

**РАДИОТЕХНИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ
И СВЯЗЬ**

Научная статья

УДК 681.5

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=184061>

EDN: <https://www.elibrary.ru/EVRXUG>

**РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МАЛОРАЗМЕРНОГО
ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ**

Александра Аркадьевна Самотья^{1✉}, Анастасия Юрьевна Елисеева²

^{1,2}АО «ОДК-СТАР»,

Пермь, Российская Федерация

¹samotyasasha@mail.ru ✉

Аннотация. Статья посвящена разработке системы управления топливопитания малоразмерного газотурбинного двигателя (МГТД). Особую трудность в топливопитании представляют процессы запуска и перехода двигателя в различные режимы работы, такие как запуск и регулирование мощности, с учётом воздействия внешних факторов. В работе представлено описание математической модели электропривода топливного насоса, контуры управления топливного регулятора двигателя, также описание аппаратной части. В исследовании рассмотрены бездатчиковые способы оценки скорости и угла поворота ротора электропривода топливного насоса с использованием вращающейся системы координат в осях d , q и β -шаговой коммутацией с определением частоты вращения путем измерения частоты

противо-ЭДС в свободной фазе электрического двигателя. Описана бездатчиковая система векторного управления синхронным двигателем с постоянными магнитами с применением пространственно-векторной широтно-импульсной модуляцией. В реализации наблюдателя скорости предлагается использовать внутренние сигналы системы управления, которые имеют зависимость от ошибки ориентирования, для реализации запуска МГТД с малых оборотов без использования датчиков скорости и положения ротора. Приведены результаты разработанной системы управления подачи топлива малоразмерного газотурбинного двигателя, отражающие высокую эффективность и адаптивность. Проведены эксперименты подтверждающие, что предложенная система способна значительно повысить эффективность работы МГТД за счет отсутствия перепуска топлива и оптимизации работы электропривода топливного насоса.

Ключевые слова: малоразмерный газотурбинный двигатель, система автоматического управления, контуры управления МГТД, программное обеспечение, синхронный двигатель с постоянными магнитами; электропривод, векторная система управления, бездатчиковое управление

Для цитирования: Самогыя А.А., Елисеева А.Ю. Разработка системы управления малоразмерного газотурбинного двигателя // Труды МАИ. 2025. № 140. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=184061>

RADIO ENGINEERING, COMPUTER ENGINEERING, INSTRUMENTATION AND COMMUNICATIONS

Original article

DEVELOPMENT OF A CONTROL SYSTEM FOR A SMALL-SIZED GAS TURBINE ENGINE

Alexandra A. Samotya¹, Anastasia Yu. Eliseeva²

^{1,2}JSC "ODK-STAR", Perm, Russian Federation

¹samotyasasha@mail.ru

Abstract. The article is devoted to the development of a fuel supply control system for a small-sized gas turbine engine (MGTD). Of particular difficulty when feeding fuel to the combustion chamber are the processes of starting and switching the engine to various operating modes, such as starting and power control, taking into account the effects of external factors. The article presents a mathematical description of the electric motor of a fuel pump, two methods of controlling an autonomous voltage inverter are considered: vector-spatial pulse width modulation (VSM) and 6-step switching of transistors. To solve the problem of dosing a small amount of fuel, the VSM was chosen, which ensures the operation of the electric motor at low speeds without the use of speed and position sensors. The study considers sensor-free methods for estimating the speed and angle of rotation of the rotor of an electric fuel pump drive using a rotating coordinate system along the d, q axes and a 6-stage switching with speed determination by measuring the frequency of counter-EMF in the free phase of the electric drive. engine. A sensorless vector control system for a permanent magnet synchronous motor using spatial vector pulse width modulation is described. When implementing the speed observer, it is proposed to use internal control system signals that depend on the orientation error to launch the MGTD at low speeds without using speed and rotor position sensors. The results of the work of the

developed fuel supply control system for a small-sized gas turbine engine, reflecting high efficiency and adaptability, are presented. Experiments have been conducted confirming that the proposed system is capable of significantly improving the efficiency of MGTD due to the absence of fuel bypass and optimization of the operation of the electric motor of the fuel pump.

Keywords: small-size gas turbine engine, automatic control system, MGTD control circuits, software, permanent magnet synchronous motor, electric drive, vector control system, sensor-free control

For citation: Samotya A.A., Eliseeva A.Yu. Development of a control system for a small-sized gas turbine engine. *Trudy MAI*. 2025. 140. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=184061>

Введение

На сегодняшний день особый интерес вызывают беспилотные летательные аппараты (БПЛА), силовой частью которых являются малоразмерные газотурбинные двигатели (МГТД) [1] – [3]. Малоразмерные газотурбинные двигатели находят все более широкое применение в различных областях народного хозяйства. Актуальной задачей является универсальность систем управления для МГТД и не мало важным аспектом – создание «более электрических» ГТД, гибридных силовых установок с ГТД и полностью электрических двигателей самолетов, обеспечивающих нулевой выброс вредных веществ в атмосферу в процессе своей работы. Применение бездатчиковых систем управления в свою очередь обусловлено во многом повышением надежности, т.е. исключением из электромеханической системы

дополнительных элементов. В малоразмерных двигателях малой мощности бездатчиковый подход существенно снижает затраты за счет отсутствия датчиков Холла, оптических энкодеров или иных средств измерения. Применение синхронного двигателя с постоянными магнитами обуславливается его высоким КПД, малыми габаритными параметрами, высоким соотношением мощности к массе в сравнении с электрическими двигателями иных конструкций. Внедрение современных технологий, таких как системы автоматического управления и мониторинга, позволяет оптимизировать работу газотурбинных двигателей, улучшая их характеристики и надежность. Это открывает новые горизонты для их применения в различных отраслях

Целью настоящей работы является разработка системы управления топливопитания МГТД, обладающей высокой адаптивностью и гибкостью. Для достижения этой цели предлагается использовать современные методы автоматического управления.

В данной работе рассматривается новый подход к системе топливопитания малоразмерного газотурбинного двигателя МГТД, путём непосредственного дозирования топлива. Данное решение позволяет уменьшить вес и габариты дозирующего устройства за счет исключения следующих элементов: дозирующий кран, клапан постоянного перепада давления на дозирующем сечении, термокомпенсатор. Кроме того, позволяет снизить потребляемую насосом мощность в силу отсутствия перепуска избытков топлива и соответственно увеличить КПД силовой установки в целом.

