

УДК 62-799; 621.3.084.2; 621.3.087.45
DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-10-867-877

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ ГИБРИДНОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ ЛЕГКОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Д. А. Борисов*, А. А. Жуков

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

** dimaavia98@mail.com*

Аннотация. Предложен подход к построению системы диагностики гибридной силовой установки (ГСУ) легкого летательного аппарата. В качестве диагностируемого объекта рассматривается ГСУ параллельной схемы с использованием двигателя внутреннего сгорания (ДВС) и электрической силовой установки (ЭСУ). Определены необходимые отслеживаемые параметры работы, отражающие техническое состояние ГСУ. Показана значимость выбранных отслеживаемых параметров ДВС и ЭСУ. Рассмотрено влияние числа оборотов, давления воздуха и топлива, температуры воздуха, топлива, выхлопных газов и головок цилиндров на состояние ДВС, а также параметров ЭСУ — напряжения, тока, температуры аккумулятора и температуры электродвигателя. На основе указанных параметров проведен выбор датчиков с учетом условий их эксплуатации и конструкторских решений прототипа ГСУ. Разработана структурная схема аппаратной части на основе микроконтроллера и внешних аналого-цифровых преобразователей, используемых для оцифровки датчиков температуры. Представлена возможность записи параметров в „черный ящик“, а также передачи информации в бортовую шину данных во время эксплуатации легкого летательного аппарата.

Ключевые слова: система диагностики, гибридный двигатель, аппаратная реализация, параметры гибридного двигателя, датчики диагностического комплекса

Ссылка для цитирования: Борисов Д. А., Жуков А. А. Разработка системы диагностики гибридной силовой установки легкого летательного аппарата // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 10. С. 867–877. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-10-867-877.

DEVELOPMENT OF A DIAGNOSTIC SYSTEM FOR A HYBRID POWER PLANT OF A LIGHT AIRCRAFT

D. A. Borisov*, A. A. Zhukov

Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

** dimaavia98@mail.ru*

Abstract. An approach to constructing a diagnostic system for a light aircraft hybrid power plant (HPP) is proposed. A HPP assembled according to a parallel scheme using an internal combustion engine (ICE) and an electric power plant (EPP) is considered as the object being diagnosed. The necessary monitored operating parameters reflecting the technical condition of the HPP are determined. The significance of the selected monitored parameters of the ICE and EPP is shown. The influence of the speed, air and fuel pressure, air, fuel, exhaust gas and cylinder head temperature on the ICE condition, as well as the EPP parameters — voltage, current, battery temperature and electric motor temperature — is considered. Based on the specified parameters, the sensors are selected taking into account their operating conditions and design solutions for the HPP prototype. A structural diagram of the hardware is developed based on a microcontroller and external analog-to-digital converters used to digitize the temperature sensors. The possibility of recording parameters in a “black box” and transmitting information to the on-board data bus during operation of the light aircraft is presented.

Keywords: diagnostic system, hybrid engine, hardware implementation, hybrid engine parameters, diagnostic complex sensors

For citation: Borisov D. A., Zhukov A. A. Development of a diagnostic system for a hybrid power plant of a light aircraft. *Journal of Instrument Engineering*. 2024. Vol. 67, N 10. P. 867–877 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-10-867-877.

Введение. Развитие современных технологий энергообеспечения, основанных на использовании систем хранения энергии, эффективных электрических двигателей, компактных и доступных полупроводниковых силовых преобразователей, способствовало созданию наземных транспортных средств с гибридной силовой установкой, которая объединяет в себе традиционный двигатель внутреннего сгорания (ДВС) и электрическую силовую установку (ЭСУ) [1]. Применение гибридных двигателей позволило повысить эффективность расхода топлива, уменьшить вредные выбросы, повысить надежность и снизить уровень шума. Все эти преимущества способствовали бурному развитию гибридных двигателей не только в автомобильной, но и в авиационной промышленности. В отличие от автомобильных, авиационные гибридные силовые установки работают в других режимах [2], которые меняются в зависимости от полетного цикла, что требует создания новых систем управления и диагностики.

Системы диагностики гибридных авиационных двигателей играют важную роль в обеспечении безопасности, надежности и эффективности воздушного транспорта. Они представляют собой набор технических средств и алгоритмов, предназначенных для непрерывного анализа работы гибридных двигателей. Система диагностики позволяет своевременно выявлять неисправности и проблемы в работе двигателей. Во время работы силовой установки ведется непрерывный мониторинг различных параметров, таких как температура, давление, обороты, напряжение и ток, значения которых зависят от режима работы гибридного двигателя.

В настоящей статье представлен подход к построению системы диагностики гибридной силовой установки (ГСУ) легкого летательного аппарата. При этом решались задачи:

- 1) определения необходимых отслеживаемых параметров ГСУ;
- 2) выбора датчиков и преобразователей сигналов с учетом условий эксплуатации в конструкции ГСУ;
- 3) выбора целевого микроконтроллера для получения параметров работы ГСУ от датчиков, записи параметров в „черный ящик“, передачи информации в бортовую шину данных и реализации алгоритма диагностики.

