

УДК 639.7.05

П.С. БОНДАРЧУК

*Казённое предприятие специального приборостроения «Арсенал». Украина***РЕЗОНАНСНЫЙ РУЛЕВОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД.
ТЕПЛОВАЯ МОДЕЛЬ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ**

Экспериментально исследован трёхфазный безколлекторный двигатель постоянного тока с гладким статором, используемый как исполнительный двигатель электрических рулевых приводов летательных аппаратов и построены его аналитическая и компьютерная модели, учитывающие происходящие в нём тепловые процессы. Исследование электрического двигателя проведено по упрощённой методике, позволяющей существенно снизить затраты средств и времени выполнения работ. Проведено проверочное имитационное моделирование, подтверждающее достаточную точность созданной тепловой модели исполнительного двигателя.

Ключевые слова: резонансный электрический рулевой привод, исполнительный двигатель, тепловая модель.

Введение

В настоящее время имитационное моделирование является мощным инженерным инструментом разработки новых и анализа существующих рулевых приводов летательных аппаратов (ЛА). Этот инструмент позволяет не только осуществить выбор оптимальных параметров электрических приводов, но и оценивать их энергетические характеристики, степень тепловой нагрузки на их элементы, прежде всего на исполнительный двигатель (ИД). Для решения такой задачи необходимо иметь математическую модель ИД, учитывающую происходящие в нём тепловые процессы.

Как правило, построение такой модели представляет собой определённую проблему, связанную отчасти с тем, что разработчики и изготовители ИД не всегда предоставляют достаточное для построения такой модели количество сведений о своих двигателях. Зачастую часть этих сведений приходится добывать экспериментально.

Проблеме построения тепловой модели трёхфазного безколлекторного двигателя постоянного тока с гладким статором с возбуждением от постоянных магнитов, применяемого в качестве ИД резонансных электрических рулевых приводах (ЭРП) и посвящена данная работа.

Как было указано в [1], в современных ЭРП летательных аппаратов (ЛА) применяются быстродействующие электродвигатели постоянного тока серий МИК (коллекторные) и ЭМУ (безколлекторные), вытеснив двигатели известной серии ДПР с полым якорем.

Электродвигатели серии МИК представляют собой ряд однотипных быстродействующих коллек-

торных исполнительных двигателей различной мощности, предназначенные для работы в устройствах автоматики, в том числе, таких как рулевые приводы ЛА, в том числе, резонансных.

Главное конструктивное отличие двигателей этой серии – это гладкая конструкция якоря. Свойства и особенности таких двигателей, вопросы их проектирования, и тепловые режимы рассмотрены в [2]. Двигатели имеют улучшенные коммутационные свойства, обеспечивают высокую перегрузочную способность по току до 8-12 кратных значений, причём зависимость момента вращения от тока при этом линейная.

Как указано в [2], работа двигателей с гладким якорем в режимах кратковременной перегрузки по току характеризуется тем, что тепловые процессы локализуются в ядре двигателя при весьма неравномерном распределении температуры. Объясняется это тем, что основными потерями в режимах перегрузок являются потери в меди. Самыми нагретыми оказываются лобовые части обмоток, которые, будучи не прижаты к стали якоря, оказываются в наихудших условиях по тепловым режимам. В связи с этим применение двигателей с гладким якорем в режимах кратковременных токовых перегрузок ограничено температурой лобовых частей якорных обмоток, которая не должна превысить допустимую температуру для класса изоляции применённого обмоточного провода. Кроме того, соизмеримо с обмоткой якоря нагревается щёточный контакт.

Для расчёта температуры перегрева самых нагретых частей обмоток гладкого якоря, которыми оказались лобовые части, тот же источник [2] предлагает упрощённую методику, предполагающую по кривым разогрева обмоток двигателя построение

некоей результирующей зависимости интегрального эквивалентного коэффициента учёта теплопередачи, учитывающего и теплопередачу по меди. Указанная методика позволяет с достаточной степенью точности и довольно просто определять кривую нагрева, как при однократных перегрузках, так и при более сложных режимах. При этом, для проведения исследований тепловых процессов пришлось изготавливать специальные макетные образцы двигателей со встроенными датчиками температуры.