Описание объекта управление (ОУ)

Современные МГТД сталкиваются с рядом проблем, связанных с необходимостью гибкого управления процессами преобразования энергии в условиях переменных нагрузок и нестабильных параметров внешней среды. Это требует создания системы управления, способной адаптироваться к изменяющимся условиям и обеспечивать максимальную эффективность работы устройства.

В данной работе приводится описание системы управления МГТД [4], а также результаты моделирования и ее реализации. Структурная схема системы управления представлена на рисунке 1. Она состоит из регулятора электропривода ТН, регулятора МГТД и самого топливного насоса. Топливопитание рассматриваемого МГТД осуществляется путём непосредственного дозирования топлива за счет изменения частоты вращения топливного насоса.

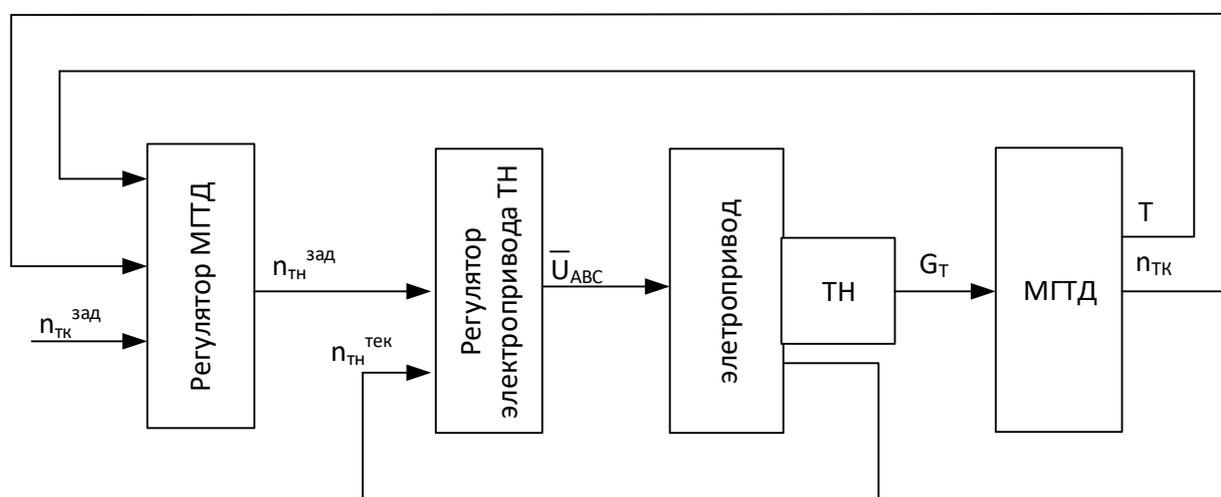


Рисунок 1 – Структурная схема системы управления ($n_{ТН}^{зад}$ – заданные обороты электропривода ТН, $n_{ТН}^{тек}$ – текущие обороты электропривода ТН, \bar{U}_{ABC} – управляющий сигнал с автономного инвертора, G_T – расход топлива, подаваемый в

КС, Т – температура выхлопных газов за турбиной, $n_{\text{тк}}^{\text{зад}}$ – заданные обороты МГТД,

$n_{\text{тк}}^{\text{тек}}$ – текущие обороты МГТД)

К системе управления электроприводом предъявляются требования по качеству регулирования скорости к основным из которых можно отнести быстродействие и диапазон регулирования.

Электроприводной топливный насос, изображенный на рисунке 2, состоит из электроприводного шестерёнчатого качающего узла и двух электромагнитных клапанов:

- первый электромагнитный клапан обеспечивает подачу топлива для розжига камеры сгорания;

- второй электромагнитный клапан обеспечивает подачу топлива при работе двигателя.

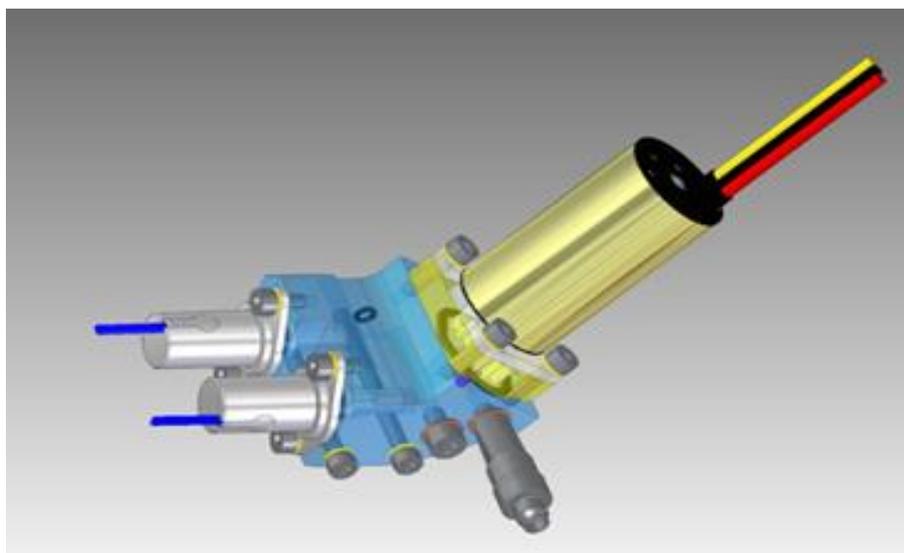


Рисунок 2 – Электроприводной топливный насос

После розжига камеры сгорания первый электромагнитный клапан отключается.

Управление клапанами системы подачи топлива и управление зажиганием осуществляется посредством генерируемого контроллером ШИМ-сигнала. Применение ШИМ-сигнала предусматривается для ограничения тока в цепях управления в режиме удержания электромагнита. Управление вращением привода насоса осуществляется посредством трехфазного инверторного моста, коммутаторов управляющих ШИМ-сигналов и генерируемых контроллером электропривода ШИМ-сигналов поступающих на автономный инвертор напряжения. Непосредственное дозирование топлива электроприводным насосом позволяет уменьшить вес и габариты дозирующего устройства за счет исключения следующих элементов: дозирующий кран, клапан постоянного перепада давления на дозирующем сечении, термокомпенсатор. Система управления МГТД, регулирующая необходимое количество топлива, позволяет снизить потребляемую насосом мощность в силу отсутствия перепуска топлива клапаном постоянного перепада давления и соответственно увеличить КПД силовой установки в целом.

