

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС С ВЫСОКОЧАСТОТНЫМ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ДЛЯ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Абрамович Б.Н.* , Сычев Ю.А.** , Кузнецов П.А.***

*Санкт-Петербургский горный университет,
Васильевский остров, 21 линия, 2, Санкт-Петербург, 199106, Россия*

**e-mail: babramov2bn@mail.ru*

***e-mail: sychev_yura@mail.ru*

****e-mail: kuznetsovpavel@inbox.ru*

Сделан обзор преимуществ и недостатков механических коробок приводов с агрегатами, используемых в отечественных газотурбинных двигателях (ГТД); предложены схемы их модернизации с помощью высокочастотных электроприводных агрегатов. Рассмотрены математическая модель асинхронного двигателя (АФ) с двумя обмотками ротора и особенности расчета параметров схемы замещения по каталожным данным; разработана модель частотно-управляемого электропривода в системе Matlab/Simulink для модернизации существующих механических систем приводов агрегатов ГТД. Результаты моделирования сравнены с серийным двигателем.

Ключевые слова: редуктор ГТД, система приводов и агрегатов, асинхронный электропривод, высокочастотный двигатель, модернизация ГТД, компенсация гармоник, LCL-фильтр, активный фильтр.

Введение

Одной из актуальных задач современной энергетики является разработка усовершенствованных моделей электрических машин, которые обладают повышенным пусковым моментом, пониженными стартовыми токами, уменьшенными габаритами и расширенным скоростным диапазоном. Большой спрос на внедрение таких агрегатов существует в тех областях промышленности, где ранее использовались трудноуправляемые механические или пневматические системы: системы приводов газотурбинных двигателей, приводы электромобилей, оборудование горной промышленности и т.д. Анализ [1–3] показывает, что в настоящее время можно выделить ряд характеристик, которыми должны обладать проектируемые вновь и модернизируемые электрические машины. Сюда можно отнести расширение скоростного диапазона, отказ от редукторов, уменьшение массогабаритных показателей, увеличение наработки на отказ, внедрение более тщательной диагностики параметров работающих машин и уход от тенденции «работа на износ».

Асинхронный двигатель с двумя обмотками на роторе (АД с двойной «беличьей клеткой») представляет собой перспективную основу для модер-

низации. Данные агрегаты обладают повышенным пусковым моментом и пониженной величиной пускового тока [4, 5], что является актуальным для высокозагруженных сетей (бортовые сети летательных аппаратов, изолированные энергосети судов, электромобилей и тяжелой горной техники). Перерасчёт их параметров на более высокую частоту позволяет значительно снизить массогабаритные показатели и расширить скоростной диапазон, а использование частотных преобразователей и современных полупроводниковых систем контроля дает возможность внедрения частотно-управляемого электропривода вместо неуправляемых механических систем. Данные мероприятия позволяют повысить надежность модернизируемых агрегатов и увеличить их ресурс.

В статье рассматривается возможность модернизации механических систем приводов агрегатов газотурбинных двигателей путем замены их на электромеханические. Рассмотрены особенности вычисления параметров схемы замещения АД с двойной «беличьей клеткой», выполнено моделирование отдельных двигателей и готовой модернизированной системы в среде Matlab-Simulink.

Система приводов агрегатов ГТД и схемы ее модернизации

Любой газотурбинный двигатель, помимо основных модулей: компрессор, камера сгорания, турбина, имеет в своем составе множество вспомогательных систем, которые необходимы для его полноценной работы. Сюда можно отнести трубопроводы, насосы, систему смазки и суфлирования и т.д. Также практически каждый ГТД имеет в своем составе систему приводов, которая необходима для передачи мощности от ротора двигателя к различным агрегатам на рабочем режиме и для передачи мощности в обратном направлении: от стартера к ротору для его раскрутки на режиме запуска.

Строение типовой коробки авиационного двигателя [5, 6] показано на рис. 1. Она включает в себя следующие элементы: гидронасос, воздушный стартер, генератор, генератор переменного тока, топливный насос, масляный агрегат, редуктор. Все эти элементы необходимы для корректной работы ГТД.

Механическая коробка имеет ряд недостатков. К ним можно отнести повышенную массу от использования шестеренных насосов и зубчатых зацеплений, отсутствие возможности регулировать

скорость и производительность агрегатов. Например, для дозировки топлива на многих ГТД используют дроссельные заслонки. Маслоагрегаты изначально проектируются на повышенную производительность (2—3 раза) в сравнении с номинальным режимом работы, так как с набором высоты и увеличением разрежения происходит выравнивание давления. Обычно в качестве масляных и топливных агрегатов применяют шестеренные насосы с эвольвентными цилиндрическими прямозубыми шестернями. Следует отметить, что в рассматриваемом двигателе используются малогабаритные героторные насосы, что дает значительное преимущество перед старыми шестеренными моделями в связи с их более компактными габаритами, меньшей массой и повышенной производительностью. В качестве альтернативы механическим коробкам можно использовать электроприводные агрегаты и модернизировать двигатель согласно рис. 2 и 3.

Сущность метода заключается в полном отказе от коробки приводов и замене ее на электропривод с частотным управлением. Из механических частей остается лишь центральный угловой привод для раскрутки вала на старте и питания генератора

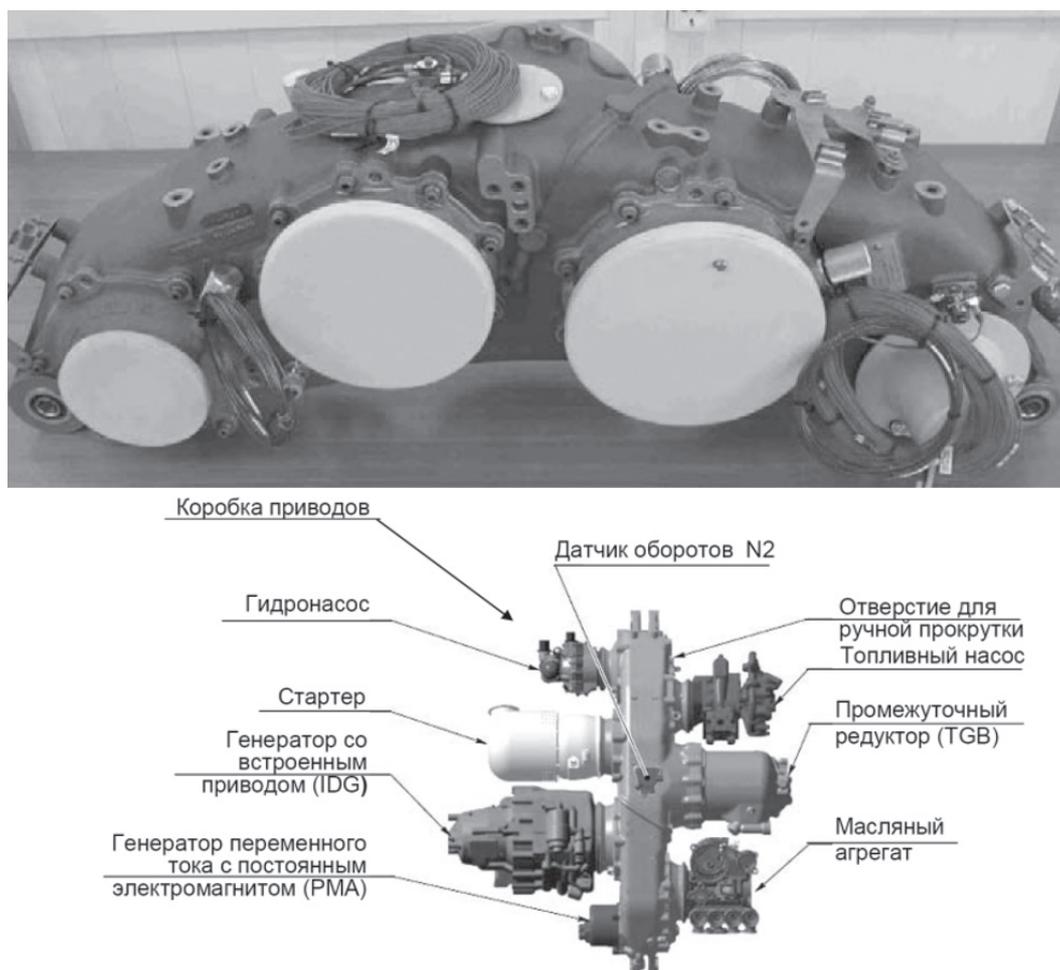


Рис. 1. Коробка агрегатов двигателя: внешний вид (вверху) и 3D-модель с агрегатами