Основное отличие двигателей серии ЭМУ состоит в том, что это двигатели безколлекторные. Они содержат в себе обмотку статора с тремя секциями, соединёнными звездой и датчики положения ротора. Ротор представляет собой постоянный магнит на валу. Обмотки статоров этих двигателей выполнены также по беззубцовой технологии, поэтому двигатели имеют свойства, подобные свойствам двигателей с гладким якорем. Они имеют почти такое же высокое быстродействие, высокую перегрузочную способность. Отсутствие коллектора позволяет безболезненно многократно форсировать двигатели по напряжению.

Технические характеристики исполнительного двигателя ЭМУ-5 приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики ЭМУ-5

Характеристики	Значение
Сопротивление обмоток двух фаз $R_{2ф}$, Ом	5,35
Индуктивность обмоток двух фаз $L_{2ф}$, мкГн	600
Номинальное напряжение $U_{н}$, В	27
Скорость холостого хода $n_{хх}$, об/мин	19000
Момент инерции ротора $J_{р2} \times 10^{-6}$ кг·м ²	0,17
Коэффициент момента $K_{м2} \times 10^{-2}$ Н·м/А	1,4
Электромеханическая постоянная $T_{эм2}$, мс	4,8
Масса ИД $m_{ид}$, кг	0,07
Габариты $D \times L$, мм×мм	22×35
Номинальная мощность $P_{ном}$, Вт	30

Существенной для анализа тепловых процессов особенностью двигателей серии ЭМУ является то, что в их конструкции отсутствует источник большой неравномерности нагрева различных частей проводов: обмотки полностью прижаты к корпусу двигателя, в том числе и лобовыми частями. Эта особенность избавляет от необходимости учёта теплопередачи в меди и позволяет производить измерение температуры обмоток косвенным методом по падению напряжения на растущем от нагрева сопротивлении обмоток при протекании постоянного стабилизированного тока известной величины. то есть методика построения тепловой модели может быть существенно упрощена.

Постановка задачи

В режимах многократной кратковременной токовой перегрузки кроме проводов фазных обмоток и их изоляции за время 20 секунд работы привода другие части двигателя сколько-нибудь существенно нагреться не успевают. Поэтому при применении двигателей в таких режимах задачей теплового проектирования является обеспечение температуры проводов фазных обмоток в заданных пределах при заданной средней нагрузке двигателя по моменту. А потому для нас наибольший интерес представляют как раз сведения о том, при каких средних токах (или средних моментах нагрузки) температура проводов обмоток достигнет максимальной допустимой за заданное время. Температурные режимы других частей исполнительного двигателя никакого практического интереса не представляют.

Однако сведения о конкретных допустимых режимах кратковременной нагрузки в описании двигателей серии ЭМУ отсутствуют. С целью выяснения нагрузочной способности двигателя ЭМУ-5 из этой серии, используемого в резонансных ЭРП была проведена расчётно-экспериментальная работа. В результате этой работы построены его аналитическая и компьютерная модели, учитывающие происходящие в нём тепловые процессы.

Работа проведена с использованием методики, изложенной в [2] с учётом упрощений в части проведения измерений и отсутствия учёта теплопередачи по меди проводов, основанная на косвенном измерении температуры обмоток при протекании тока различных заданных значений.

Построение тепловой модели ИД

Ниже на рис. 1 приведены результаты измерений температуры перегрева обмоток исследуемого двигателя при протекании токов значениями 1,47 А, 2,35 А, 2,97 А и 4,32 А.

Приведенные кривые разогрева показывают качественный характер тепловых процессов в обмотках двигателей в режимах больших токовых перегрузок. Чтобы получить приемлемые по точности количественные характеристики рассматриваемых процессов необходимо учесть наличие обмотки третьей фазы. Фактически снятые данные соответствуют худшему случаю, при котором вал двигателя заторможен, обмотки не переключаются. Такой режим в нашем случае не реален. В наших устройствах, даже при зажатом выходном валу привода, двигатель совершает вращательные движения более чем на один оборот в пределах мёртвого хода и упругого люфта редуктора, не говоря о нормальных условиях работы. Поэтому практически можно считать, что