Система управления электроприводом

Система управления электроприводом (ЭП) играет ключевую роль в обеспечении эффективной и безопасной работы электрического двигателя. Основной задачей системы управления ЭП [5] – [6] является поддержание оптимальных режимов работы МГТД, а именно обеспечить работу ЭП на малых скоростях, для подачи необходимого малого количества топлива на режиме запуска и необходимый

удельный момент для раскручивания ЭП, учитывая, что система выполнена бездатчиковой, что не является самой тривиальной задачей. При создании системы управления синхронного двигателя с постоянными магнитами (СДПМ) без использования датчиков существует значительный ряд трудностей. Основной принцип СДПМ построен на взаимодействии магнитного поля ротора, относительно поля статора, а именно позиционирования магнитов ротора относительно магнитов статора, чтобы магнитам начинать притягиваться к друг другу. Основное управление электрическим двигателем осуществляется силовым мостом, состоящим из шести транзисторов, находящихся на микроконтроллере ТН.

Управление автономным инвертором напряжения

С учетом необходимости реализации широкого диапазона регулирования частоты вращения электропривода система управления выполнена бездатчиковой. При бездатчиковом управлении на валу машины отсутствуют датчики положения и скорости. Применение этого способа управления требует наличия наблюдателя, который вычисляет положение ротора и его скорость [7] – [8]. Наблюдатель представляет собой математическую модель электродвигателя, входными параметрами которой являются токи в линиях электропривода.

В процессе создания системы управления электроприводным топливным насосом рассматривались 2 системы управления, 6-шаговая коммутация транзисторов с наблюдателем противо-ЭДС и бездатчиковое полеориентированное векторное управление с векторно-пространственным ШИМ (ВШИМ). Наблюдатель векторного

управления основан на оценке скорости и углового положения по наблюдаемым координатам фазных токов и напряжения ЭП.

Главным критерием в выборе принципа управления является работа электроприводного насоса на низкой частоте вращения для реализации пускового режима МГТД.

Система управления с 6-шаговой коммутацией транзисторов с наблюдателем противо-ЭДС управляет вращением привода насоса посредством трехфазного силового моста, коммутаторов управляющих сигналов и генерируемых контроллером электропривода сигналов ШИМ [9]. Коммутатор управляющих сигналов представляет собой управляемый дискретными выходами микроконтроллера мультиплексор, перенаправляющий сигналы ШИМ в одно из плеч полумоста. Силовой мост состоит из 6 полевых транзисторов. На рисунке 3 представлены сигналы включения верхних ключей. При открытии верхнего ключа нижний ключ соответственно закрывается с задержкой «мертвым временем». «Мертвое время» исключает одновременное включение верхнего и нижнего ключа. При открытом состоянии одного верхнего ключа, верхняя граница импульса, другие два верхних ключа закрыты. Сигнал имеет не исключительно импульсный характер, так как на сигнал наводится обратная ЭДС.

По изменению индуцируемого в обмотке напряжения (ЭДС) определяется положение ротора. Силовая часть системы управления определяет момент прохождения ЭДС через нуль, и включает ток в двигатель на интервал, зависящий от скорости вращения вала. Амплитуда индуцируемой ЭДС изменяется в зависимости от скорости

вращения электрического двигателя. При нулевой скорости или на низких скоростях значение этого сигнала оказывается слишком малым, из-за чего невозможно точно определить пересечение нуля. Для обеспечения коммутации без использования датчиков в электронике создана искусственная нулевая точка [10].

Данный подход имеет проблему с определением положения ротора во время запуска и малых оборотах, потому что сигналы обратной ЭДС еще не генерируются. В этом случае двигатель пытается запуститься с неизвестного положения, то есть неизвестно положение статора относительно ротора.

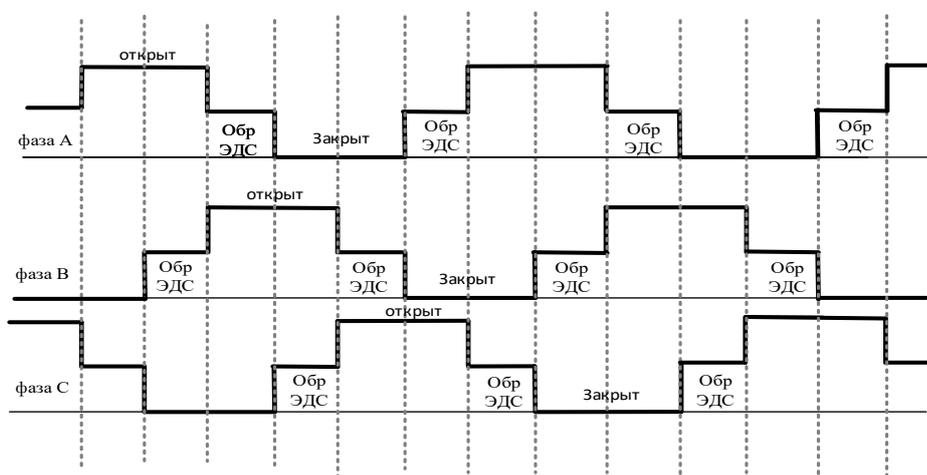


Рисунок 3 – Сигналы коммутации верхних транзисторов

Система управления с 6-шаговой коммутацией транзисторов, определяющая положение ротора на основе противо-ЭДС, неработоспособна в диапазоне низких частот вращения, где ЭДС мала. При отказе от датчиков система управления становится на ступень сложнее и имеет ряд своих особенностей [11]. Например, чувствительность электропривода к изменению параметров процесса при работе. Решение этой проблемы осуществляется с помощью построения векторных

регуляторов и наблюдателей состояний. Еще одним недостатком 6-шаговой коммутацией, является то, что для работы электродвигателя важно синхронизировать частоту приложенного напряжения с положением магнитного поля ротора, что и осуществляется с помощью режима управления без использования датчика, когда алгоритм вычисления скорости и положения заменяет показания датчика. Также, бездатчиковое векторное управление в сравнении с 6-шаговой коммутацией, позволяет взаимодействовать не только с магнитным полем статора, но и с магнитным полем ротора.

Для трёхфазного инвертора напряжения, существует восемь возможных комбинаций включения силовых ключей. Это комбинации и результирующее мгновенное междуфазное и фазное напряжения из напряжения звена постоянного тока. С учетом всех преимуществ и недостатков ВШИМ и 6-шаговой коммутацией, была выбрана пространственно-векторная модуляция, позволяющая системе управления иметь высокую эффективность и адаптивность.