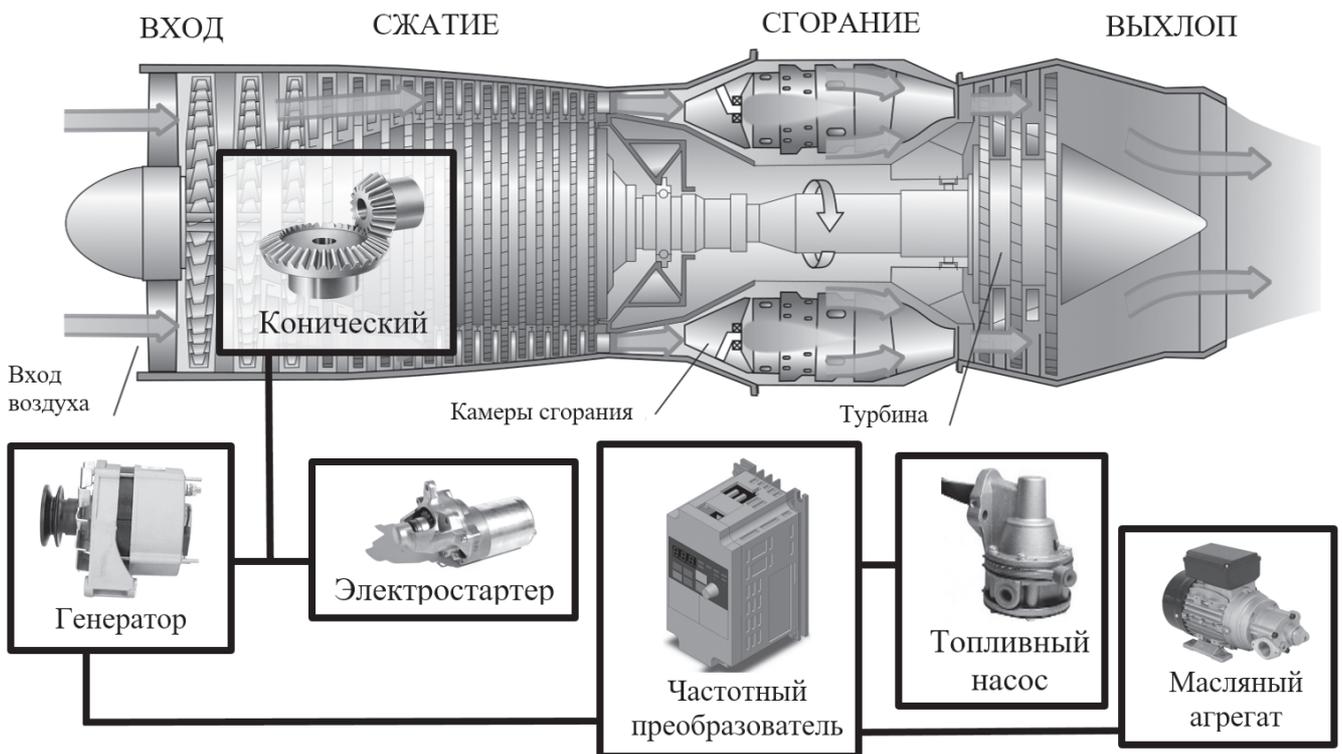


Рис. 2. Первый вариант модернизации ГТД

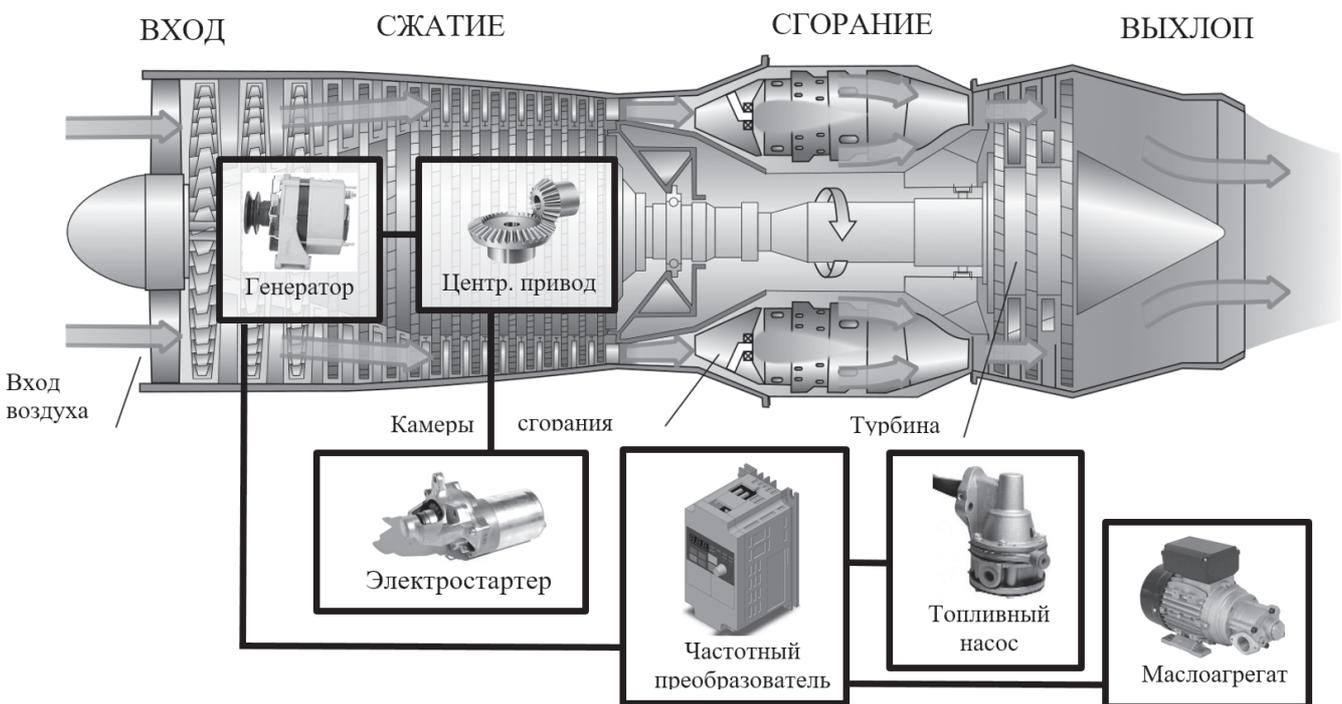


Рис. 3. Второй вариант модернизации ГТД

(рис. 2). Второй способ отличается тем, что генератор устанавливается в проточную часть компрессора низкого давления (рис. 3).

Возможен еще третий вариант модернизации, где происходит полный отказ от маслосистемы, подшипники качения заменяются на электромаг-

нитные подвесы [7], однако здесь он не рассматривается из-за сложности воспроизведения системы управления электромагнитными подвесами при высоких частотах вращения ротора ГТД (свыше 12500 об/мин).

Математическая модель асинхронной машины

В качестве математической модели вычисляемого двигателя была выбрана модель асинхронной машины с двойной «беличьей клеткой». Для улучшения пусковых характеристик асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором, а именно увеличения пускового момента и уменьшения пускового тока, на роторе применяется двойная «беличья клетка» из стержней с разными удельными проводимостями, а иногда — роторы со специальной формой паза (глубокопазные роторы). При этом внешняя от оси вращения часть паза ротора имеет меньшее сечение, чем внутренняя. Это позволяет использовать эффект вытеснения тока, за счет которого увеличивается активное сопротивление обмотки ротора при больших скольжениях (в частности, при пуске).

