

УДК 629.7.018.2:621.313.5-57

А. Г. БУРЯЧЕНКО, Г. Ф. ЦАЛИМОВ, А. А. ЦАРЕВ

АО «Элемент», Одесса, Украина

## СТЕНД-ИМИТАТОР СТАРТЕР-ГЕНЕРАТОРА С ФУНКЦИЕЙ ИМИТАЦИИ РАБОТЫ ДВУХ СТАРТЕР-ГЕНЕРАТОРОВ НА ОБЩУЮ БОРТОВУЮ СЕТЬ

Описаны результаты разработки специализированного испытательного оборудования – стенда, имитирующего электрический стартер-генератор постоянного тока и предназначенного для настройки и проверки в лабораторных условиях в полном объеме параметров и функций блока запуска и генерирования (БЗГ). Отражены вопросы формирования математической модели стартер-генератора, встроенной в стенд-имитатор. Приведена и описана структура стенда. Особое внимание уделено этапу модернизации стенда с целью обеспечения проверки перекрестного запуска и выравнивания токов двух стартер-генераторов на двухдвигательном летательном аппарате. Показаны основные характеристики стенда-имитатора и освещены опыт и результаты его применения в процессе разработки, изготовления и испытаний БЗГ.

**Ключевые слова:** комплектующее изделие авиационной техники, математическая модель, двухдвигательный летательный аппарат

### Введение

АО «Элемент» – сертифицированный разработчик и изготовитель комплектующих изделий авиационной техники (КИ АТ), имеющий значительный опыт их создания, начиная от согласования технического задания, вплоть до сертификации производства КИ АТ категории А [1].

Базируясь на упомянутом опыте, специалисты АО «Элемент» всегда уделяют значительное внимание созданию специализированного нестандартного испытательного оборудования. Это оборудование собственной разработки, позволяющее провести полноценную проверку всех функций КИ АТ в лабораторных условиях, а именно – аппаратно-программные стенды с интегрированной в состав программного обеспечения математической моделью, такие как, например, стенд-имитатор двигателя АИ-450М [2] для испытаний серийно выпускаемого регулятора двигателя РДЦ-450М.

В настоящее время АО «Элемент» выполняет в интересах АО «Мотор Сич» разработку блока запуска и генерирования БЗГ в трех исполнениях:

- БЗГ-450 для ГТД АИ-450М, АИ-450С;
- БЗГ-450-9В для ГТД АИ-9В-1Т;
- БЗГ-9М для ГТД АИ-450М с СТГ СТГ9М-1.

БЗГ обеспечивают управление электрическими стартер-генераторами постоянного тока (далее по тексту – СТГ) производства Франции (THALES P/N 8260-3500), России (СТГ9М-1, СТГ-3) и Украины (8260-12УД, 8260-9УД, СТГ-150УД) в стартерном и генераторном режимах, выполняя следующие функ-

ции:

- поддержание требуемого тока при запуске;
- включение защит по достижении заданного времени при запуске и в режиме генерирования;
- автоматический перевод СТГ в режим генерирования и последующая стабилизация выходного напряжения СТГ;
- защита СТГ от короткого замыкания по выходам и от перемагничивания;
- обеспечение перекрестного запуска и выравнивание токов двух СТГ на двухдвигательном ЛА – только исполнение БЗГ-450.

Для обеспечения настройки и испытаний БЗГ на площадке АО «Элемент» (в лабораторных условиях) разработан, изготовлен, прошел аттестацию и успешно эксплуатируется стенд, имитирующий взаимодействие СТГ с БЗГ посредством выдачи и приема сигналов, соответствующих заданному режиму работы.

### 1. Постановка задачи

Перед разработчиками стенда стояла задача обеспечить имитацию сигналов, которыми обмениваются СТГ и БЗГ при совместной работе, и управление этими сигналами в ручном или автоматизированном варианте с целью воспроизведения реальных эксплуатационных режимов. В частности, стенд при работе с БЗГ должен был имитировать выдачу и прием следующих сигналов:

- частотный выходной сигнал датчика оборотов, поступающий в БЗГ;

– сигнал датчика тока СТГ, поступающий в БЗГ  
– напряжение постоянного тока от – 5 до +5 В;

– выходное напряжение СТГ (в генераторном режиме), стабилизируемое БЗГ, и входное напряжение (питание) СТГ (в стартерном режиме), контролируемое БЗГ – до 32 В;

– сопротивление обмотки возбуждения СТГ (являющееся нагрузкой для БЗГ, а именно для цепи управления обмоткой возбуждения);

– дискретные сигналы, выдаваемые в БЗГ с панели управления, с исполнительных механизмов и из регулятора двигателя РДЦ-450М;

– прием дискретных сигналов, поступающих от БЗГ (в том числе аварийного) на СТГ, на панель управления и на исполнительные механизмы.

Для обеспечения управления сигналами необходимо было разработать математическую модель СТГ, которая бы учитывала:

– характеристики СТГ, указываемые изготовителем в техническом описании (зависимости момента вращения СТГ от тока якоря, от тока обмотки возбуждения, от скорости вращения и т.п.);

– функциональные зависимости, характеризующие взаимодействие СТГ с двигателем (в стартерном и в генераторном режимах), данные о которых могли быть получены только в результате испытаний в реальных условиях, например, на двигательных стендах АО «Мотор Сич».