Конфигурация и вид ГСУ зависят от целей использования. В настоящей статье рассматривается система диагностики для опытного образца гибридной силовой установки [2] параллельного типа [3]. Гибридная силовая установка состоит из двух источников крутящего момента — двухтактного, рядного, двухцилиндрового ДВС и синхронного электродвигателя с векторным управлением, которые передают крутящий момент на воздушный винт. Оба источника могут работать независимо друг от друга или совместно — в зависимости от текущего режима полетного цикла.

Диагностические параметры ДВС. С целью диагностики двигателя и его составных частей во время полетного цикла отслеживается ряд уникальных параметров, на основании которых система определяет текущее состояние силовой установки. Наиболее важными показателями состояния ДВС и его составных частей служат: температура выхлопных газов, головок цилиндра, впускного воздуха, топлива, давление топлива, давление в дроссельном узле, обороты коленчатого вала. Наиболее важные параметры электрической силовой установки: потребляемый ток, напряжение аккумуляторной батареи, а также температура аккумуляторной батареи, контроллера электродвигателя и самого электродвигателя.

Температура выхлопных газов и головок цилиндра является одним из факторов, определяющих эффективность работы двигателя. Оптимизация температуры двигателя обеспечивает наилучшее сжигание топлива и максимальную производительность. Контроль температуры выхлопных газов и головок цилиндров позволяет оптимизировать параметры работы двигателя и обеспечить его максимальную эффективность. Высокие температуры выхлопных газов и головок цилиндров могут негативно влиять на различные компоненты двигателя [4], такие как клапаны, поршни, головка цилиндра и катализаторы. Постоянное превышение допустимых

температур может привести к износу и повреждению этих деталей. Контроль температуры выхлопных газов и головок цилиндров позволяет обнаружить потенциальные проблемы и предпринять меры для защиты двигателя от повреждений. Аномальные изменения температуры выхлопных газов и головок цилиндров могут указывать на наличие проблем с работой двигателя, таких как неправильное сжигание топлива, нарушение работы системы охлаждения или неисправности в системе выпуска.

Температура воздуха [5, 6] и топлива [7] во впускном коллекторе ДВС может сильно меняться в зависимости от высоты полета летательного аппарата. Температура воздуха влияет на плотность воздушно-топливной смеси, которая поступает в цилиндры двигателя. Температура топлива влияет на его летучесть и способность образовывать гомогенную смесь с воздухом. Более высокая температура может улучшить распыление топлива и его смешивание с воздухом, что, в свою очередь, может повысить эффективность сгорания и уменьшить количество неполных сгоревших частиц. Более низкая температура впускного коллектора может повысить плотность воздуха, что, в свою очередь, может улучшить эффективность работы двигателя. Это может привести к увеличению мощности и снижению расхода топлива. Температура впускного коллектора также влияет на образование вредных выбросов. Контроль температуры позволяет соблюдать стандарты по выбросам и снижать уровень загрязнения окружающей среды. Мониторинг температуры впускного коллектора позволяет предотвращать подобные проблемы и обеспечивать нормальное функционирование двигателя. Изменения в температуре могут служить индикатором сбоев в работе датчиков, проблем с системой охлаждения или дефектов системы управления двигателем. Мониторинг температуры впускного коллектора помогает выявить и устранить подобные неисправности.

Давление воздуха [8] и топлива [9] в двигателе внутреннего сгорания существенно воздействует на различные аспекты работы двигателя. В процессе полета летательный аппарат может менять высоту полета, вследствие чего заметно изменяется давление воздуха. Более низкое давление во впускном коллекторе приводит к уменьшению плотности воздуха. Это означает, что в каждом цикле впуска в цилиндры поступает меньше кислорода, что может ухудшить сгорание топлива. Это особенно важно в условиях высоких нагрузок или при требовании высокой производительности. Более высокое давление воздуха может способствовать лучшему смешиванию воздуха с топливом, что повышает эффективность сгорания и, следовательно, экономию топлива. Давление топлива влияет на количество топлива, подаваемого в цилиндры за один цикл. Это регулируется системой впрыска и влияет на соотношение воздуха и топлива в смеси. Высокое давление топлива повышает эффективность работы системы смесеобразования. Это важно для обеспечения точного впрыска топлива и предотвращения проблем с неполным сгоранием. В целом, соблюдение расчетных значений давления воздуха и топлива важно для обеспечения оптимальной производительности, эффективности сгорания, экономии топлива и снижения выбросов вредных веществ. Эти параметры тщательно контролируются и регулируются системами управления двигателем.

Число оборотов ДВС отражает общую производительность силовой установки. Изменения в угловой скорости вала двигателя могут свидетельствовать о различных проблемах, таких как неисправности в системах топливоподачи, зажигания, впуска или выпуска. Знание числа оборотов и их отклонений помогает выявить причины неисправностей. Резкое падение или повышение числа оборотов может указывать на износ, сбой в работе или проблемы с механизмами двигателя. Контроль оборотов двигателя помогает поддерживать оптимальные условия его работы, что важно для долговечности и эффективности ДВС.