Главной проблемой была разработка методики быстрого вычисления параметров схемы замещения асинхронной машины с обмоткой ротора, выполненной по принципу двойная «беличья клетка». На рис. 4 показаны схемы замещения асинхронных двигателей с одной и двумя обмотками на роторе в установившемся режиме, где R_s — активное со-

Задача формулируется таким образом, что нам необходимо знать три величины (P_{mFL} — полная мощность, T_M — момент опрокидывания, Q_{FL} — реактивная электрическая мощность) для нахождения пяти параметров однообмоточной машины $R_s, R_r, X_m, X_{sd}, X_{rd}$ решением системы нелинейных уравнений формы $F(x)=0$

$$\begin{aligned} f_1(x) &= P_{mFL} - P_{m(S_{FL})} = 0; \\ f_2(x) &= Q_{FL} - Q_{(S_{FL})} = 0; \\ f_3(x) &= T_M - T_{(S_M)} = 0, \end{aligned} \tag{1}$$

где $F = (f_1, f_2, f_3)$, $x = (R_r, X_m, X_{sd})$ и равенства $R_s = k_R R_r$ и $X_{rd} = k_X X_{sd}$ принимаются во внимание. Более того, очень важно обозначить то, что все переменные всегда положительны, что означает принятие во внимание ограничивающих неравенств $R_k > 0, X_k > 0$.

В отличие от машины с одной обмоткой на роторе для двухобмоточных машин не существует

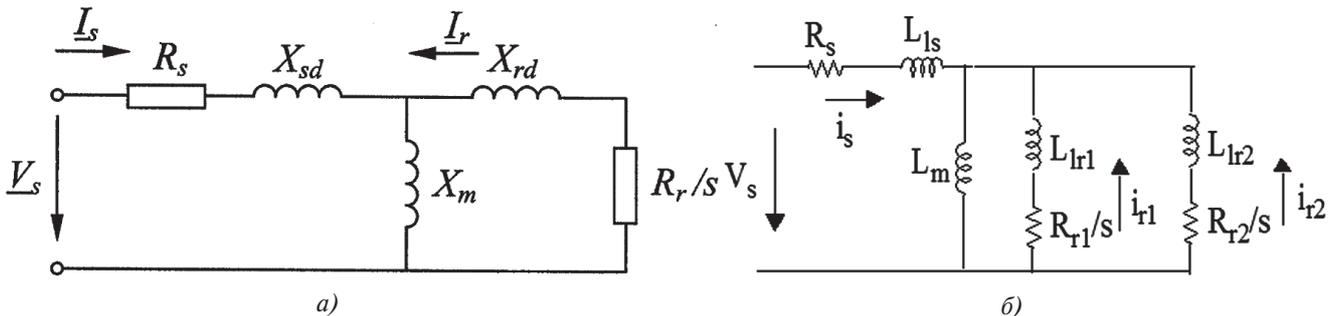


Рис. 4. Схемы замещения АД с короткозамкнутым ротором: а — с одной обмоткой на роторе; б — с двумя обмотками на роторе

противление статора, Ом или о.е.; L_{ls} — индуктивность статора, Гн или о.е.; R_{r1} — активное сопротивление обмотки ротора (внутренней), Ом или о.е.; L_{lr1} — реактивное сопротивление обмотки ротора (внутренней), Гн или о.е.; R_{r2} — активное сопротивление обмотки ротора (внешней), Ом или о.е.; L_{lr2} — индуктивное сопротивление обмотки ротора (внешней), Гн или о.е.; L_m — сопротивление магнитной индукции, в машинах с двойной «беличьей клеткой».

Изначально следует обратиться к определению параметров асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, содержащим одну обмотку на роторе, так как расчет параметров схемы замещения является отправной точкой для нахождения величин двухобмоточного двигателя.

простого уравнения для нахождения скольжения в точке максимального момента [8]. Поэтому максимальный момент может быть описан уравнением [9]

$$\frac{dT(s_M)}{ds} = 0. \tag{2}$$

В машинах с двумя обмотками на роторе очень важно применить ограничения неравенств между переменными. Главной задачей является вычисление параметров ротора, так как особенности конструкции двойной «беличьей клетки» с внешними и внутренними стержнями вносят физические ограничения на переменные.

Внутренняя клетка всегда имеет больший магнитный поток рассеяния, поэтому следует учесть неравенство $X_{1d} > X_{2d}$. Когда двигатель запускается

(ротор неподвижен), реактивное сопротивление наружной обмотки R_2 и X_{2d} преобладает над реактивным сопротивлением внутренней R_1 и X_{1d} . Отсюда вытекает еще одно неравенство $R_2 > R_1$. Еще одним равенством должно быть выражение $R_s = k_R R_1$,

так как сопротивление наружной обмотки R_2 может иметь большие значения и неправильно приравнивать его к сопротивлению обмотки статора R_s . Если же внутренняя обмотка связана со статором через сопротивление, то должно применяться ограничение $X_{2d} = k_x X_{sd}$. Здесь также целесообразно обозначить, что все величины всегда положительны: $R_k > 0, X_k > 0$.

Система уравнений составляется из пяти параметров двигателя $P_{mFL}, Q_{FL}, T_M, I_{ST}$ (пускового тока), Γ_{ST} (пускового момента).

Эти нелинейные уравнения необходимы для нахождения семи параметров схемы замещения двухобмоточного асинхронного двигателя: $R_s, R_1, R_2, X_m, X_{sd}, X_{1d}, X_{2d}$ решением системы нелинейных уравнений вида $F(x) = 0$, где

$$\begin{aligned} f_1(x) &= P_{mFL} - P_{m(s_{FL})} = 0; \\ f_2(x) &= Q_{FL} - Q_{(s_{FL})} = 0; \\ f_3(x) &= T_M - T_{(s_M)} = 0; \\ f_4(x) &= I_{ST} - I(1) = 0; \\ f_5(x) &= T_{ST} - T(1) = 0; \\ f_6(x) &= \frac{dM_{(s_M)}}{ds} = 0. \end{aligned} \tag{3}$$

Здесь $F = (f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6)$;

$$x = (R_1, R_2, X_m, X_{sd}, X_{1d}, s_M)$$

и принимаются во внимание равенства

$$R_s = k_R R_1 \text{ и } X_{2d} = k_x X_{sd}$$

и неравенства

$$R_k > 0, X_k > 0 \text{ и } R_2 > R_1, X_{1d} > X_{2d}.$$

Более того, очень важно, что все переменные всегда положительны — это означает принятие во внимание ограничивающих неравенств $R_k > 0, X_k > 0$.