Пространственная векторная широтно-импульсная модуляция формирует последовательность переключения ключей инвертора напряжения для формирования трёхфазной системы напряжений. Алгоритм пространственно-векторной широтно-импульсной модуляции формирует синусоидальные токи в статорной цепи двигателя.

Математическая модель СДПМ

Принцип работы векторной системы управления [12] – [15], основан на ориентации вектора магнитного потока Ψ СДПМ. Так как магнитный поток,

создаваемый постоянными магнитами ротора, жестко связан с положением вала ротора, положение вектора потока может быть определено по положению вала ротора (оси d). Если ток $I_d = 0$, то потокосцепление Ψ_d по оси ротора постоянно. Поскольку потокосцепление в СДПМ постоянно, электромагнитный момент M_e пропорционален току статора I_q , который определяется замкнутой системой управления. Проекция магнитного потока ротора на ось q равна нулю, в то время как вектор тока имеет проекции на обе оси d и q. Ниже представлена структурная схема разработанной математической модели (ММ) системы векторного управления (рисунок 4).

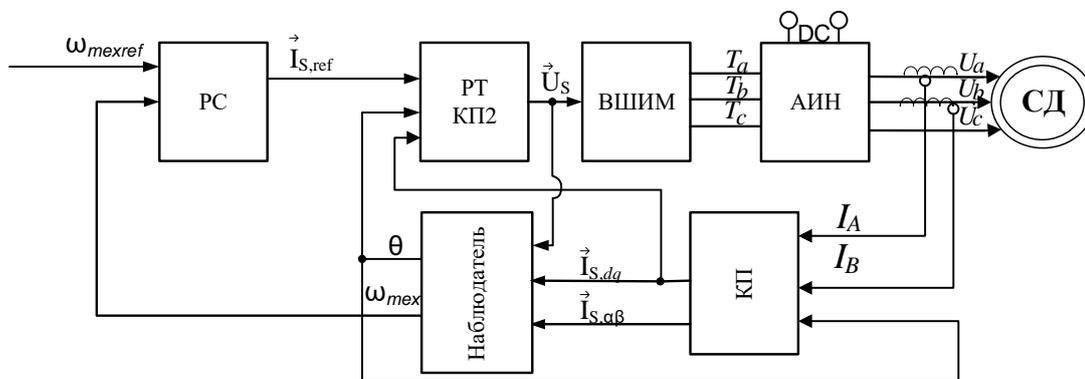


Рисунок 4 – Структурная схема ММ системы векторного управления

Приняты следующие обозначения функциональных блоков: СД – синхронный двигатель с постоянными магнитами; $\vec{I}_{s,ref}$ – вектор заданного тока представленный комплексным числом $\{I_d, I_q\}$, А. ВШИМ – векторная широтно-импульсная модуляция; АИН – автономный инвертор напряжения; КП, КП2 – координатные преобразователи; РС – регулятора скорости; РТ – регулятор тока; U_a, U_b, U_c – фазовые напряжения обмоток статора АД; $\omega_{mexref}, \omega_{mex}$ – заданное и наблюдаемое с помощью НСПЭ значение скорости СД; T_a, T_b, T_c – длительность включения верхних ключей АИН; I_a, I_b – статорные токи в обмотках фаз А и В.

При векторном управлении СД с ориентацией системы координат по вектору потокосцепления ротора имеем следующие уравнения равновесия ЭДС статора [16]:

$$\begin{cases} L_{Sd} \frac{dI_d}{dt} = U_d - R_S \cdot I_d + \omega \cdot L_{Sq} \cdot I_q \\ L_{Sq} \frac{dI_q}{dt} = U_q - R_S \cdot I_q - \omega \cdot L_{Sd} \cdot I_d - \omega \cdot \Psi_f \\ J \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{3 \cdot Z_p \cdot \Psi_f \cdot I_q}{2 \cdot J} - \frac{C \cdot \omega_r}{J} \end{cases} \quad (1)$$

где ω – электрическая скорость вращения ротора, U_d – напряжение статора по оси d, L_{Sq} – индуктивность статора по оси q, L_{Sd} – индуктивность статора по оси d, U_q – напряжение статора по оси q, I_q – ток статора по оси q, I_d – ток статора по оси d, J – момент инерции, R_S – сопротивление статор, C – коэффициент трения, Z_p – число пар полюсов двигателя.

Уравнение механической части СД можно записать в виде:

$$M_e - M_L = J \frac{d\omega_r}{dt} + C \cdot \omega_r \quad (2)$$

где M_L – нагрузочный момент на валу СД, M_e – электромагнитный момент СД.

Синтез регулятора скорости СД

При доводке регулятора скорости принимаем в качестве желаемой передаточной функции замкнутую систему регулятора скорости с частотой среза a_c Гц аperiodического характера:

$$W_{\text{жел}}(p) = \frac{\omega_r(p)}{\omega_{r,ref}(p)} \quad (3)$$

Передаточная функция объекта управления (ОУ) (его механической части) имеет следующий вид:

$$W_{OY, Mex}(p) = \frac{\omega_r(p)}{M_e - M_L} = \frac{1}{Jp + C} \quad (4)$$

Для исключения перерегулирования в структуру регулятора добавлен механизм активного демпфирования. ОУ охватывается отрицательной обратной связью с усилением R_a . С учетом активного демпфирования передаточная функция ОУ примет вид:

$$W_{OY, Mex}^{\cdot} = \frac{\omega_r(p)}{R_a} \quad (5)$$

Результат синтеза на желаемую передаточную функцию является использование ПИ-регулятора скорости.

Синтез регулятора тока СД

При настройке регулятора тока мы по-прежнему используем апериодическое звено с частотой среза α с Гц в качестве желаемой передаточной функции. Важно, чтобы частота среза тока была ниже частоты прерывания, на которой происходит считывание сигналов тока через АЦП.