Диагностические параметры ЭСУ. Для анализа состояния работы ЭСУ в ней контролируются параметры тока и напряжения. В гибридных двигателях датчики тока и напряжения играют важную роль в мониторинге и управлении электрической системой. Гибридные двигатели используют батареи для хранения электрической энергии. Датчики тока и напряжения позволяют контролировать процессы зарядки и разрядки батарей. Это позволяет определить состояние заряда батарей и осуществлять управление их работой для обеспечения оптимальной

производительности и долговечности. Датчики тока и напряжения позволяют контролировать работу электрического двигателя и отслеживать потребление энергии. Это важно для эффективного управления энергией и оптимизации работы гибридной системы. Датчики тока и напряжения могут быть использованы для диагностики и обнаружения неисправностей в электрической системе гибридного двигателя. Например, аномальные изменения тока или напряжения могут указывать на проблемы с батареями, электрическими компонентами или проводкой. Мониторинг этих параметров позволяет своевременно обнаружить и устранить неисправности, повышая надежность и безопасность работы системы. Датчики тока и напряжения позволяют системе гибридного двигателя контролировать и оптимизировать энергопотребление. Они помогают регулировать передачу энергии между различными компонентами ГСУ, такими как двигатель внутреннего сгорания, электрический двигатель и батареи. Это позволяет более эффективно использовать энергию и повышать экономичность работы гибридного двигателя.

Известно, что контроль температуры аккумулятора в электромобиле является важным аспектом для обеспечения безопасной и эффективной работы батареи. Оптимальная температура помогает продлить срок службы аккумулятора. Высокие температуры могут ускорить процессы старения, деградации и потери емкости аккумулятора, а также привести к повреждению его структуры и риску возникновения пожара. Низкие температуры, с другой стороны, могут снизить производительность. Контроль температуры позволяет поддерживать аккумулятор в оптимальном состоянии [10], активировав системы охлаждения или приняв соответствующие меры безопасности. Это особенно важно в экстремальных условиях, таких как высокая температура окружающей среды или интенсивная зарядка/разрядка. Контроль температуры также позволяет оптимизировать процессы зарядки и разрядки, обеспечивая безопасность, максимальную эффективность и долговечность.

Анализ температуры электродвигателя важен при взлетном режиме, когда силовая установка работает на максимальной мощности и электродвигатель имеет наихудший КПД, что способствует сильному нагреву обмоток статора и магнитов ротора. При превышении определенного порога температур нарушается прочность лаковой изоляции эмалированного провода обмотки статора, что приводит к межвитковому замыканию и, как следствие — еще большему нагреву. Высокая температура также отрицательно влияет на магниты ротора, которые могут безвозвратно утратить магнитные свойства. Повышение температуры при номинальных параметрах потребляемого тока и числа оборотов может свидетельствовать об износе механической части или работе электродвигателя в перегруженном режиме. Контроль температуры позволяет поддерживать электродвигатель в оптимальном диапазоне, что способствует его надежной и эффективной работе. Оптимальная температура электродвигателя также влияет на энергопотребление системы. Регулирование температуры позволяет эффективно управлять системами охлаждения и обеспечить оптимальное потребление энергии.

Выбор датчиков системы диагностики. В соответствии с проанализированными диагностическими параметрами проведен выбор датчиков первичной информации. В табл. 1 приведены используемые датчики и условия их эксплуатации, а на рис. 1 показаны места их установки (на рисунке не указан датчик положения рычага управления двигателем, РУД). Расположение датчиков обусловлено параметрами, которые они измеряют, а также конструктивными и технологическими ограничениями как самих датчиков, так и ГСУ.

Датчики температуры. При выборе датчиков температуры выхлопных газов наиболее важными критериями являются диапазон измеряемых температур и возможность измерений в агрессивной среде выхлопной системы. Для датчиков температуры головок цилиндров применяются менее жесткие требования и достаточно соблюдения температурного диапазона.

Для сравнительного анализа помимо основных были выбраны дополнительные критерии: диапазон измеряемых температур; точность; тип выходного сигнала; доступность приобретения; страна-производитель.

На основании критериев была отобрана группа датчиков, представленная в табл. 2.