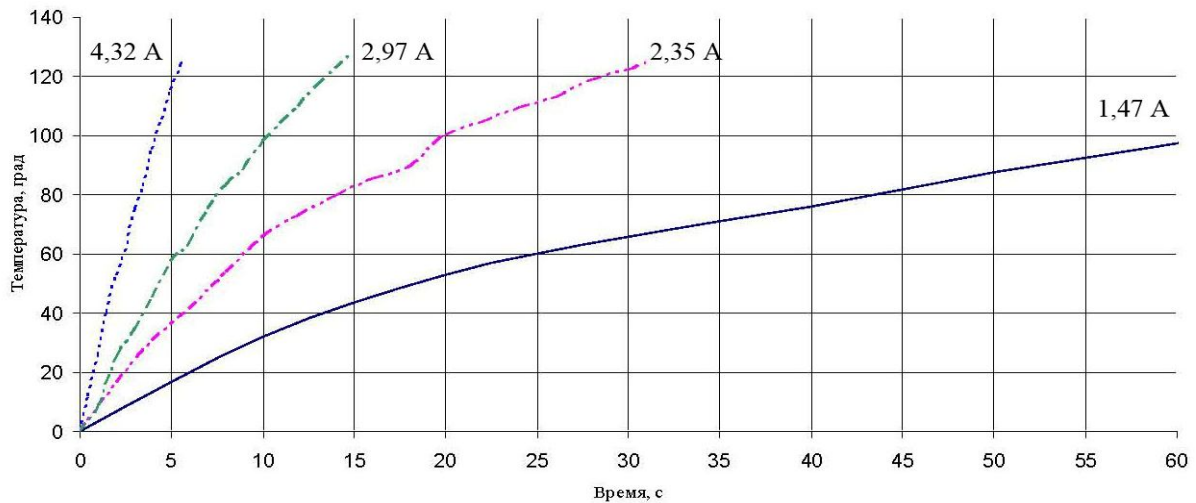


Рис. 1. Экспериментальные кривые разогрева двух фаз обмоток двигателей ЭМУ-5 при различных токах

потери в обмотках статора распределены равномерно между тремя фазными обмотками, а мощность потерь определяется выражением

$$P_{\text{п}} = I^2 \cdot R_{2\text{ф}}, \quad (1)$$

где I - указанный на рис. 1 ток, $R_{2\text{ф}}$ - текущее сопротивление двух последовательно включённых фазных обмоток.

Процесс нагрева проводов описывается дифференциальным уравнением

$$C_{\text{м}} \cdot \frac{d\Theta}{dt} + A \cdot \Theta = P_{\text{п}}, \quad (2)$$

где $C_{\text{м}}$ – теплоёмкость медных проводов (Дж/°С),

Θ – превышение температуры проводов над температурой окружающей среды, перегрев (°С),

A – теплоотдача (Вт/°С),

$P_{\text{п}}$ – мощность тепловых потерь в меди.

Напомним, что при проведении эксперимента нагреву подвергались только две из трёх фаз, поэтому при обработке экспериментальных данных необходимо использовать теплоёмкость двух фаз обмоток.

При расчёте температуры проводов обмоток трудности вызывает теплоотдача, которая очень трудно поддаётся расчёту по физическим данным, так как зависит от очень многих факторов. Остальные операнды уравнения известны и легко рассчитываются.

Поскольку нагреву подвергались только две из трёх фаз обмоток двигателя, то и теплоотдача шла от двух фаз. Теплоотдача двух фаз обмоток $A_{2\text{ф}}$ связана с полной теплоотдачей соотношением

$$A = 1,5 \cdot A_{2\text{ф}}. \quad (3)$$

У исследованного образца двигателя ЭМУ-5 сопротивление двух фаз обмоток составило $R_{2\text{ф}}=5,35$ Ом при температуре +20°С.

Масса меди в трех фазах обмоток двигателя ЭМУ-5 составляет 13,8 г. Учитывая, что удельная теплоёмкость меди 383 Дж/кг·°С, общая теплоёмкость медных проводов двигателя ЭМУ-5 $C_{\text{м}} = 5,29$ Дж/°С, теплоёмкость двух фаз обмоток $C_{\text{м}2\text{ф}} = 3,52$ Дж/°С - две трети общей теплоёмкости.

Теплоотдача $A_{2\text{ф}}$ для каждой экспериментальной кривой строится как отнесенная к измеренной текущей температуре перегрева Θ разность энергии потерь в меди

$$\Theta_{\text{п}} = I^2 \cdot R_{2\text{ф}}(\Theta) \cdot \Delta t \quad (4)$$

и энергии перегрева проводов

$$\Theta_{\text{р}} = \Delta\Theta_{\text{р}} \cdot C_{\text{м}2\text{ф}} \quad (5)$$

для элементарного отрезка времени Δt .

$$A_{2\text{ф}} = \frac{(I^2 \cdot R_{2\text{ф}}(\Theta) - \Delta\Theta_{\text{р}} \cdot C_{\text{м}2\text{ф}}) \div \Delta t}{\Theta}, \quad (6)$$

где $\Delta\Theta_{\text{р}}$ – элементарная разность температуры перегрева для элементарного отрезка времени Δt .