В случае работы со схемой замещения, изображенной на рис. 4,б, также не существует простого

уравнения для нахождения скольжения при критическом моменте. Токи статора и ротора I_s, I_1 и I_2 с точки зрения скольжения:

$$\begin{aligned} I_s(s) &= \frac{V_s}{R_s + jX_{sd} + Z_p(s)}; \\ I_1(s) &= -\frac{Z_p(s) \cdot I_s(s)}{R_1/(s) + jX_{1d}}; \\ I_2(s) &= -\frac{Z_p(s) \cdot I_s(s)}{R_2/(s) + jX_{2d}}, \end{aligned} \tag{4}$$

где (рассматривается эквивалентная схема соединения обмоток в «звезду»)

$$\begin{aligned} V_s &= \frac{U}{\sqrt{3}}; \\ Z_p(s) &= \frac{1}{\frac{1}{jX_m} + \frac{1}{R_1/(s) + jX_{1d}} + \frac{1}{R_2/(s) + jX_{2d}}}. \end{aligned} \tag{5}$$

С точки зрения скольжения момент

$$T(s) = \frac{3p}{\omega_s} \left([I_1(s)]^2 \frac{R_1}{s} + [I_2(s)]^2 \frac{R_2}{s} \right). \tag{6}$$

Теперь можно использовать уравнения мощности, реактивной электрической мощности, критического момента, пускового тока и момента в функции нахождения ошибки:

$$\begin{aligned} P_m(s_{FL}) &= T(s_{FL}) \frac{\omega_s}{p} (1 - s_{FL}); \\ Q(s_{FL}) &= 3 \operatorname{Im} \{ V_s \cdot [I_s](s_{FL})^* \}; \\ T(s_{FL}) &= \frac{3p}{\omega_s} \left([I_1(s_M)]^2 \frac{R_1}{s_M} + [I_2(s_M)]^2 \frac{R_2}{s_M} \right); \\ I_s(1) &= \frac{V_s}{R_s + jX_{sd} + Z_p(1)}; \\ T(1) &= \frac{3p}{\omega_s} \left([I_1(1)]^2 \frac{R_1}{1} + [I_2(1)]^2 R_1 \right). \end{aligned} \tag{7}$$

Данная задача решается в программном пакете Matlab-Simulink.

$$\begin{aligned} f_1(x) &= \frac{T_n - T(s_n)}{T_n}; \quad f_2(x) = \frac{I_n - I(s_n)}{I_n}; \\ f_3(x) &= \frac{pf - pf(s_n)}{pf}; \quad f_4(x) = \frac{I_{st} - I(1)}{I_{st}}; \end{aligned} \tag{8}$$

$$f_5(x) = \frac{T_{br} - T(s_{br})}{T_{br}}; \quad f_6(x) = \frac{T_{st} - T(1)}{T_{st}}$$

где $f = (f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6)$;

$$x = (R_s, L_m, R_{r1}, L_{lr1}, R_{r2}, L_{lr2});$$

$$X_{2d} = X_{sd};$$

параметр L_{Is} получается при допущении, что индуктивности статора и наружной обмотки ротора равны ($L_{Is} = L_{lr2}$); S_n и s_{br} — скольжение при номинальном и критическом моментах соответственно [10, 11]; T_n — номинальный момент, I_n — номинальный ток, p_f — номинальная частота, I_{st} — пусковой ток, I_{br} — ток в момент опрокидывания, T_{st} — пусковой момент — это паспортные параметры двигателя, которые поставляются вместе с ним и обычно напечатаны на табличке; используемые ограничения для неравенств: $R_2 > R_1$ и $X_{1d} > X_{2d}$, все остальные параметры также определяются положительными: $R_k > 0$ и $X_k > 0$ и могут быть легко включены в уравнения подстановкой переменных:

$$\left. \begin{matrix} x_1 = R_1 \\ x_2 = R_2 - R_1 \\ x_3 = X_m \\ x_4 = X_{sd} \\ x_5 = X_{1d} - X_{2d} = X_{1d} - X_{sd} \\ x_6 = R_{FM} \end{matrix} \right\} \Rightarrow \left. \begin{matrix} R_1 = x_1 \\ R_2 = x_1 + x_2 \\ X_m = x_3 \\ X_{sd} = X_{2d} = x_4 \\ X_{1d} = x_4 + x_5 \\ R_{FM} = x_6 \end{matrix} \right\} \quad (9)$$

Необходимо также применить условие $x_k \geq 0$ с использованием абсолютных значений переменных на входе функции:

$$F(|x_1, x_2|, |x_3|, |x_4, x_5, x_6|) = 0. \quad (10)$$

Для решения нелинейных уравнений используется функция `lsqnonlin`. Она основана на нелиней-

ном алгоритме наименьших квадратов и возвращает решение x , которое уменьшает $f(x)$.

Моделирование высокочастотного электропривода в MATLAB/SIMULINK

Для расчета характеристик асинхронной машины был выбран программный комплекс Matlab/Simulink, в частности библиотека SimPowerSystems [12]. В качестве исследуемой модели взят асинхронный электродвигатель мощностью 10 кВт с регулировкой скорости через частотный преобразователь. В качестве метода управления было выбрано **скалярное управление**: сигнал определенного соотношения напряжение/частота (U/f) подается на клеммы электродвигателя, и это соотношение сохраняется постоянным во всем диапазоне частот, для того чтобы сохранить постоянным поток намагничивания электродвигателя (рис. 5) [13,14]. Скалярное управление обычно используется, когда нет необходимости быстрого реагирования на изменения задания крутящего момента и скорости, в частности, когда одним преобразователем регулируется скорость вращения нескольких подключенных к нему электродвигателей. Данные положения подходят под условия эксплуатации агрегатов ГТД.

Исследуемая модель состоит из следующих элементов: трехфазного источника напряжения, выпрямителя, фильтра постоянного напряжения, инвертора, фильтра переменного напряжения, измерительного комплекса, асинхронного двигателя, функции пусковой характеристики, блока с осциллографами и преобразователями, генератора опорного напряжения, регулятора напряжения, генератора импульсов (ШИМ-генератора).

Изначально трехфазное напряжение 380 В, 50 Гц подается на вход преобразователя, где выпрямляется с помощью диодного моста. Далее выпрямленное напряжение сглаживается LC-фильтром, после чего попадает на вход инвертора, который выдает импульсы частотой 800 Гц. Затем напряже-

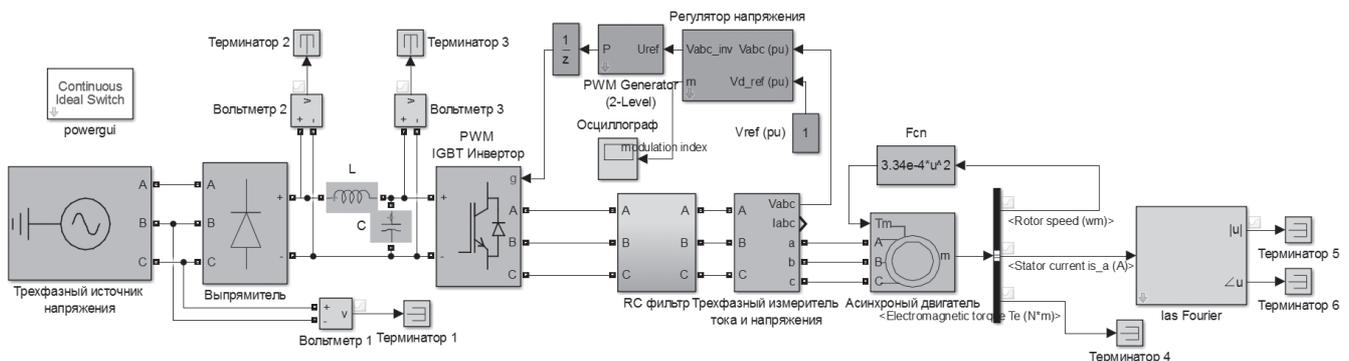


Рис. 5. Модель преобразователя частоты с асинхронным двигателем в Simulink

ние проходит через второй фильтр и измерительный комплекс и поступает на вход асинхронного двигателя. Выходные параметры двигателя регистрируются осциллографами через преобразователи, которые представляют собой звенья Фурье, настроенные на необходимую частоту.

На рис. 6 показана возможная структура модифицированной коробки агрегатов ГТД. Преобразователь питает два электропривода: для топливного насоса и для комбинированного масляного. Синхронный генератор выдает напряжение на инвертор.

условиях быстро изменяющейся, резкопеременной нагрузки, но при этом должны иметь быстрый и точный отклик [19, 20]. Рассматриваемые фильтры позволяют избежать проблем с насыщением индукторов путем точного «точечного» вычисления пульсаций токов таким образом, что токи на стороне преобразователя имеют значения, не превосходящие величины токов насыщения индуктора. Подробнее методологии проектирования LCL-фильтров описаны в [21–23].