Таблица 1

Позиция	Датчик	Место установки в ГСУ	Температура эксплуатации, °С	Примечание
1	Датчик температуры головок цилиндров ДВС	Головки 1 и 2 цилиндров	От –30 до +900	Прямой контакт сенсора с огнем; требует внешнего АЦП
2	Датчик температуры выхлопных газов ДВС	Выпускные патрубки 1 и 2 цилиндров	От –30 до +300	Аналоговый, требует внешнего АЦП
3	Датчик температуры электродвигателя	Статор электродвигателя	От –30 до +140	Аналоговый, требует внешнего АЦП
4	Датчик температуры контроллера	Радиатор контроллера	От –30 до +100	Аналоговый, требует внешнего АЦП
5	Датчик температуры аккумуляторной батареи	Аккумуляторная батарея	От –30 до +100	Аналоговый, требует внешнего АЦП
6	Датчик положения коленчатого вала ДВС	Корпус стартера	От –30 до +40	Интегральный, с цифровым входом
7	Датчик оборотов электродвигателя	Статор электродвигателя	От –30 до +140	Цифровой, биполярный
8	Датчик температуры воздуха во впускном коллекторе	Впускной коллектор	От –30 до +40	Аналоговый, требует внешнего АЦП
9	Датчик давления воздуха во впускном коллекторе	Впускной коллектор	От –30 до +40	Аналоговый, требует внешнего АЦП
10	Датчик температуры топлива	Топливная магистраль	От –30 до +40	Аналоговый, требует внешнего АЦП
11	Датчик давления топлива	Топливная магистраль	От –30 до +40	Аналоговый, требует внешнего АЦП
12	Датчик тока	Блок коммутации	От –30 до +40	Аналоговый, требует внешнего АЦП
13	Датчик напряжения	Блок коммутации	От –30 до +40	Аналоговый, требует внешнего АЦП
—	Датчик положения РУД	РУД	От –30 до +40	Интегральный, с цифровым входом

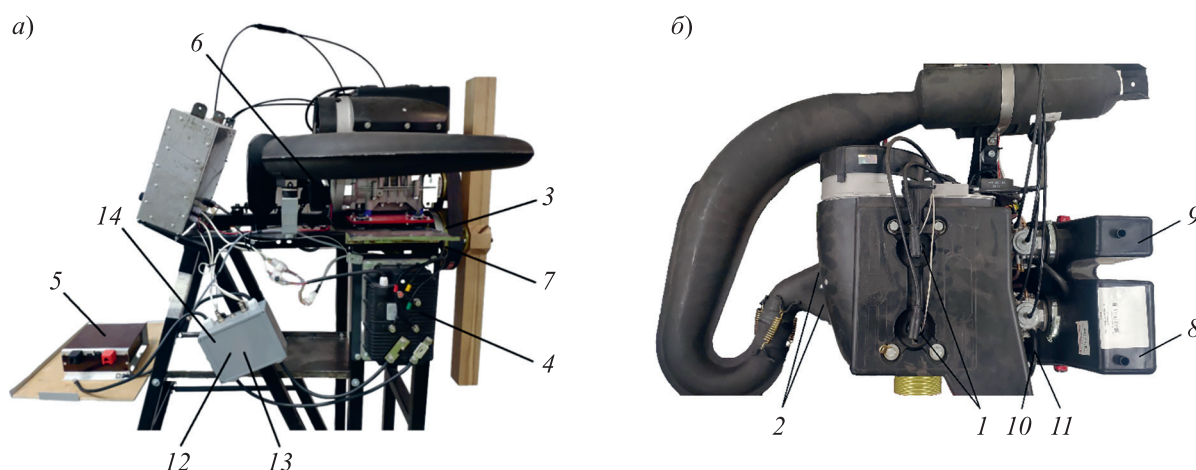


Рис. 1

Таблица 2

Критерий	Датчик			
	РТС [11] и NTC [12] терморезисторы	Термопары [13] (хромель–алюмель)	Платиновые датчики (PT1000) [14]	Инфракрасные датчики (RAYCMLTV3M)
Диапазон измеряемых температур, °C	От –55 до +300	От 0 до + 300	От –50 до +600	От –20 до +500
Погрешность, °C	±2	±2,8	±0,5	±0,1
Тип входного сигнала	Аналоговый (сопро- тивление)	Аналоговый (напря- жение)	Аналоговый (сопро- тивление)	Аналоговый (напря- жение)
Доступность приобретения	Высокая	Высокая	Высокая	Низкая
Производители	Отечественные, зарубежные	Отечественные зарубежные	Отечественные, зарубежные	Зарубежные
Преимущества	Простота использова- ния, цена	Высокая точность измерений при вы- соких температурах. Хорошие долговеч- ность и стойкость к воздействию агрес- сивных сред	Высокие точность и стабильность. Широкий диапазон рабочих температур. Меньшее влияние электромагнитных полей, по сравнению с термопарами	Бесконтактные измерения. Широкий диапазон измерения
Недостатки	Влияние электро- магнитных полей. Требуется внешний АЦП	Влияние электро- магнитных полей. Требуется внешние усилители сигнала	Более дорогие, по сравнению с некоторыми другими типами датчиков. Требуется внешние усилители сигнала	Менее точные, требуется калибровка для измеряемой поверхности

По результатам сравнительного анализа наиболее подходящим датчиком выхлопных газов оказался датчик термопары, который обладает большим диапазоном измерений и способен работать в агрессивной среде выхлопной системы; для измерения температуры головок цилиндров рационально использовать платиновые датчики; для измерения температуры впускного воздуха, топлива, электродвигателя, аккумулятора и контроллера целесообразно применить термосопротивление с отрицательным температурным коэффициентом.