На рис. 2 приведен результат такого построения для исследуемого двигателя:

Как видим, теплоотдача мало зависит от времени, поэтому в расчётах при моделировании можно принять её константой для фиксированных значений тока. Для рассмотрения зависимости теплоотдачи от тока возьмём отношение средней теплоотдачи к квадрату тока потерь и назовём это отношение коэффициентом теплоотдачи по квадратичному току. Ниже на рис. 3 приведена диаграмма полученной зависимости.

Оказалось, что этот коэффициент имеет линейную зависимость от тока потерь и с высокой степенью точности может быть аппроксимирован указанным на рис. 3 линейным уравнением

$$K_{\text{а}}(I) = -0,0102 \cdot I + 0,0781 \quad [\text{Дж}/^\circ\text{С} \cdot \text{А}^2]. \quad (7)$$

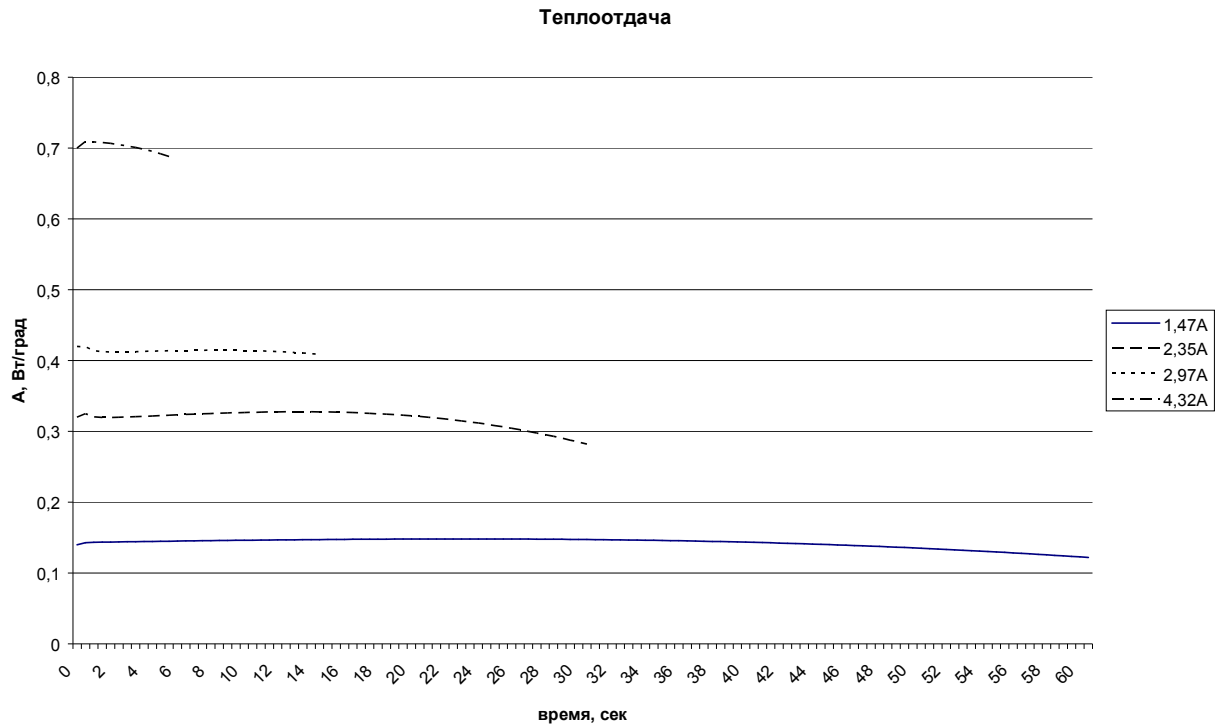


Рис. 2. Зависимости теплоотдачи $A_{2\phi}$ при различных значениях тока потерь

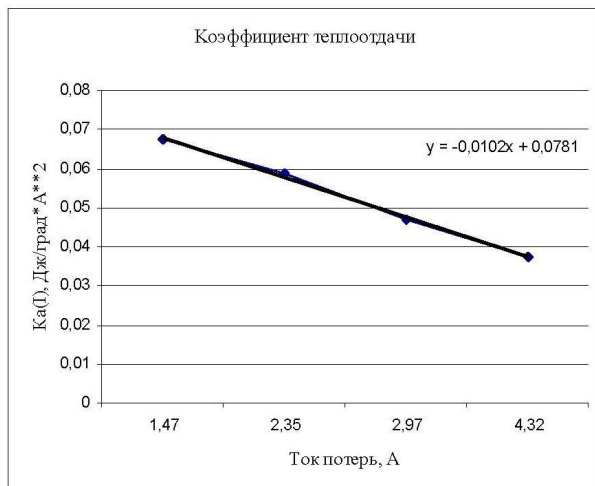


Рис. 3. Зависимость коэффициента теплоотдачи по квадратичному току от тока потерь

Полученная зависимость позволяет описать тепловые процессы, происходящие при эксперименте нагрева двух фаз обмоток двигателя ЭМУ-5. Для того, чтобы перейти к тепловой модели всего двигателя следует учесть отличия:

1) энергия потерь в меди будет распределена между тремя обмотками вместо двух. Поэтому в расчёте следует брать полную теплоёмкость меди C_M .

2) поскольку в эксперименте процесс теплоотдачи шёл с поверхности двух обмоток, а в реальности идёт с трёх, то для расчёта полной теплоотдачи следует использовать выражение (3).

Чтобы составить модель двигателя с учётом тепловых процессов перепишем уравнение (2) в виде:

$$\frac{d\Theta}{dt} = \frac{P_{II}}{C_M} - \frac{A}{C_M} \cdot \Theta \quad (8)$$

С учётом (4) и (1)