Для линеаризации системы уравнений и интеграции регуляторов требуется исключить нелинейные компоненты из уравнений (1).

$$\begin{cases} U'_d = \omega_{\psi} \cdot L_{Sq} \cdot I_q \\ U'_q = \omega_{\psi} \cdot L_{Sd} \cdot I_d + \omega_{\psi} \psi_f \end{cases} \quad (6)$$

$$W_{OY, Элек}(p) = \frac{1}{L_{Sd} \cdot p + R_s} \quad (7)$$

С учетом добавленного сопротивления, которое включается в схему отрицательной обратной связи для передаточной функции (7), соотношение между током и напряжением будет выглядеть следующим образом:

$$W'_{OU, \text{Элек}}(p) = \frac{1}{L_{sd} \cdot p + R_s + R_a} \quad (8)$$

Для получения желаемой передаточной функции при синтезе регулятора тока вводим в структуру ПИ-звено. Чтобы решить проблему чрезмерного увеличения интегральной части регулятора, вызванного работой блока ограничения напряжения, интегральная составляющая контролируется с помощью отрицательной обратной связи.

Синтез наблюдателя скорости

Наблюдатель состояния основан на оценке скорости и углового положения по наблюдаемым координатам фазных токов и напряжения. Применяемый наблюдатель для вычисления скорости и положения использует внутренние сигналы системы управления, которые имеют зависимость от ошибки ориентирования. В качестве основного алгоритма управления выступает наблюдатель скорости на основе эталонной математической модели электрического двигателя.

Для реализации наблюдателя используются внутренние переменные регулятора тока. Передаточная функция (8) определяет соотношение тока и сигнала, формируемого после ПИ-звена. Любое (фазное и амплитудное) рассогласование вектора реального тока и полученного после фильтра низких частот является следствием параметрического возмущения, неточного задания параметров СДПМ, а

также ошибки вычисления и компенсации нелинейной части модели [17]. Таким образом сигнал, полученный во внутренних цепях регулятора тока, может быть использован за наблюдением ошибки ориентации координатной системы dq.

По вышеописанной структуре векторной системы управления снабжителем была создана имитационная модель. Ниже представлены переходные процессы по скорости со ступенчатым воздействием 100 рад/с (рисунок 5). Красным цветом обозначена линия, показывающая сигнал с наблюдателя w_{mex} , для сравнения с реальной скоростью модели синим цветом обозначена скорость непосредственно с имитационного двигателя w_{model} . По рисунку можно сделать вывод что наблюдатель работает правильно, имеет малое время переходного процесса.