Датчик положения коленчатого вала. В двигателях внутреннего сгорания с системой электронного впрыска и зажигания для определения положения коленчатого вала используются специализированные датчики, которые работают в совокупности с реперным диском. Точность определения положения коленчатого вала зависит от вычислительных возможностей электронного блока управления двигателем и количества меток на реперном диске (обычно не более шестидесяти).

В зависимости от производителя двигателя широко применяют индуктивный датчик [15], который выдает аналоговый сигнал синусоидальной формы при прохождении зубца реперного диска перед датчиком, или датчик на основе эффекта Холла [15], который выдает цифровой сигнал прямоугольной формы при прохождении зубца реперного диска перед датчиком.

В представленном на рис. 1 опытном образце ГСУ [2] используется не система электронного впрыска, а карбюраторная система смесеобразования. Ввиду этого реперный диск имеет лишь одну метку, которая используется как триггер для катушки зажигания. С помощью одной метки реперного диска можно определить текущее число оборотов коленчатого вала, но невозможно точно вычислить угловое положение вследствие нелинейности вращения коленчатого вала при разных режимах работы.

Таблица 3

Датчик	Выходной сигнал	Тип сигнала	Типовая разрешающая способность	Примечание
Индуктивный датчик	Аналоговый	Инкрементный	До 100 отсчетов, зависит от числа меток на диске	Требуется специализированные АЦП и установка реперного диска
Датчик на основе эффекта Холла	Цифровой	Инкрементный	До 100 отсчетов, зависит от числа меток на диске	Требуется установка реперного диска
Инкрементный энкодер	Цифровой	Инкрементный	До 5000 отсчетов	Требуется соединение с коленчатым валом
Резольвер	Аналоговый	Абсолютный	65 536 отсчетов, зависит от разрядности АЦП	Требуется специализированные АЦП
Интегральный датчик на основе эффекта Холла	Цифровой интерфейс	Абсолютный	16 384 отсчетов, зависит от разрядности АЦП	Требуется соединение с коленчатым валом

В связи с невозможностью определения положения коленчатого вала штатным путем были рассмотрены варианты доработки прототипа ГСУ (в табл. 3 представлены альтернативные варианты датчиков).

Оптимальным является интегральный датчик на основе эффекта Холла. Среди представленных на рынке был выбран датчик AS5047P [16], имеющий цифровой интерфейс SPI (Serial Peripheral Interface) для подключения к микроконтроллеру, он обладает большой разрядностью и может быть установлен на прототип ГСУ.

Датчики давления. При рассмотрении датчиков давления топлива в магистрали и давления воздуха во впускном ресивере основным критерием являлась возможность применения датчика в агрессивной среде (бензине). Так, наиболее подходит малогабаритный датчик ПД100 [17]. Он представляет собой преобразователь с современным сенсором структуры „кремний на кремнии“, мембраной из нержавеющей стали, микропроцессорным нормированием и выходным сигналом 4–20 мА. Для измерения давления топлива используется датчик ПД100 с измерением избыточного давления, а для измерения давления во впускном ресивере — датчик абсолютного давления.

Датчик тока. Для измерения тока потребления электрической силовой установки необходимо использовать датчик тока, который устанавливается в цепи постоянного тока между аккумулятором и контроллером. Для измерения постоянного тока могут быть использованы два вида измерительных датчиков.

Датчик тока. Для измерения тока потребления электрической силовой установки необходимо использовать датчик тока с диапазоном измерения до 300 ампер, которой располагается в цепи постоянного тока между аккумулятором и контроллером. Для измерения постоянного тока могут быть использованы датчики на основе эффекта Холла или токовые шунты: первые уступают по точности измерения, но имеют гальваническую изоляцию, меньше весят и не требуют компенсации температуры.

По результатам сравнения был выбран датчик тока HTFS 200-P [18], который работает на эффекте Холла.

Датчик напряжения. Для измерения напряжения аккумуляторной батареи используется датчик на основе резистивного делителя, который преобразует напряжение 0–84 В в напряжение 0–3 В.

Резервирование измеряемых параметров датчиков. Большинство параметров работы ГСУ тесно связаны между собой, благодаря чему появляется возможность проверить работоспособность датчиков по параметрам работы других, а также косвенно определять параметры вышедшего из строя датчика. Датчики с взаимосвязанными параметрами представлены в табл. 4.

Таблица 4

Датчик	Датчик температуры головок цилиндров ДВС	Датчик температуры выхлопных газов ДВС	Датчик температуры двигателя	Датчик температуры аккумулятора	Датчик положения коленчатого вала ДВС	Датчик оборотов двигателя	Датчик температуры воздуха во впускном коллекторе	Датчик давления воздуха во впускном коллекторе	Датчик температуры топлива	Датчик давления топлива	Датчик тока	Датчик напряжения	Датчик положения РУД
Датчик температуры головок цилиндров ДВС	X					X							X
Датчик температуры выхлопных газов ДВС		X			X		X	X	X				X
Датчик температуры электродвигателя											X	X	X
Датчик температуры контроллера						X					X	X	X
Датчик температуры аккумуляторной батареи											X	X	X
Датчик положения коленчатого вала ДВС		X				X			X				
Датчик оборотов электродвигателя	X				X				X		X		X
Датчик температуры воздуха во впускном коллекторе		X						X					
Датчик давления воздуха во впускном коллекторе		X					X						X
Датчик температуры топлива		X			X								
Датчик давления топлива												X	X
Датчик тока			X	X		X					X		X
Датчик напряжения			X	X							X		
Датчик положения РУД	X	X	X	X		X		X			X	X	

Разработка аппаратной части системы диагностики. Задачей аппаратной части является опрос измерительных каналов с датчиков, установленных на гибридной силовой установке, с целью анализа полученных параметров работы. Измеренные значения также записываются в „черный ящик“ и передаются в общую шину данных для последующего использования.