С измерительного комплекса данные о текущем напряжении подаются на ШИМ-генератор, кото-

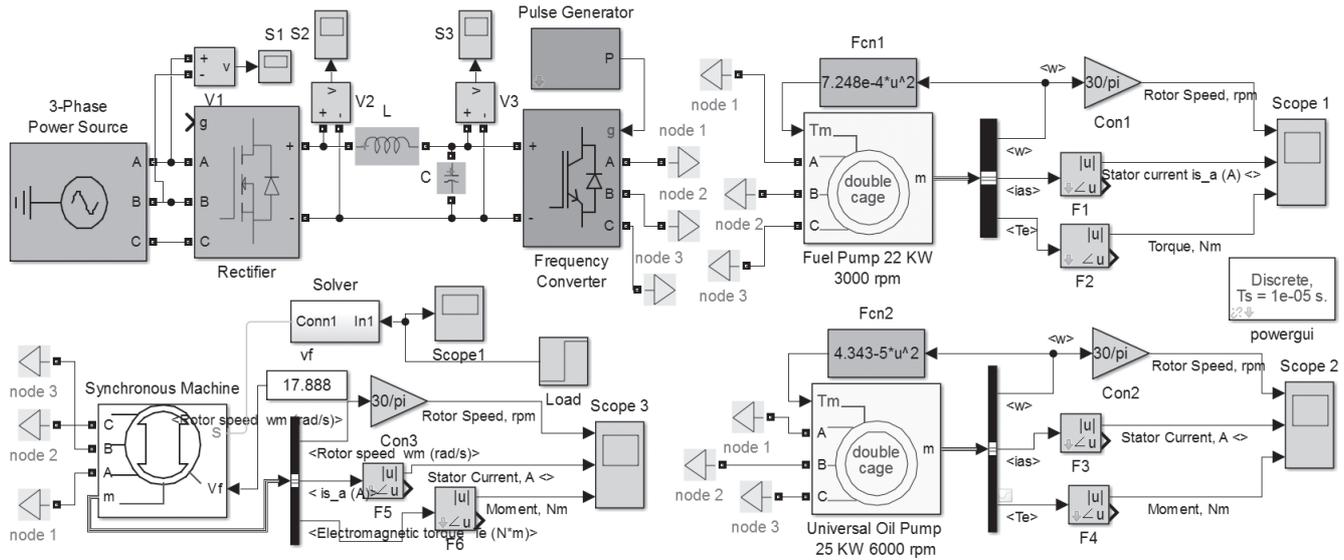


Рис. 6. Модель модифицированной коробки агрегатов в Simulink

Любой преобразователь частоты является нелинейной нагрузкой, которая дополнительно вносит в сеть помехи в виде компонент токов высших гармоник [15]. Различные способы уменьшения их влияния на нормальные режимы работы и потребителей электроэнергии рассматриваются, к примеру, в [16, 17]. Модель, изображенная на рис. 5 и 6, имеет в своей структуре обычный LC-фильтр для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения и RC-фильтр для устранения гармонических компонент [18]. Тем не менее, принимая во внимание новые эффективные методы по селективной компенсации высших гармоник, модель на рис. 6 можно было оснастить пассивными LCL-фильтрами, которые отлично справляются с компенсацией гармонических помех при больших изменениях параметров питающей (здесь может быть принято во внимание влияние от бортовой аппаратуры самолета или системы собственных нужд наземной электростанции). Данные фильтры особенно актуальны для применения в системах с частотно-регулируемым электроприводом, которые работают в

рый управляет открытием и закрытием ключей инвертора. Он работает по разомкнутому циклу и генерирует импульсы непрерывно. Импульсы управления создаются по одному из распространенных способов: напряжение на выходе сравнивается с опорным сигналом треугольной формы. Линейное напряжение на выходе в данном случае является функцией постоянного напряжения на входе и индекса модуляции m :

$$U_{Л} = \frac{m}{2} \cdot \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \cdot U_{\text{пост}} \tag{11}$$

Управление производится без обратной связи, и точность поддержания скорости является функцией скольжения двигателя, которое зависит от нагрузки, так как частота накладывается на обмотке статора. Для того чтобы улучшить производительность двигателя на низких скоростях, некоторые приводы используют специальные функции, такие как компенсация скольжения (ослабление изменения скорости как функции нагрузки) и повышение

крутящего момента (увеличение коэффициента U/f для компенсации падения напряжения на статоре), так что крутящий момент мотора поддерживается постоянным. Этот тип управления самый распространенный благодаря своей простоте, а также тому, что большинство приложений не требуют высокой точности или быстрого изменения скорости [24, 25].

Результаты моделирования

Для сравнения результатов работы высокочастотных двигателей с серийным аналогом выбран двигатель 4A132M2У3. Его параметры были пересчитаны для 400 и 800 Гц с сохранением синхронной частоты вращения 3000 об/мин. На рис. 7–10 представлены графики скорости, токов статора и ротора, электромагнитного момента. Вер-

хний график принадлежит двигателю 50 Гц, средний — 400 Гц и самый нижний — 800 Гц. Полученные параметры были сведены в таблицу.

Из полученных зависимостей (рис. 7) видно, что серийный двигатель 50 Гц имеет колебания скорости в моменты запуска и при подключении нагрузки. Также можно отметить большую просадку скорости вследствие увеличенного скольжения. Переходные процессы у высокочастотных двигателей протекают в два и более раз быстрее (0,4 с у 50 Гц двигателя; 0,2 с у 400 Гц и 0,18 с у 800 Гц). Меньшее время переходного процесса означает уменьшение тепловых потерь при изменении нагрузки или скорости вращения двигателя.

Рис. 8 показывает, что токи статора высокочастотных двигателей не имеют пульсаций и колебаний. Во время переходных процессов и при под-