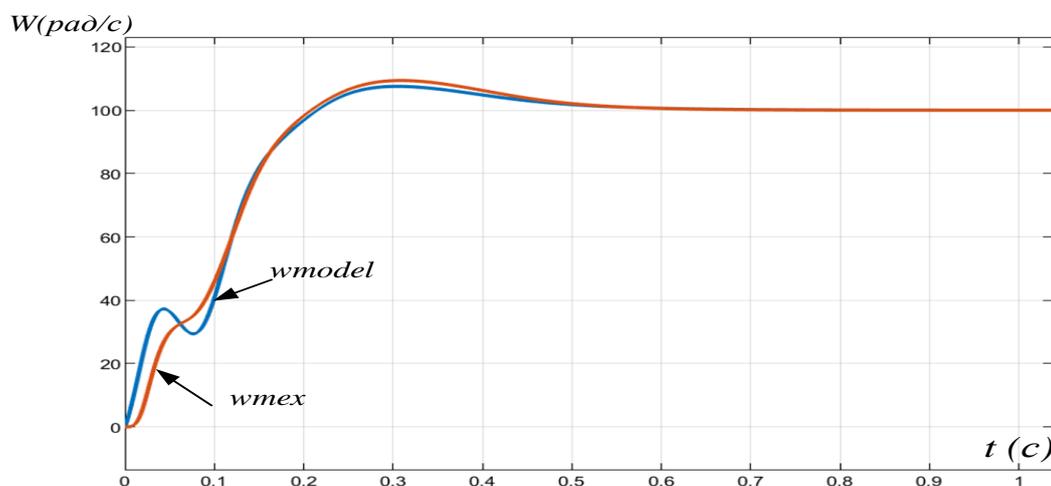


Рисунок 5 – Переходный процесс по скорости

Система управления топливопитания МГТД

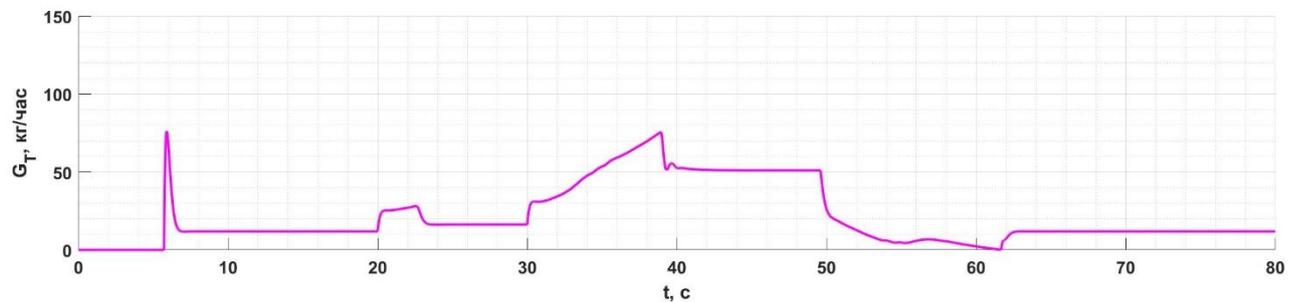
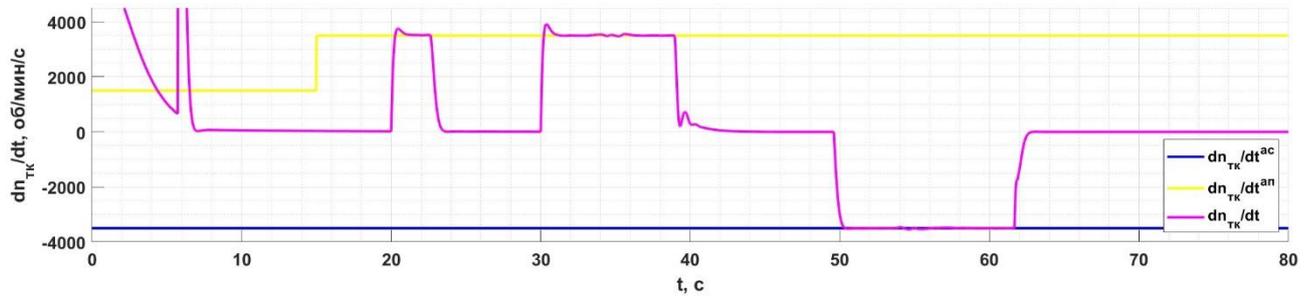
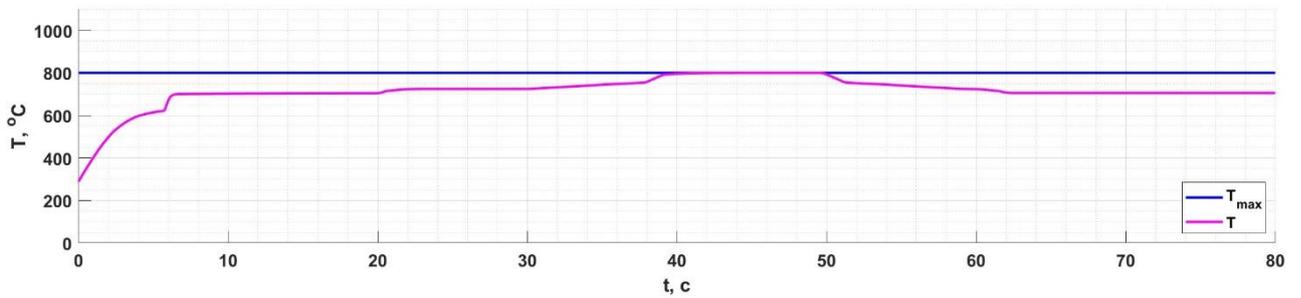
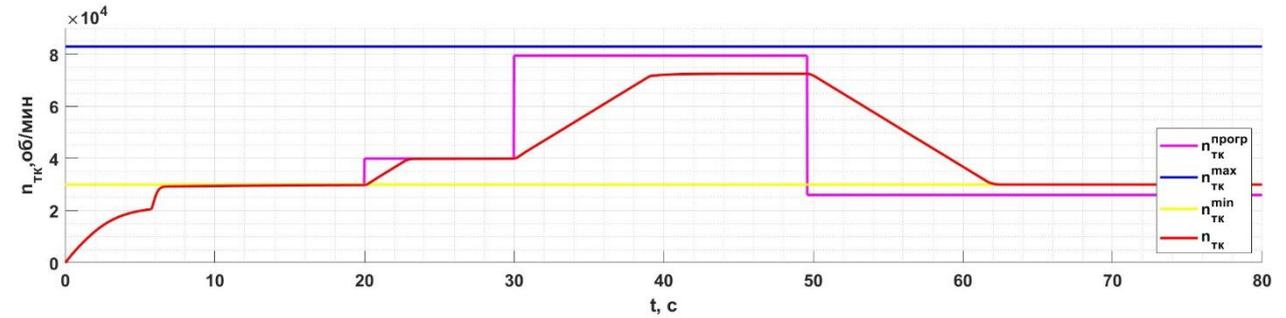
Электронная система управления двигателем МГТД разработана согласно техническому заданию и имеет следующие контура управления:

- контур управления частотой вращения ротора двигателя;
- контура ограничения максимальной и минимальной частоты вращения ротора двигателя;
- контур управления по ускорению частоты вращения ротора двигателя на запуске, приемистости и сбросе;
- контур ограничения максимальной температуры выхлопных газов за турбиной;
- контур ограничения максимального и минимального расхода топлива в камеру сгорания;
- контур управления расходом топлива по временному закону.

При выборе коэффициентов электронного регулятора исходили из необходимости обеспечения быстродействия и необходимых запасов устойчивости системы по рассматриваемым контурам.

Основной трудностью в выборе коэффициентов регулятора стало отсутствие математической модели МГТД [18] (динамических коэффициентов МГТД). Поэтому на первом этапе разработки регулятора МГТД за основу была взята ранее разработанная ММ двигателя малой мощности. Замкнутая система САУ-МГТД была реализована в среде MATLAB/Simulink [19]. В основу разработки модели положен модульный принцип. Каждый модуль описывает работу отдельного узла регулятора. Модульный принцип построения модели, характерный для среды Simulink, дает возможность оперативно вносить любые изменения.

На рисунке 6 представлены результаты моделирования запуска, приемистости и сброса. Выходим на контур ограничения максимальной температуры выхлопных газов за турбиной и контур ограничения минимальных оборотов n_{TK} .



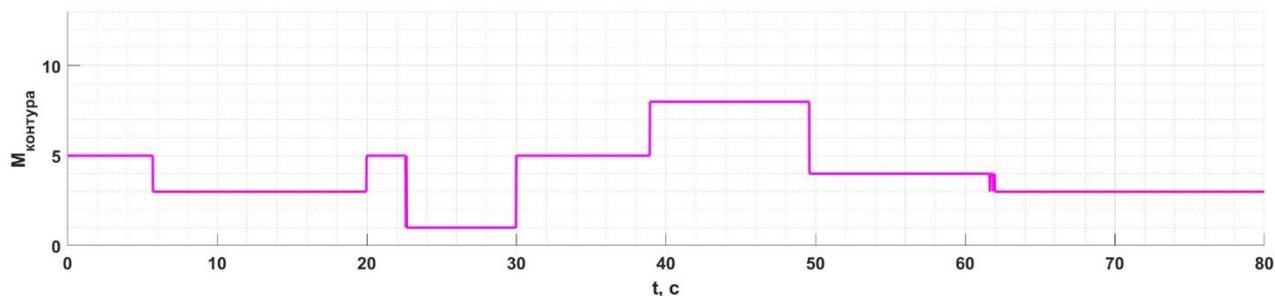


Рисунок 6 – Выход на контур ограничения максимальной температуры

(номера контуров: 1 – n_{TK} , 2 – n_{TK}^{max} , 3 – n_{TK}^{min} , 4 – \dot{n}_{TK}^{ac} , 5 – \dot{n}_{TK}^{ap} , 8 – T_{max})

На втором этапе доводка регулятора осуществлялась в составе прототипа МГТД в условиях стенда. Проводилась корректировка коэффициентов регулятора, а также настройка циклограммы запуска. Переходные процессы работы реального агрегата представлены на рисунке 7. Полученные результаты показывают корректную работу регулятора тока электропривода ТН, который ограничивает текущий ток в соответствии с заданными условиями [20]. Кроме того регулятор МГТД обеспечивает поддержание стабильного режима работы двигателя.