Аппаратная часть располагается в блоке коммутации ГСУ (рис. 1, а, 14). В качестве целевого микроконтроллера используется STM32F446RET6 [19], который обладает аналого-цифровым преобразователем (АЦП), блоком SPI (Serial Peripheral Interface), блоком SDIO (Secure Digital Input Output) и блоком CAN (Controller Area Network) интерфейса.

На рис. 2 представлена разработанная схема аппаратной части системы диагностики.

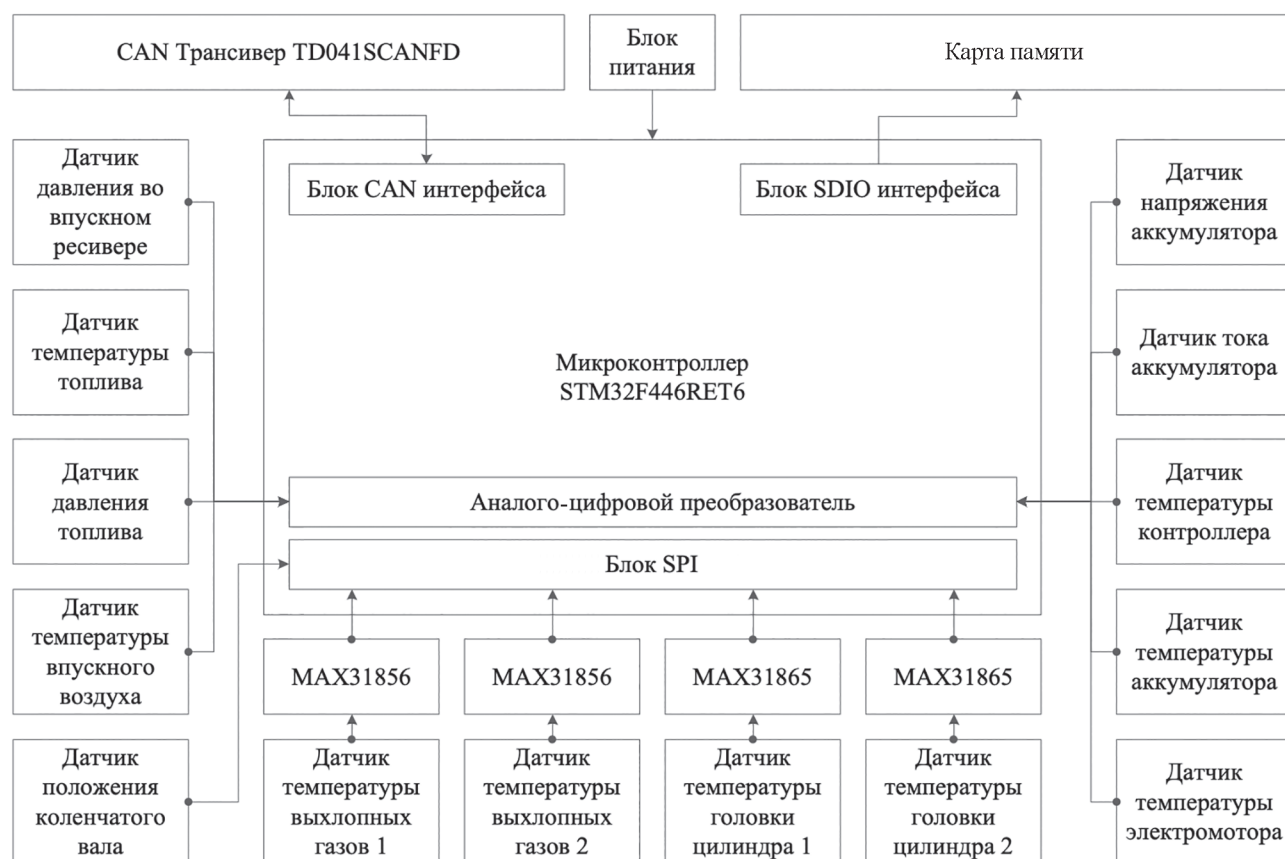


Рис. 2

Аналоговые датчики ГСУ подключаются непосредственно ко входам АЦП микроконтроллера, где происходит преобразование. Ввиду малой разрядности встроенного АЦП микроконтроллера для измерения сигналов с термопар и платиновых датчиков были применены прецизионные аналого-цифровые преобразователи MAX31856 [20] и MAX31865 [21]. Преобразователь MAX31856 с SPI, обладающий функцией компенсации температуры холодного спая, может быть настроен для работы с различными типами термопар. MAX31865 с SPI имеет блок линейаризации и поддерживает работу с платиновыми датчиками PT100 и PT1000. Датчик положения коленчатого вала AS5047P также подключается к блоку SPI микроконтроллера.