$$\frac{d\Theta}{dt} = \frac{I^2 \cdot R_{2\phi} \cdot (1 + 0,004 \cdot \Theta)}{C_M} - \frac{1,5 \cdot (-0,0102 \cdot I + 0,0781) \cdot I^2 \cdot \Theta}{C_M} \quad (9)$$

Модель исполнительного двигателя соответствует системе уравнений движения и равновесия ЭДС, приведенные в [3, стр. 229], дополненной уравнением (7), описывающим тепловую модель проводов обмоток:

$$\begin{cases} K_M \cdot I - M_c = J_p \cdot d\omega/dt; \\ U_d = K_e \cdot \omega + I \cdot R_{2\phi} \cdot (1 + 0,004 \cdot \Theta) + L_{2\phi} \cdot di/dt; \\ \frac{d\Theta}{dt} = \frac{I^2 \cdot R_{2\phi} \cdot (1 + 0,004 \cdot \Theta)}{C_M} - \frac{1,5 \cdot (-0,0102 \cdot I + 0,0781) \cdot I^2 \cdot \Theta}{C_M}. \end{cases} \quad (10)$$

По этим зависимостям в среде имитационного моделирования Simulink, входящего в математический пакет MATLAB создана компьютерная модель

исполнительного двигателя ЭМУ-5, которая представлена на рис. 4 – 6. Блок Saturation на рис. 5 моделирует работу схемы ограничения тока.

На рис. 7 представлены результаты модельного эксперимента нагрева двигателя при заторможенном роторе, проведенного для верификации модели, для тех же значений тока, при которых проводился физический эксперимент, результаты которого были представлены на рис. 1. Сравнивая результаты этих экспериментов видно, что они совпадают с высокой

степенью точности. Время достижения температуры перегрева 120 градусов отличается на 3,2%, 3,6% и на 9,6% для токов 4,32 А, 2,97 А, 2,35 А соответственно. Такую точность тепловой модели ИД можно оценить как достаточную для решения инженерных задач по разработке и анализу устройств автоматики с применением двигателя ЭМУ-5. Технологические разбросы основных параметров ЭМУ-5 достигают 20%, поэтому создавать более точную модель для наших задач не имеет смысла.