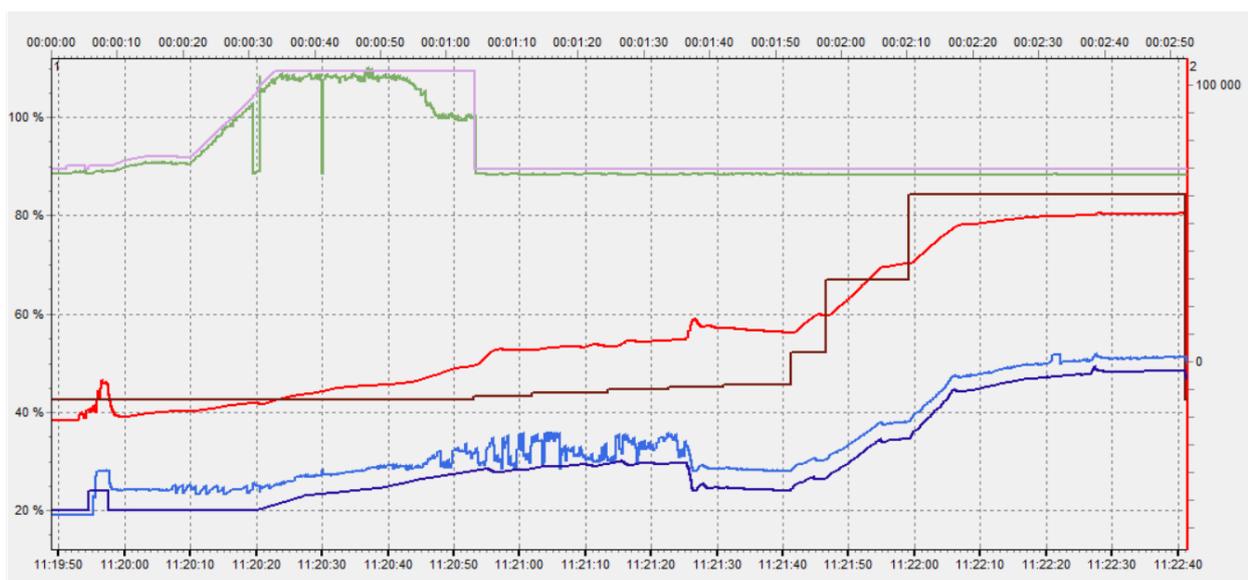


Рисунок 7 – Переходные процессы со стенда (— — заданное значение тока электропривода ТН, — — текущее значение тока электропривода ТН, — - заданные обороты МГТД, — — текущие обороты МГТД, — — заданные обороты электропривода ТН, — — текущие обороты электропривода ТН).

Результаты

Разработанная система управления топливной подачей малоразмерного газотурбинного двигателя прошла успешные испытания в лабораторных условиях, показав высокую эффективность и адаптивность. Проведенные эксперименты подтвердили, что предложенная система способна значительно повысить эффективность работы МГТД за счет отсутствия перепуска топлива и оптимизации работы электропривода топливного насоса. Кроме того, система управления продемонстрировала высокую надежность и устойчивость к изменениям внешних условий.

Выводы

В данной работе была разработана математическая модель системы управления топливной подачей малогабаритного газотурбинного двигателя, позволяющая моделировать процессы управления топливной системы и отслеживать поведение основных параметров в режиме реального времени.

Предложена архитектура системы управления подачи топлива МГТД, включающая в себя регуляторы расхода и топлива, предназначенные для поддержания заданного режима работы двигателя.

Разработана система управления электроприводом топливного насоса, обеспечивающая широкий диапазон регулирования и гарантирующая высокое качество регулирования. Проведенное моделирование работы системы управления подачи топлива МГТД подтвердило эффективность предложенных технических решений.

Заключение

Разработанная система управления топливной подачей для газотурбинного двигателя (ГТД), обеспечивает оптимальное функционирование рабочих режимом двигателя, также разработанная система гарантирует точный контроль расхода

Результаты испытаний подтверждают эффективность предложенных технических решений и обосновывают их целесообразность для внедрения в проектирование и эксплуатацию газотурбинных двигателей.

Список источников

1. Корнилов В.А., Молодяков Д.С., Синявская Ю.А. Система управления мультикоптером // Труды МАИ. 2012. № 62. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=35543>
2. Виноградов С.С. Синтез нечёткого навигационного регулятора для малоразмерного вертолёта «Раптор» // Труды МАИ. 2012. № 73. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=48562>
3. Гуревич О.С., Гулиенко А.И. Системы газотурбинного двигателя для «электрического» самолета // Климовские чтения – 2017. Перспективные

направления развития авиадвигателестроения (Санкт-Петербург, 20 октября 2017):
сборник статей. - Санкт-Петербург: Скифия-принт, 2017. С. 214–223.

4. Системы автоматического управления авиационными ГТД:
Энциклопедический справочник / Под ред. О.С. Гуревича. - М.: Торус Пресс, 2011.
208 с.

5. Анучин А.С. Системы управления электроприводов. - М.: Издательский дом
МЭИ, 2015. – 320 с.

6. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами.
Л.: Энергоиздат, 1982. – 392 с.

7. Фролов В.Я., Жилиготов Р.И. Разработка системы бездатчикового векторного
управления синхронным двигателем с постоянными магнитами в Matlab Simulink //
Записки горного института. 2018. Т. 229, С. 92-98. DOI: [10.25515/PMI.2018.1.92](https://doi.org/10.25515/PMI.2018.1.92)

8. Фролов В.Я., Жилиготов Р.И. Применение скользящих режимов в
наблюдателях состояния синхронных двигателей с постоянными магнитами //
Мехатроника, автоматика и робототехника. 2018. № 2. С. 80-81.

9. Браславский И.Я., Зюзев А.М., Нестеров К.Е. Асинхронный тиристорный
электропривод с бездатчиковым измерителем скорости // Электромашиностроение и
электрооборудование. 2006. № 66. С. 35-36.

10. Петроченков А.Б., Франк Т., Ромодин А.В., Кычкин А.В. Полунатурное
моделирование активно-адаптивной электрической сети // Электротехника. 2013. №
11. С. 60-63.

