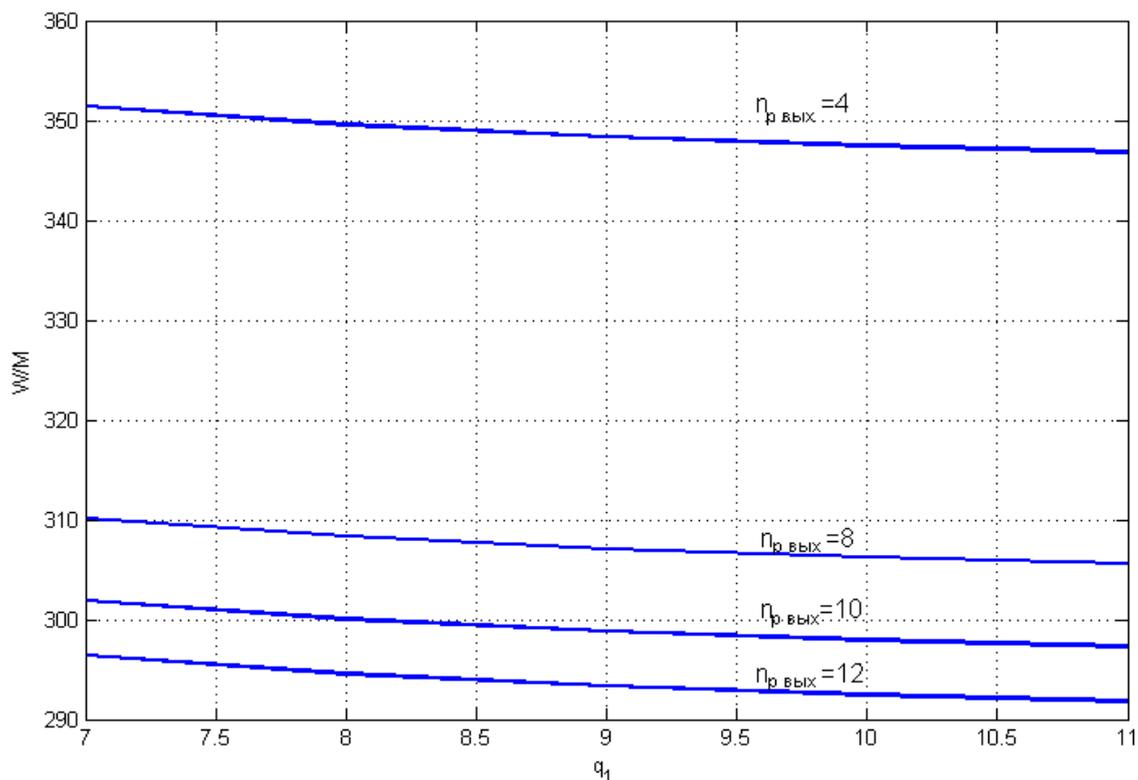


Рис. 4. Зависимость объема трёх ступеней, отнесённого к моменту нагрузки, от передаточных чисел первой промежуточной ступени при  $q_{\text{вых}} = 20$  и  $q_2 = 12$

## Выводы

1. Показано, что передаточное отношение редуктора и электрическая редукция двигателя совместно влияют на общие массогабаритные показатели, что позволяет говорить о суммарном коэффициенте редукции. Повышение суммарного коэффициента редукции приводит к снижению омических потерь в электродвигателе и к росту потерь в магнитопроводе и магнитах. При этом потери в магнитопроводе и магнитах зависят от применяемых материалов и конструкции электродвигателя

2. Установлено, что основной объем и масса редуктора определяются выходной ступенью и использование трех рядов тел качения обеспечивают наименьшие габариты.

3. Показано, что в результате расчетов совместных массогабаритных показателей двигателя и редуктора наилучшие значения имеют место при скорости двигателя 5000 об/мин.

## Библиографический список

1. Панкратов В.В. Вентильный электропривод: от стиральной машины до металлорежущего станка и электровоза. Электронные компоненты, 2007, №2.

2. Баранов М.В., Бродовский В.Н., Зимин А.В., Каржавов Б.Н. Электрические следящие приводы с моментным управлением исполнительными двигателями. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006.

3. Геращенко А.Н., Постников В.А., Самсонович С.Л. Пневматические, гидравлические и электрические приводы летательных аппаратов на основе волновых исполнительных механизмов: Учебник. – 2 е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2010 – 548 с.

### **Сведения об авторах**

Баранов Михаил Васильевич, генеральный директор ООО «Научно-производственная фирма «Политех», к.т.н.

123001, Российская Федерация г. Москва, Малый Патриарший переулок д. 3-39;

e-mail: [info@npf-polytech.ru](mailto:info@npf-polytech.ru)

Борисов Михаил Васильевич, аспирант Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993;

e-mail: [one2k.bmw@gmail.com](mailto:one2k.bmw@gmail.com)

Корчагин Олег Александрович, начальник отдела ООО «Научно-производственная фирма «Политех».

123001, Российская Федерация г. Москва, Малый Патриарший переулок д. 3-39.

e-mail: [koroleg@inbox.ru](mailto:koroleg@inbox.ru)

Крылов Николай Валерьевич, аспирант Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993;

e-mail: [artsunday@mail.ru](mailto:artsunday@mail.ru)

Самсонович Семён Львович, профессор Московского авиационного института (национального исследовательского университета), д.т.н.

МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993;

тел.: +7 (499) 158-50-00, 8-910-414-07-26

Степанов Вилен Степанович, доцент Московского авиационного института (национального исследовательского университета), к.т.н.

МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993;

тел.: +7 (499) 158-50-00, +7 (916) 280-27-21; e-mail: [stevilen@mail.ru](mailto:stevilen@mail.ru)