Для записи данных в „черный ящик“ используется карта памяти, которая подключается к аппаратному блоку SDIO микроконтроллера.

Для сопряжения аппаратной части системы диагностики с другими устройствами (блоком телеметрии, блоком вывода информации) используется блок CAN шины микроконтроллера, который посредством внешнего трансивера TD041SCANFD передает данные в информационный канал.

Заключение. В статье разработана система диагностики гибридной силовой установки легкого летательного аппарата. Рассмотрены отслеживаемые параметры силовой установки,

которые важны для ее использования и диагностики. Проведен сравнительный анализ датчиков с учетом особенностей их размещения и эксплуатации. Разработана схема подключения выбранных датчиков к микроконтроллеру, а также представлены способы хранения и передачи диагностических параметров ГСУ. Использование диагностической системы позволит повысить безопасность использования силовой установки, а также своевременно выявлять потенциальные проблемы при использовании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сычёв А. В., Балясный К. В., Борисов Д. А., Кузнецов К. В. Стенд для тестирования электрической винтомоторной группы // *Двигатель*. 2021. № 3(135). С. 12–13.
2. Сычёв А. В., Балясный К. В., Борисов Д. А. Гибридная силовая установка с использованием электрического двигателя и двигателя внутреннего сгорания с общим приводом на воздушный винт // *Вестник Московского авиационного института*. 2022. Т. 29, № 4. С. 172–185. DOI:10.3479/vt-2022-4-172-185.
3. Варюхин А. Н., Захарченко В. С., Рахманкулов Д. Я., Сунцов П. С., Овдиенко М. А., Гелиев А. В., Киселев И. О., Власов А. В. Традиционные, гибридные и электрические силовые установки самолетов местных воздушных линий // *Авиационные двигатели*. 2022. № 14. С. 19–32. DOI:10.54349/26586061_2022_1_19.
4. Температуру выхлопных газов — под контроль [Электронный ресурс]: <<https://www.flyrotax.com/ru/dis/aviagamma/p/temperaturu-vyhlopnih-gazov-pod-kontrol>> (дата обращения: 01.02.2024).
5. Акунов Б. У., Касымбеков К. Дж. Влияние температуры воздуха во впускном коллекторе двигателя на длительность импульса открытия форсунки при эксплуатации автомобиля в различных условиях // *Вестник СибАДИ*. 2019. Т. 16, № 1(65). С. 32–39.
6. Карнаухов И. В. Определение оптимальной температуры воздуха во впускном коллекторе двигателя // *Вестник СибАДИ*. 2014. Вып. 3(37). С. 7–12.
7. Охотников Б. Л. Эксплуатация двигателей внутреннего сгорания: учеб. пос. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. С. 42–46.
8. Бабоишин А. А., Косарев А. С., Малышев В. С. Оценка технического состояния двигателей внутреннего сгорания по давлению во впускном и впускном коллекторах // *Вестник МГТУ*. 2013. Т. 16, № 1. С. 23–32.
9. Как влияет давление в топливной системе на работу двигателя [Электронный ресурс]: <<https://avtika.ru/kak-vliyaet-davlenie-v-toplivnoy-sisteme-na-rabotu-dvigatelya/>> (дата обращения: 01.02.2024).
10. Кулова Т. Л., Скундин А. М. Влияние температур на характеристики литий-ионных и натрий-ионных аккумуляторов // *Электрохимия*. 2021. Т. 57, № 7. С. 402–407. DOI: 10.31857/S0424857021070082.
11. What is PTC Thermistor: Working & Its Applications [Электронный ресурс]: <<https://www.elprocus.com/ptc-thermistor/>> (дата обращения: 01.02.2024).
12. What is NTC Thermistor: Working & Its Applications [Электронный ресурс]: <<https://www.elprocus.com/ntc-thermistor/>> (дата обращения: 01.02.2024).
13. Подловкин Е. А., Лебедев В. В. Некоторые особенности использования термопар для измерения температуры // *Актуальные проблемы энергетики-2016*. Минск, 2017. С. 470–474.
14. Сидорцев А., Опарина И. Выбор датчика температуры // *Автоматизация и производство*. 2023. № 1(53).
15. Датчик положения коленвала: основа работы современного двигателя [Электронный ресурс]: <<https://www.autoopt.ru/articles/products/39478569>> (дата обращения: 01.02.2024).
16. Product Document AS5047P [Электронный ресурс]: <https://ams.com/documents/20143/36005/AS5047P_DS000324_3-00.pdf> (дата обращения: 01.02.2024).
17. ПД100 Преобразователь давления измерительный [Электронный ресурс]: <https://owen.ru/downloads/re_pd100.pdf> (дата обращения: 01.02.2024).
18. Current Transducer HTFS 200...800-P [Электронный ресурс]: <https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/htfs_200_800-p.pdf> (дата обращения: 01.02.2024).
19. STM32F446RE [Электронный ресурс]: <<https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f446re.html#documentation>> (дата обращения: 01.02.2024).
20. MAX31856 Precision Thermocouple to Digital Converter with Linearization [Электронный ресурс]: <<https://cdn-learn.adafruit.com/assets/assets/000/035/948/original/MAX31856.pdf>> (дата обращения: 01.02.2024).
21. MAX31865 RTD-to-Digital Converter [Электронный ресурс]: <<https://www.farnell.com/datasheets/2345101.pdf>> (дата обращения: 01.02.2024).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Дмитрий Алексеевич Борисов