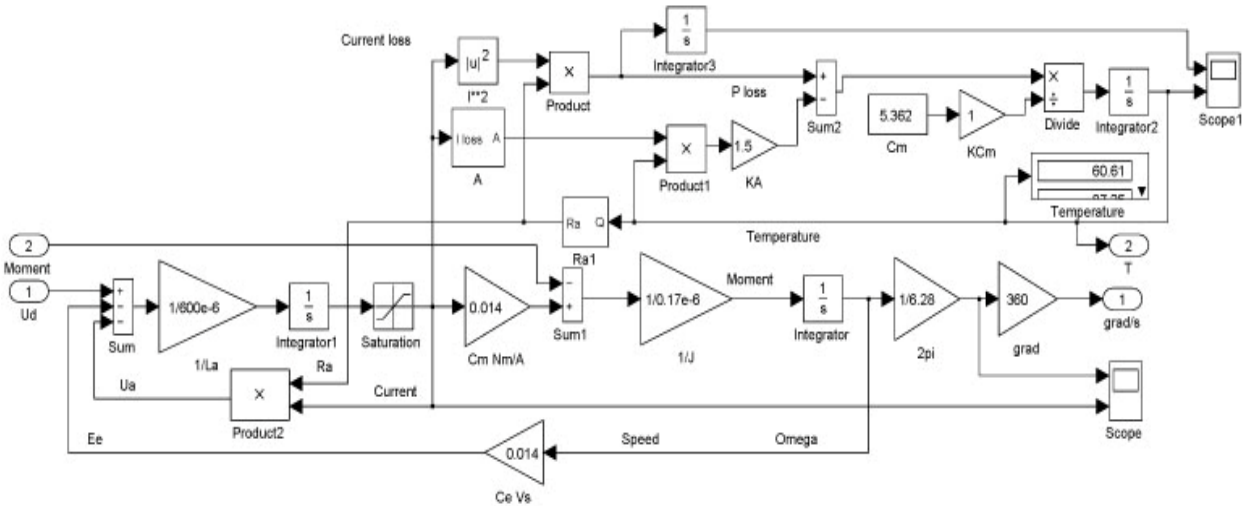


Рис. 4. Модель двигателя постоянного тока ЭМУ-5 с учётом тепловых процессов

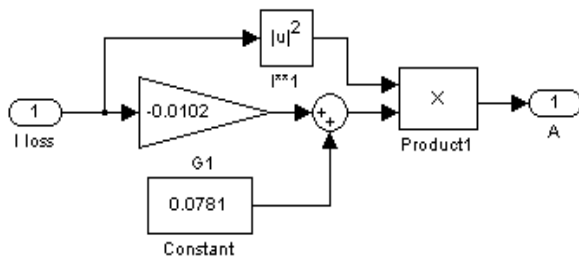


Рис. 5. Подсистема вычисления теплоотдачи A

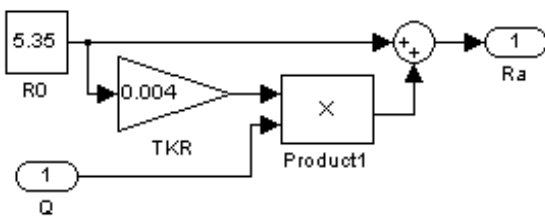


Рис. 6. Подсистема вычисления сопротивления обмоток Ra

Токовая нагрузочная способность двигателя для 20-ти секунд работы и 120°C температуры перегрева обмоток составила 2,59 А.

Токовая нагрузочная способность двигателя есть максимальный средний ток двигателя, при котором за время работы температура перегрева обмоток достигает предельного значения. Она тем выше, чем больше температурная стойкость изоляции проводов обмоток. При снижении времени работы нагрузочная способность двигателя также увеличивается.

Представляют интерес результаты модельного эксперимента разогрева обмоток двигателя ЭМУ-5 при вращающемся роторе, приведенные на рис. 8. Как видим, если ограничиться температурой перегрева 120°C, то его токовая нагрузочная способность для 20-ти секунд работы составила 3,74 А.

Сравнивая эти результаты экспериментов для заторможенного и вращающегося ротора, очевидно, что токовая нагрузочная способность вращающегося двигателя значительно превышает нагрузочную способность заторможенного двигателя.

Это свойство является отличительной особенностью трёхфазного безколлекторного двигателя с соединением обмоток звездой.