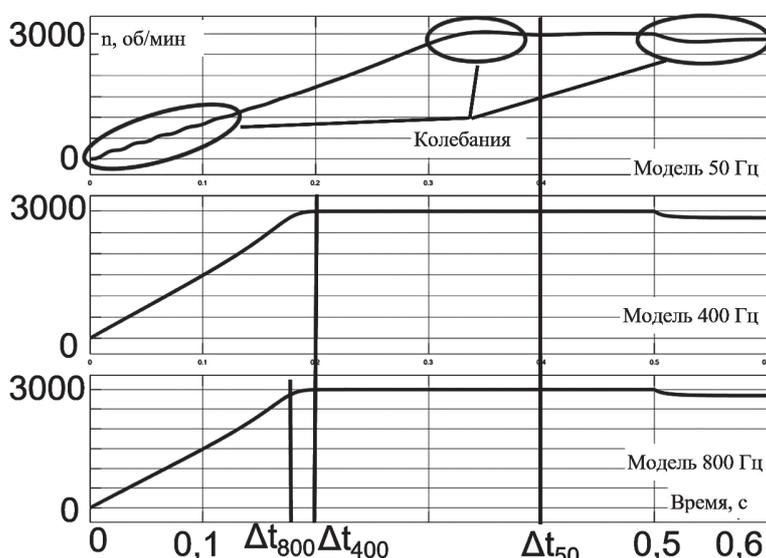


Рис. 7. Графики скорости двигателей

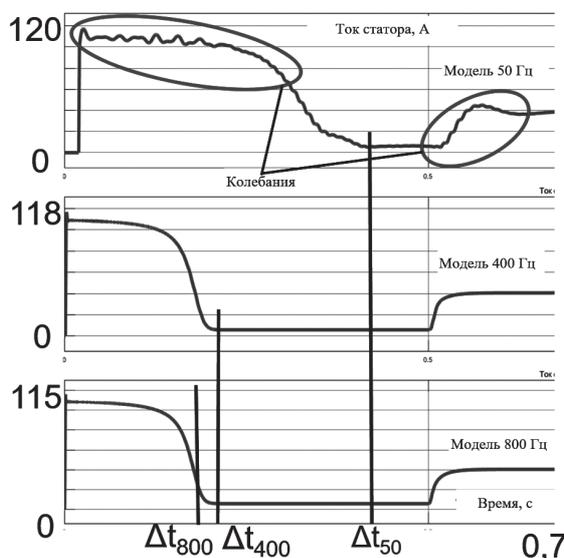


Рис. 8. Графики токов статора

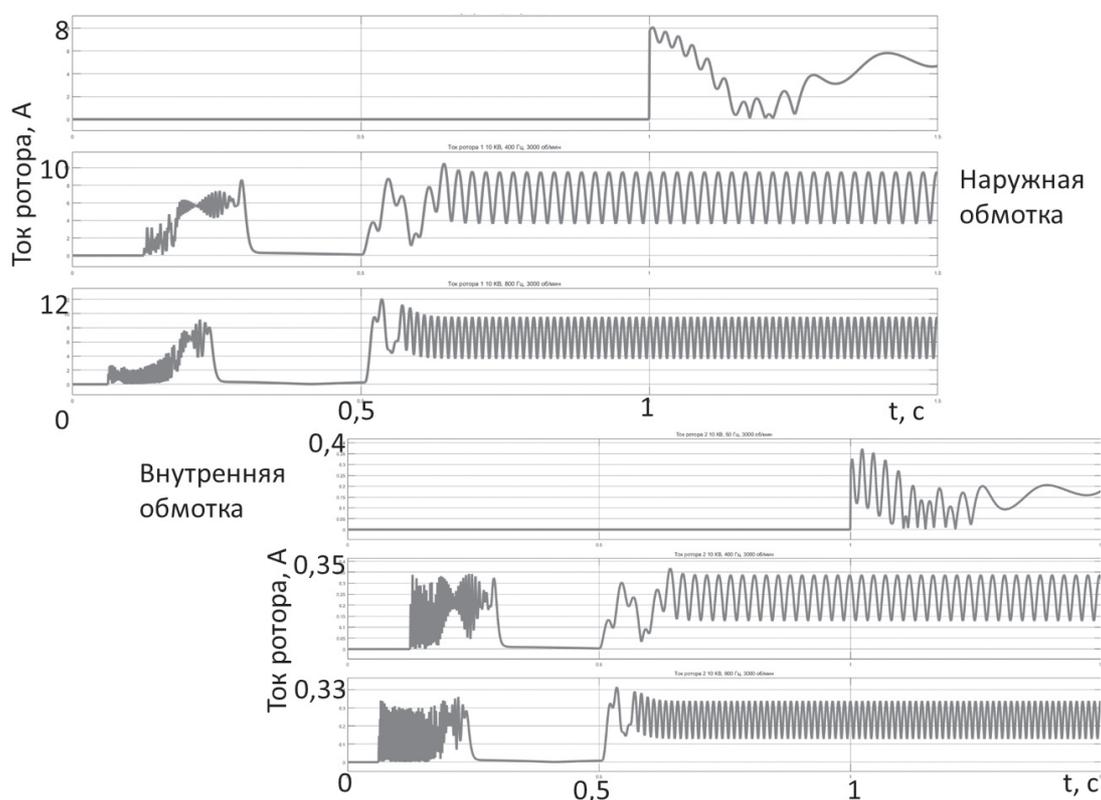


Рис. 9. Графики токов ротора

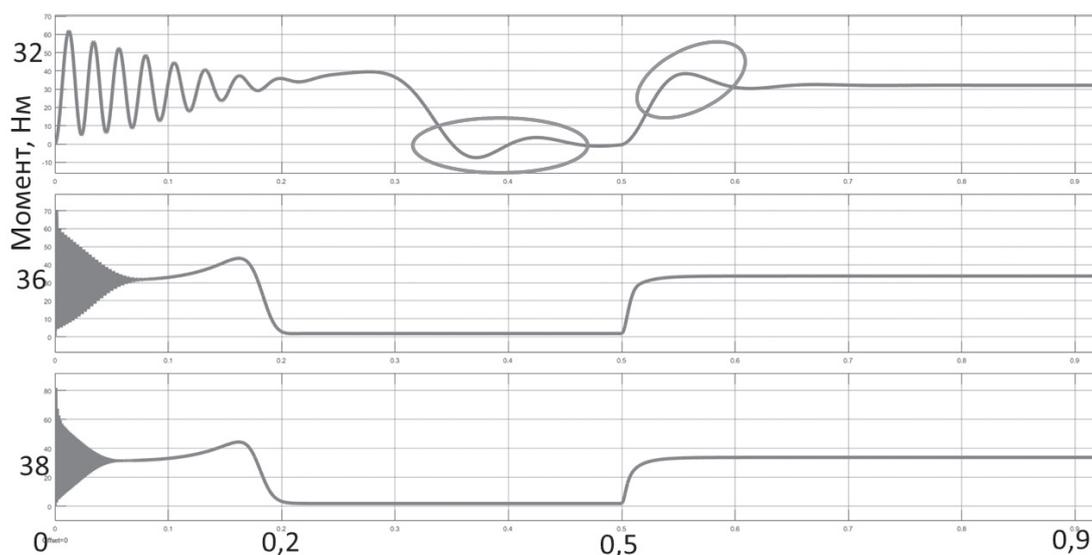


Рис. 10. Графики электромагнитного момента

Результаты моделирования работы двигателей

Параметр	Модель двигателя		
	4A132M2У3	Прототип 400 Гц	Прототип 800 Гц
Время переходного процесса, с	0,4	0,2	0,18
Токи обмоток ротора, А	8	10	12
	0,4	0,35	0,33
Рабочий момент, Нм	32	36	38
Пусковой ток, А	120	118	115

ключении нагрузки практически полностью отсутствует перерегулирование. Пиковые значения пусковых токов у двигателя 800 Гц примерно на 6% ниже, чем у серийного аналога. Это особенно актуально при прямом пуске двигателей в перегруженных сетях [26, 27], где значительные броски пусковых токов могут вызывать просадки напряжения, и, как следствие, остановку всех работающих электродвигателей. Уменьшение токов статора приводит также к снижению тепловых потерь в обмотках и увеличивает срок службы изоляции.

С увеличением частоты и индуктивности токи ротора высокочастотных двигателей растут, их превышение составляет 50% для 800 Гц модели. Данные потери можно скомпенсировать использованием новых электромагнитных сталей с улучшенной кривой гистерезиса (рис. 9).

Электромагнитный момент высокочастотного двигателя остается стабильным, в отличие от момента серийного двигателя; отсутствуют также скачки и перерегулировка. Помимо этого, небольшие корректировки соотношения U/f в частотном регуляторе позволяют получить 20% увеличения момента на валу двигателя для модели 800 Гц (рис. 10).

Таблица результатов выполненных расчетов и моделирования демонстрирует лучшие показатели в рабочих характеристиках высокочастотных электрических машин в сравнении с серийными аналогами. Помимо этого, увеличение частоты позволяет значительно сократить габариты и массу самих двигателей. По предварительной оценке, экономия массогабаритных показателей может достигать 40% у моделей 400 Гц и 60% у моделей 800 Гц. Чем больше мощность проектируемого двигателя, тем больше экономия. Более того, становится возможным расширение скоростного диапазона двигателей от 3000 об/мин для 50 Гц серийных моделей до 24000 об/мин у 400 Гц и до 48000 об/мин у 800 Гц. Это позволяет расширить диапазон их регулирования без потерь (рис. 11).

Отношение U/f остается константой до достижения двигателем номинальной скорости. Это про-

исходит при базовой частоте (50 Гц у серийных машин). Выше этой частоты напряжение остается неизменным, а частота может увеличиваться (рис. 11, а). Область выше базовой частоты является областью ослабления поля, в которой поток уменьшается в результате увеличения частоты, что приводит к уменьшению крутящего момента двигателя (рис. 11, б). Получается, что крутящий момент остается постоянным до базовой частоты, а при превышении этой частоты он начинает падать (действует ослабление поля). Поскольку выходная мощность пропорциональна крутящему моменту, умноженному на скорость, она растет линейно до базовой частоты, а выше этой частоты остается постоянной (рис. 11, в).