— аспирант; Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), кафедра технологии производства приборов и информационных систем управления летательных аппаратов; E-mail: dimaavia98@mail.ru

Андрей Александрович Жуков

— д-р техн. наук, профессор; Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), кафедра технологии производства приборов и информационных систем управления летательных аппаратов; профессор; E-mail: and_zhukov@mail.ru

Поступила в редакцию 02.05.24; одобрена после рецензирования 05.06.24; принята к публикации 23.08.24.

REFERENCES

1. Sychev A.V., Balyasnyi K.V., Borisov D.A., Kuznetsov K.V. *Engine*, 2021, no. 3(135), pp. 12–13. (in Russ.)
2. Sychev A.V., Balyasnyi K.V., Borisov D.A. *Aerospace MAI Journal*, 2022, no. 4(29), pp. 172–185, DOI:10.3479/vt-2022-4-172-185. (in Russ.)
3. Varyukhin A.N., Zakharchenko V.S., Rakhmankulov D.Ya., Suntsov P.S., Ovdienko M.A., Geliev A.V., Kiselev I.O., Vlasov A.V. *Aviation Engines*, 2022, no. 14, pp. 19–32, DOI:10.54349/26586061_2022_1_19. (in Russ.)
4. <https://www.flyrotax.com/ru/dis/aviagamma/p/temperatura-vykhlopnih-gazov-pod-kontrol>. (in Russ.)
5. Akunov B.U., Kasymbekov K.D. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2019, no. 1(16), pp. 32–39, <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2019-1-32-39>. (in Russ.)
6. Karnaukhov I.V. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2014, no. 3(37), pp. 7–12. (in Russ.)
7. Okhotnikov B.L. *Eksploatatsiya dvigateley vnutrennego sgoraniya* (Operation of Internal Combustion Engines), Ekaterinburg, 2014, pp. 42–46. (in Russ.)
8. Baboshin A.A., Kosarev A.S., Malyshev V.S. *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2013, no. 1(16), pp. 23–32. (in Russ.)
9. <https://avtika.ru/kak-vliyaet-davlenie-v-toplivnoy-sisteme-na-rabotu-dvigatelya/>. (in Russ.)
10. Kulova T.L., Skundin A.M. *Russian Journal of Electrochemistry*, 2021, no. 7(57), pp. 700–705.
11. *What is PTC Thermistor: Working & Its Applications*, <https://www.elprocus.com/ptc-thermistor/>. (in Russ.)
12. *What is NTC Thermistor: Working & Its Applications*, <https://www.elprocus.com/ntc-thermistor/>. (in Russ.)
13. https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/35084/Nekotorye_osobennosti_ispolzovaniya_termopar_dlya_izmereniya_temperatury.pdf?sequence=1&isAllowed=y C. 470–474. (in Russ.)
14. https://aip.com.ru/article/vybor_datchika_temperatury. (in Russ.)
15. <https://www.autoopt.ru/articles/products/39478569>. (in Russ.)
16. *Product Document AS5047P*, https://ams.com/documents/20143/36005/AS5047P_DS000324_3-00.pdf.
17. https://owen.ru/downloads/re_pd100.pdf. (in Russ.)
18. *Current Transducer HTFS 200...800-P*, https://www.lem.com/sites/default/files/products_datasheets/htfs_200_800-p.pdf.
19. *STM32F446RE*, <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f446re.html#documentation>.
20. *MAX31856 Precision Thermocouple to Digital Converter with Linearization*, <https://cdn-learn.adafruit.com/assets/assets/000/035/948/original/MAX31856.pdf>.
21. *MAX31865 RTD-to-Digital Converter*, <https://www.farnell.com/datasheets/2345101.pdf>.

DATA ON AUTHORS

Dmitry A. Borisov

— Post-Graduate Student; Moscow Aviation Institute, Department of Technologies for the Production of Instruments and Information Systems for Aircraft Control; E-mail: dimaavia98@mail.ru

Andrey A. Zhukov

— Dr. Sci., Professor; Moscow Aviation Institute, Department of Technologies for the Production of Instruments and Information Systems for Aircraft Control; Professor; E-mail: and_zhukov@mail.ru

Received 02.05.24; approved after reviewing 05.06.24; accepted for publication 23.08.24.