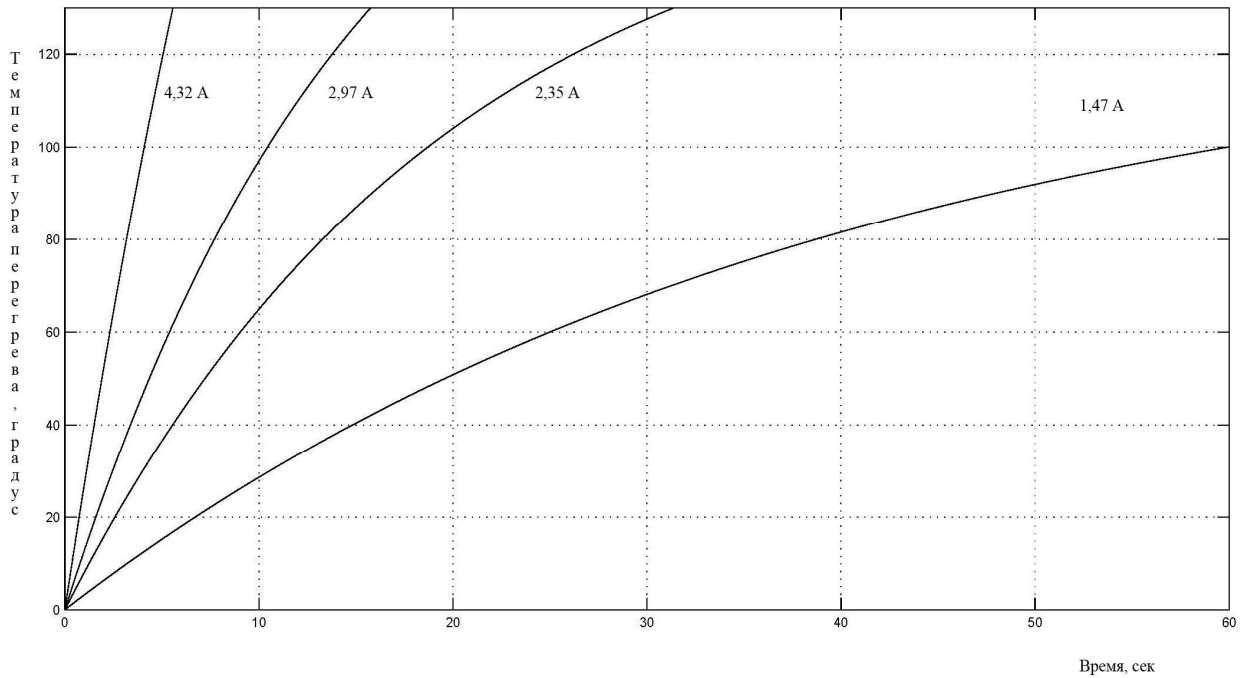


Рис. 7. Модельные кривые разогрева обмоток двигателей ЭМУ-5 при заторможенном роторе