Выводы

На примере системы механических приводов авиационного ГТД разработаны две возможные схемы модернизации с использованием агрегатов, имеющих частотно-управляемый электропривод с высокочастотными двигателями для снижения массы, улучшения регулировочных, рабочих характеристик и повышения надежности.

В статье рассмотрена проблема расчета параметров схемы замещения асинхронной машины с двойной «беличьей клеткой» для моделирования ее характеристик в среде Matlab/Simulink по каталожным данным. Были проанализированы высокочастотные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором, рассчитанные на частотный диапазон работы 400...800 Гц. Рассмотрен расчет параметров схемы замещения для анализа характеристик на основе каталожных данных в среде Matlab/Simulink. Рабочие характеристики высокочастотных двигателей сравнены с параметрами серийных аналогов, проектируемых на частоту 50 Гц. Также рассмотрены основополагающие принципы частотного регулирования для высокоскоростных двигателей и показаны преимущества расширения частотного диапазона их работы. Создана модель модифицированной коробки агрегатов в среде Matlab/Simulink. Рассмотрена возможность применения новых типов



Рис. 11. Зависимости напряжения момента и мощности от частоты двигателя при управлении через преобразователь частоты

фильтров для компенсации гармонических составляющих токов, генерируемых частотными преобразователями.

Исследование выполнено в рамках НИР

по теме «Разработка контроллера состояния энергосети с функцией предотвращения аварийных веерных отключений» по Договору (Соглашению) № 11036ГУ/2016 от 13.02.2017»

с Фондом содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере.

Библиографический список

- International Energy Outlook 2016. — EIA U.S. Energy Information Administration. Forrestal Building, Washington DC 20585, USA, 2016, 290 p.
- Макаров В.Г. Актуальные проблемы асинхронного электропривода и методы их решения // Вестник Казанского технологического университета. 2011. № 6. С. 79-92.
- Винницкий Ю.Д., Шакарян Ю.Г. Мировые тенденции развития современного электромашиностроения в 2014 — 2015 гг. // Энергия единой сети. 2016. № 3(26). С. 14-28.
- Мачулин П.С. Современные проблемы разработки электропривода // Молодой ученый. 2016. № 10(114). С. 273-275.
- Матвеев Г.П., Колюхов Г.М., Лысенко А.И. Газотурбинный двигатель для региональных самолетов SaM-146. Общие положения. Ч. 1. — Рыбинск: РМП, 2009. С. 72-74.
- Киселев Ю.В., Киселев Д.Ю. Двигатель SaM-146. Устройство основных узлов: Электрон. учеб. пособие. — Самара: Изд-во СГАУ, 2012. С. 36-39.
- Лебедев М.В., Кикоть Н.В., Буров М.Н. Возможность применения активных магнитных подшипников в опорах роторов двухконтурного ГТД // Перспективные направления развития авиадвигателестроения: Климовские чтения — 2016. — Санкт-Петербург, 2016. С. 75-81.
- Pedra J., Corcoles F. Estimation of induction motor double-cage model parameters from manufacturers data // IEEE Transactions on Energy Conversion. 2004. Vol. 19. No. 2, pp. 310-317. DOI: 10.1109/TEC.2003.822314
- Pedra J. On the Determination of Induction Motor Parameters From Manufacturer Data for Electromagnetic Transient Programs // IEEE Transactions on Power Systems. 2008. Vol. 23. No. 4, pp. 1709-1718. DOI: 10.1109/TPWRS.2008.2002293
- Singh M.K., Chauhan M., Singhal A.K., Saxena N. A Methodology to Develop a Simulink Model of Three Phase Induction Motor // International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. 2014. Vol. 4. Special Issue 1, pp. 93-97.
- Кузнецов П.А., Лисицин А.Н. Применение высокочастотных электроагрегатов в структуре наземных и авиационных ГТД // Сборник докладов LXIV научно-технической сессии по проблемам газовых турбин и парогазовых установок «Фундаментальные проблемы применения современных ГТУ в отечественной экономике — результаты освоения и эксплуатации и задачи на будущее» (Казань, 12-15 сентября 2017). С. 110-114.
- Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в Matlab, SimPowerSystems и Simulink. — М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. — 288 с.
- Чепкунов Р.А. Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя по паспортным данным при вводе в эксплуатацию асинхронного электропривода // Інженерні та освітні технології в електротехнічних і комп'ютерних системах. 2013. № 4. С. 56-62.
- Soong W.L., Kliman G.B., Johnson R.N., White R.A., Miller J.E. Novel high-speed induction motor for a commercial centrifugal compressor // IEEE Transactions on Industry Applications. 2000. Vol. 36. No. 3, pp. 706-713. DOI: 10.1109/28.845043
- Абрамович Б.Н., Устинов Д.А., Сычев Ю.А., Шклярский А.Я. Методы компенсации провалов и искажений напряжения в электрических сетях нефтедобывающих предприятий // Нефтяное хозяйство. 2014. № 8. С. 110-112.
- Кузнецов П.А., Степанов О.А. Комплексная система защиты потребителей электроэнергии от аварийных режимов работы // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. № 4. С. 145-154.
- Кузнецов П.А., Степанов О.А. Применение автоматических систем компенсации реактивной мощности для предотвращения веерных отключений // Вестник Московского авиационного института. 2017. Т. 24. № 2. С. 157-163.
- Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А., Мингазов А.С., Полищук В.В. О компенсации высших гармоник тока и напряжения, создаваемых источником бесперебойного питания // Нефтяное хозяйство. 2013. № 10. С. 126-127.
- Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А. Интеллектуальная система комплексного мониторинга использования энергоресурсов и контроля уровня качества электрической энергии в условиях распределенной генерации на основе альтернативных и возобновляемых источников энергии // Промышленная энергетика. 2014. № 12. С. 40-44.
- Абрамович Б.Н., Лозовский С.Е., Тарасов Д.М., Сычев Ю.А., Загривный Я.Э. Комплекс автоматической минимизации искажений кривых тока и напряжения в сетях предприятий цветной металлургии // Цветные металлы. 2008. № 12. С. 72-76.
- Said-Romdhane M.B., Naouar M.W., Belkhdja I.S., Monmansson E. An improved LCL filter design in order to ensure stability without damping and despite large grid impedance variations // Energies. 2017. Vol. 10, 19 p. DOI: 10.3390/en10030336
- Monroy-Morales J.L., Campos-Gaona D., Hernández-Ángeles M., Pena-Alzola R., Guardado-Zavala J.L. An active power filter based on a three-level inverter and 3D-SVPWM for selective harmonic and reactive

- compensation // *Energies*. 2017. Vol. 10, 23 p. DOI: 10.3390/en10030297
23. Akagi H., Watanabe E.H., Aredes M. *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*. — IEEE Press on Power Engineering. Wiley-Interscience, A John Wiley & Sons Inc., 2007. — 389 p.
 24. Асинхронные электродвигатели, управляемые от преобразователя частоты. Техническое руководство компании WEG, 2013. URL: http://www.weg.kiev.ua/pdf/WEG_elektrodv_upravl_ot_preobr_chastoty.pdf
 25. Кузнецов П.А., Луцицин А.Н., Коршунов П.В. Разработка модели электроприводного наземного ГТД // Международный форум-конкурс «Проблемы недропользования»: Сборник научных трудов. — СПб.: Санкт-Петербургский Горный университет, 2017. Часть II. С. 207-208.
 26. Teubner B.G. Ulrich Riefenstahl *Elektrische Antriebssysteme: Grundlagen, Komponenten, Regelverfahren, Bewegungssteuerung*. — Verlag/GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden. 2006. — 458 s.
 27. Schröder D. *Elektrische Antriebe — Regelung von Antriebssystemen*. — Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. 2009. — 1358 s.