11. Герман-Галкин С.Д. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0. - СПб.: Изд-во «Корона», 2001. – 320 с.
12. Жилиготов Р.И., Фролов В.Я. Векторное управление синхронным двигателем с постоянными магнитами на базе микроконтроллера texas instruments c2000 // Международная научно-техническая конференция «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики - IPDME-2017» (Санкт-Петербург, 23–24 марта 2017): сборник трудов. - Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2017. С. 144-147.
13. Дадекнов Д.А., Солодкий Е.М., Шачков А.М. Бездатчиковое векторное управление вентильным двигателем с коррекцией ошибки вычисления электрического угла // Фундаментальные исследования. 2016. № 11 (3). С. 505-509.
14. Cristian Busca. Open loop low speed control for PMSM in high dynamic application. Aalborg, Denmark: Aalborg universitet, 2010.
15. Корельский Д.В., Потапенко Е.М., Васильева Е.В. Обзор современных методов управления синхронными двигателями с постоянными магнитами // Радиоелектроніка. Інформатика. Управління. 2001. С. 155–159.
16. Осин И.Л. Синхронные электрические двигатели малой мощности. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 216 с.
17. Бобцов А.А. Алгоритм управления по выходу с компенсацией гармонического возмущения со смещением // Автоматика и телемеханика. 2008. № 8. С. 25-32.

18. Гольберг Ф.Д., Гуревич О.С., Петухов А.А. Математическая модель двигателя в САУ ГТД для повышения надежности и качества управления // Труды МАИ. 2012. № 58. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=33278>
19. Кузьмичев В.С., Крупенич И.Н., Рыбаков В.Н. и др. Формирование виртуальной модели рабочего процесса газотурбинного двигателя в САЕ-системе "АСТРА" // Труды МАИ. 2013. № 67. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=41518>
20. Жуматаева Ж.Е. Исследование робастной устойчивости системы управления летательным аппаратом // Труды МАИ. 2012. № 53. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=29614>

References

1. Kornilov V.A., Molodyakov D.S., Sinyavskaya Yu.A. Multicopter flight control system. *Trudy MAI*. 2012. No. 62. (In Russ.). URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=35543>
2. Vinogradov S.S. Synthesis of a fuzzy-logic based navigation controller for "Raptor" small-size helicopter. *Trudy MAI*. 2012. No. 73. (In Russ.). URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=48562>
3. Gurevich O.S., Gulienko A.I. Gas turbine engine systems for an "electric" aircraft. *Klimovskie chteniya – 2017. Perspektivnye napravleniya razvitiya aviadvigatelestroeniya* (Saint-Petersburg, October 2017): sbornik statei. Saint-Petersburg: Skifiya-print Publ., 2017. P. 214–223.

4. Gurevich O.S. *Sistemy avtomaticheskogo upravleniya aviatsionnymi GTD: Entsiklopedicheskii spravochnik* (Automatic control systems for aviation gas turbine engines: An encyclopedic reference book). Moscow: Torus Press Publ., 2011. 208 p.
5. Anuchin A.S. *Sistemy upravleniya elektroprivodov* (Control systems of electric drives). Moscow: Izdatel'skii dom MEI Publ., 2015. 320 p.
6. Basharin A.V., Novikov V.A., Sokolovskii G.G. *Upravlenie elektroprivodami* (Control of electric drives). Leningrad: Energoizdat Publ., 1982. 392 p.
7. Frolov V.Ya., Zhiligotov R.I. Development of a sensor-free vector control system for a synchronous motor with permanent magnets in Matlab Simulink. *Zapiski gornogo instituta*. 2018. V. 229, P. 92-98. (In Russ.). DOI: [10.25515/PMI.2018.1.92](https://doi.org/10.25515/PMI.2018.1.92)
8. Frolov V.Ya., Zhiligotov R.I. The use of sliding modes in observers of the state of synchronous motors with permanent magnets. *Mekhatronika, avtomatika i robototekhnika*. 2018. No. 2. P. 80-81. (In Russ.)
9. Braslavskii I.Ya., Zyuzev A.M., Nesterov K.E. Asynchronous thyristor electric drive with a sensorless speed meter. *Elektromashinostroenie i elektrooborudovanie*. 2006. No. 66. P. 35-36. (In Russ.)
10. Petrochenkov A.B., Frank T., Romodin A.V., Kychkin A.V. Semi-natural modeling of an active adaptive electric grid. *Elektrotekhnika*. 2013. No. 11. P. 60-63. (In Russ.)
11. German-Galkin S.D. *Komp'yuternoe modelirovanie poluprovodnikovyykh sistem v MATLAB 6.0*. (Computer modeling of semiconductor systems in MATLAB 6.0). Saint-Petersburg: Izd-vo «Korona» Publ., 2001. 320 p.

12. Zhiligitov R.I., Frolov V.Ya. Vector control of a synchronous motor with permanent magnets based on a texas instruments microcontroller since 2000. *Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Innovatsii i perspektivy razvitiya gornogo mashinostroeniya i elektromekhaniki - IPDME-2017»* (Saint-Petersburg, March 2017): sbornik trudov. Saint-Petersburg: Sankt-Peterburgskii gornyi universitet Publ., 2017. P. 144-147.
13. Dadeknov D.A., Solodkii E.M., Shachkov A.M. Sensor-free vector control of a valve motor with correction of the error in calculating the electric angle. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2016. No. 11 (3). P. 505-509. (In Russ.)
14. Cristian Busca. *Open loop low speed control for PMSM in high dynamic application*. Aalborg, Denmark: Aalborg universitet, 2010.
15. Korel'skii D.V., Potapenko E.M., Vasil'eva E.V. Review of modern control methods for synchronous motors with permanent magnets. *Радіоелектроніка. Інформатика. Управління*. 2001. P. 155–159. (In Ukraine)
16. Osin I.L. *Sinkhronnye elektricheskie dvigateli maloi moshchnosti* (Synchronous electric motors of low power). Moscow: Izdatel'skii dom MEI Publ., 2006. 216 p.
17. Bobtsov A.A. Output control algorithm with compensation of harmonic disturbance with offset. *Avtomatika i telemekhanika*. 2008. No. 8. P. 25-32. (In Russ.)
18. Gol'berg F.D., Gurevich O.S., Petukhov A.A. Amathematical model of the engine in acs gte for increasing of safety and quality control. *Trudy MAI*. 2012. No. 58. (In Russ.).
URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=33278>

19. Kuz'michev V.S., Krupenich I.N., Rybakov V.N., ets. Generation of the gas turbine engine working process virtual model Subject area of the case. *Trudy MAI*. 2013. No. 67. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=41518>
20. Zhumataeva Zh.E. Research on robust stability of control systems aircraft. *Trudy MAI*. 2012. No. 53. (In Russ.). URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=29614>

Статья поступила в редакцию 21.01.2025

Одобрена после рецензирования 26.01.2025

Принята к публикации 25.02.2025

The article was submitted on 21.01.2025; approved after reviewing on 26.01.2025; accepted for publication on 25.02.2025