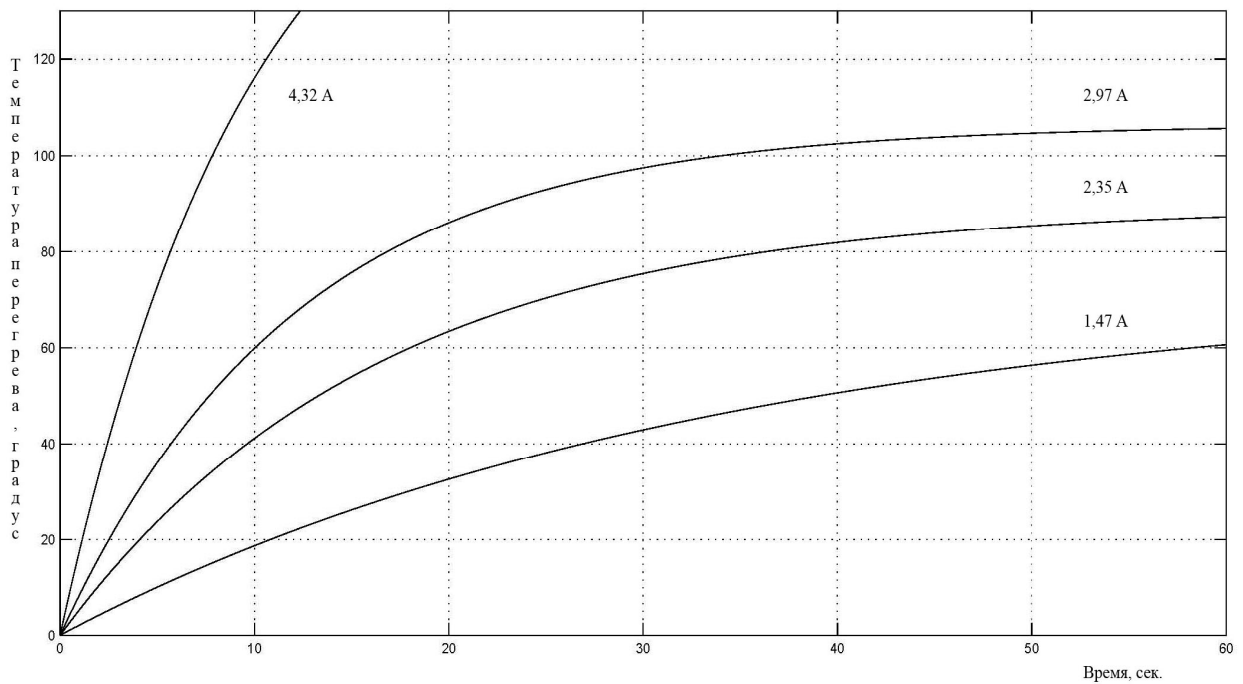


Рис. 8. Модельные кривые разогрева обмоток двигателя ЭМУ-5 при вращающемся роторе

Выводы

Созданная тепловая модель исполнительного двигателя ЭМУ-5 обладает достаточно высокой точностью и может быть использована для решения научных и инженерных задач моделирования устройств на базе указанного ИД с оценкой тепловой нагрузки на него.

Заключение

Используя результаты проделанной работы на основе построенной тепловой модели ЭМУ-5 возможно исследовать вопрос загруженности ИД в резонансном ЭРП.

Полученная оценка нагрузки позволит оценить запасы основных элементов рулевого привода, оп-

ределяющих его массогабаритные характеристики: ИД и источника питания.

Это позволит определить предельно достижимые удельные характеристики привода. В этом направлении будут проводиться дальнейшие работы по теме.

Литература

1. Бондарчук, П.С. Резонансный рулевой электрический привод. Современное состояние и анализ показателей качества [Текст] / П.С. Бондарчук //

Авиационно-космическая техника и технология. – 2011. - №3 (80). - С. 23-29.

2. Электрические двигатели с гладким якорем для систем автоматики [Текст] / Ю.К. Васильев, Г.В. Лазарев, Н.С. Рубан, А.В. Санченко, Б.А. Щердина; под ред. Ю.К. Васильева. – М.: Энергия, 1979. – 175 с.

3. Сабинин, Ю.А. Электромашинные устройства автоматики [Текст]: Учебник для вузов / Ю.А. Сабинин. – Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1988. – 407 с.

Поступила в редакцию 7.12.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф., главный конструктор А.В. Молодык, Научно-производственный комплекс № 3 казённого предприятия специального приборостроения «Арсенал», Киев.

РЕЗОНАНСНИЙ КЕРМОВИЙ ЕЛЕКТРИЧНИЙ ПРИВОД. ТЕПЛОВА МОДЕЛЬ ВИКОНАВЧОГО ДВИГУНА

П.С. Бондарчук

Експериментально досліджено трифазний безколекторний двигун постійного струму з гладким статором, що використовується як виконавчий двигун електричних кермових приводів літальних апаратів і побудовані його аналітична та комп'ютерна моделі, які враховують теплові процеси, що протікають у ньому. Електричний двигун досліджено за спрощеною методикою, яка дозволила суттєво знизити витрати та час виконання робіт. Проведено перевірочне імітаційне моделювання, що підтвердило достатню точність розробленої теплової моделі виконавчого двигуна.

Ключові слова: резонансный электрический кермовий привод, виконавчий двигун, тепла модель.

RESONANT STEERING ELECTRIC DRIVE. THERMAL MODEL OF THE EXECUTIVE ENGINE

P.S. Bondarchuk

It is experimentally investigated three-phase brushless DC motor with a smooth stator, used as the executive engine of electric steering drives of flying machines and its analytical and computer models considering thermal processes occurring in it are constructed. Electric motor research is spent by the simplified technique allowing essentially reduce the cost and time performance of works. The verifying imitating modeling confirming sufficient accuracy of created thermal model of the executive engine is spent.

Key words: resonant electric steering drive, actuating motor, thermal model.

Бондарчук Павел Степанович – ведущий инженер научно-производственного комплекса №3 казённого предприятия специального приборостроения «Арсенал», Киев, Украина, e-mail: bondpav@gmail.com.