ELECTROMECHANICAL COMPLEX WITH HIGH-FREQUENCY INDUCTION DRIVE FOR GAS-TURBINE ENGINE

Abramovich B.N.* , Sychev Yu.A. , Kuznetsov P.A.*****

*Saint-Petersburg Mining University,
2, Vasil'evskii ostrov, 21st Line, Saint-Petersburg, 199106, Russia*

* e-mail: babramov2bn@mail.ru

** e-mail: sychev_yura@mail.ru

*** e-mail: kuznetsovpavel@inbox.ru

Abstract

The main issue of this article is modeling and reviewing of the possibilities of high-speed induction motors to modernize conventional and newly developed technical solutions.

The performed analysis reveals that by the year 2050 electrical energy production and consumption will practically double relative to 2015. Electric drive is one of its key consumers, and induction motors as the main motors. In this regard, presently the issue of meeting the rapidly developing industry requirements for developing highly effective reliable models capable of operating under conditions of drastically changing load arises.

The prospective arrangement to be modernized with such electric drive is a gearbox of a gas turbine engine. Difficultly controlled and tightly coupled with gearing-system, the pumps can be substituted by their lightweight, small-sized analogs in the form of electric drives. The authors offer two possible structures of modernization of various degree of complexity.

The induction motor modeling is complicated by computing parameters of its equivalent scheme. The article presents the review of the key values hard to calculate, and simplifications description, which were assumed while those parameters computing. The induction squirrel-cage motor with two rotor windings was selected as the basic model.

Two models for studying characteristics of high-speed motors were developed with MATLAB-Simulink.

The first model simulates the motor with frequency regulator, and the second one is finished electrically driven gearbox of gas turbine engine aggregates. The problems of harmonic components generation by frequency converters are considered as well.

High frequency motors simulation results were compared to series-produced analog. They demonstrate the superiority of the new models compared to conventional, such as less jitter of the velocity curve, reduced inrush current, faster transients and increased torque. Comparison of variable-frequency control technique advantages with series-produced analogs was performed in the final part. The wider capabilities of the enhanced frequency range are demonstrated.

Keywords: GTE's Gearbox, high-frequency induction motors, harmonics compensation, LCL-filters, Simulink model, electric drive modernization.

References

1. *International Energy Outlook 2016*. EIA U.S. Energy Information Administration. Forrestal Building, Washington DC 20585, USA, 2016, 290 p.
2. Makarov V.G. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2011, no. 6, pp. 79-92.
3. Vinnitskii Yu.D., Shakaryan Yu.G. *Energiya edinoi seti*, 2016, no. 3(26), pp. 14-28.
4. Machulin P.S. *Molodoi uchenyi*, 2016, no. 10(114), pp. 273-275.
5. Matveenko G.P., Konyukhov G.M., Lysenko A.I. *Gazoturbinniye dvigatel' dlya regional'nykh samoletov SaM-*

146. *Obshchie polozheniya*. Rybinsk, RMP, 2009. Part 1, pp. 72-74.
6. Kiselev Yu.V., Kiselev D.Yu. *Dvigatel' SaM-146. Ustroistvo osnovnykh uzlov* (SaM-146 engine. Main units' structure), Samara, SGAU, 2012, pp. 36-39.
 7. Lebedev M.V., Kikot' N.V., Burov M.N. *Klimovskie chteniya – 2016 "Perspektivnye napravleniya razvitiya aviadvigatelestroeniya"*. *Sbornik statei*, St. Petersburg, pp. 75-81.
 8. Pedra J., Corcoles F. Estimation of induction motor double-cage model parameters from manufacturers' data. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2004, vol. 19, no. 2, pp. 310–317. DOI: 10.1109/TEC.2003.822314
 9. Pedra J. On the Determination of Induction Motor Parameters From Manufacturer Data for Electromagnetic Transient Programs. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2008, vol. 23, no. 4, pp. 1709-1718. DOI: 10.1109/TPWRS.2008.2002293
 10. Singh M.K., Chauhan M., Singhal A.K., Saxena N. A Methodology to Develop a Simulink Model of Three Phase Induction Motor. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2014, vol. 4, Special Issue 1, pp. 93-97.
 11. Kuznetsov P.A., Lisitsin A.N. *LXIV nauchno-tehnicheskaya sessiya po problemam gazovykh turbin i parogazovykh ustanovok "Fundamental'nye problemy primeneniya sovremennykh GTU v otechestvennoi ekonomike – rezul'taty osvoeniya i ekspluatatsii i zadachi na budushchee" (Kazan', 12-15 September 2017)*. *Sbornik dokladov*, pp. 110-114.
 12. Chernykh I.V. *Modelirovanie elektrotehnicheskikh ustroystv v Matlab, SimPowerSystems i Simulink* (Simulation of power units in Matlab, SimPowerSystems, and Simulink), Moscow, DMK Press, St. Petersburg, Piter, 2008, 288 p.
 13. Chepkunov R.A. *Inzhenernye i obrazovatel'nye tekhnologii v elektrotehnicheskikh i komp'yuternykh sistemakh*, 2013, no. 4, pp. 56-62.
 14. Soong W.L., Kliman G.B., Johnson R.N., White R.A., Miller J.E. Novel high-speed induction motor for a commercial centrifugal compressor. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2000, vol. 36, no. 3, pp. 706–713. DOI: 10.1109/28.845043
 15. Abramovich B.N., Ustinov D.A., Sychev Yu.A., Shklyarskii A.Ya. *Neftyanoe khozyaistvo*, 2014, no. 8, pp. 110-112.
 16. Kuznetsov P.A., Stepanov O.A. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2016, vol. 23, no. 4, pp. 145-154.
 17. Kuznetsov P.A., Stepanov O.A. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2017, vol. 24, no. 2, pp. 157-163.
 18. Abramovich B.N., Sychev Yu.A., Mingazov A.S., Polishchuk V.V. *Neftyanoe khozyaistvo*, 2013, no. 10, pp. 126-127.
 19. Abramovich B.N., Sychev Yu.A. *Promyshlennaya energetika*, 2014, no. 12, pp. 40-44.
 20. Abramovich B.N., Lozovskii S.E., Tarasov D.M., Sychev Yu.A., Zagrivnyi Ya.E. *Tsvetnye metally*, 2008, no. 12, pp. 72-76.
 21. Saïd-Romdhane M.B., Naouar M.W., Belkhdja I.S., Monmansson E. An improved LCL filter design in order to ensure stability without damping and despite large grid impedance variations. *Energies*, 2017, vol. 10, 19 p. DOI: 10.3390/en10030336
 22. Monroy-Morales J.L., Campos-Gaona D., Hernández-Ángeles M., Pena-Alzola R., Guardado-Zavala J.L. An active power filter based on a three-level inverter and 3D-SVPWM for selective harmonic and reactive compensation. *Energies*, 2017, vol. 10, 23 p. DOI: 10.3390/en10030297
 23. Akagi H., Watanabe E.H., Aredes M. *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*. IEEE Press on Power Engineering. Wiley-Interscience, A John Wiley & Sons Inc., 2007, 389 p.
 24. *Asinkhronnye elektrodvigateli, upravlyaemye ot preobrazovatelya chastoty. Tekhnicheskoe rukovodstvo kompanii WEG*, 2013, http://www.weg.kiev.ua/pdf/WEG_elektrodv_upravl_ot_preobr_chastoty.pdf
 25. Kuznetsov P.A., Lisitsin A.N., Korshunov P.V. *Mezhdunarodnyi forum-konkurs "Problemy nedropol'zovaniya"*. *Sbornik nauchnykh trudov*. St. Petersburg, Sankt-Peterburgskii Gornyi universitet, 2017. Chast' II, pp. 207-208.
 26. Teubner B.G. *Ulrich Riefenstahl Elektrische Antriebssysteme: Grundlagen, Komponenten, Regelverfahren, Bewegungssteuerung*. Verlag/GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2006, 458 s.
 27. Schröder D. *Elektrische Antriebe - Regelung von Antriebssystemen*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2009, 1358 s.