Таким образом, перед разработчиками АО «Элемент» в рамках создания стенда, который бы имитировал СТГ как взаимодействующую с БЗГ систему, стояла задача:

– обеспечить аппаратную реализацию приема и выдачи стендом сигналов, перечисленных выше, с учетом доступности контроля указанных сигналов поверенными средствами измерительной техники на любом этапе работы со стендом;

– провести экспериментальные исследования работы СТГ с реальным двигателем и по их результатам сформировать математическую модель;

– интегрировать полученную математическую модель в состав стенда.

Дополнительно следует учесть, что при работе СТГ ток в обмотке возбуждения СТГ достигает значений 10 – 12 А, а генерируемый ток – 600 А. Очевидно, что ток в несколько сотен ампер недоступен для прямой реализации в рамках лабораторного (фактически настольного) стенда и требует специальных решений.

Кроме того, уже после решения перечисленных задач, когда стенд был изготовлен и обеспечил все ранее планировавшиеся испытания в части проверки функций отдельно взятого БЗГ, возникла дополнительная задача – имитировать ситуацию перекрест-

ного запуска и выравнивания токов двух СТГ, работающих на общую бортовую сеть в условиях двухдвигательного ЛА (рис. 1). Эта задача была решена в рамках модернизации стенда.

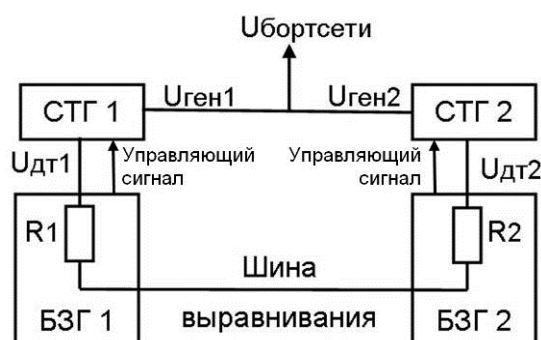


Рис. 1. Упрощенная схема работы двух СТГ на общую бортовую сеть двухдвигательного ЛА

## 2. Результаты

Общий вид стенда показан на рис. 2. На лицевой панели расположены элементы управления, в том числе тумблер переключения на ручной или автоматизированный вариант, а также индикаторные лампочки и экран, на который при работе стенда выводится информация о текущих значениях параметров и сообщения оператору.

Структурная схема показана на рис. 3. Базовым элементом структуры стенда-имитатора является микроконтроллер. Специально разработанное программное обеспечение содержит математическую модель СТГ, сформированную по результатам анализа баз данных испытаний, проведенных на двигательных стендах АО «Мотор Сич»

Стенд-имитатор обеспечивает прием трех дискретных сигналов от БЗГ (DI – входные дискретные сигналы; DO – выходные) и выдачу 11 дискретных сигналов. Выходные сигналы имитируют:

- сигнал «Запуск» от РДЦ-450М;
- панель управления СТГ (пять сигналов);
- контакты реле «Запуска» СТГ (два сигнала);
- сигналы обеспечения перекрестного запуска (два сигнала);

– сигнал управления выравниванием токов.

Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) в составе стенда обеспечивает прием от БЗГ напряжения управления обмоткой возбуждения и преобразует его в цифровой вид для передачи в микроконтроллер.

Клеммы в верхней части стенда над экраном обеспечивают возможность контролировать поверенными средствами измерительной техники параметры, характеризующие процесс, а именно:



Рис. 2. Общий вид стенда-имитатора для настройки и проверки БЗГ

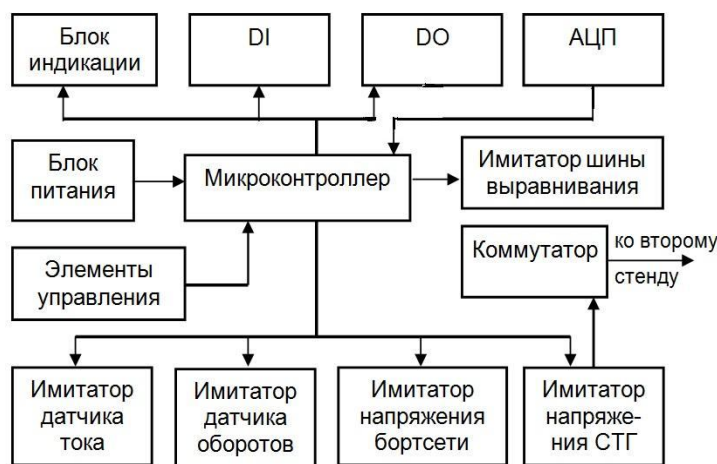


Рис. 3. Структурная схема стенда-имитатора

- напряжение возбуждения;
- напряжение СТГ;
- сигналы с имитаторов датчика тока и датчика оборотов;
- напряжение выравнивания;
- напряжение бортсети.

Таким образом, стенд обеспечивает воспроизведение (имитацию) в условиях лабораторных испытаний процесса управления СТГ как в стартерном, так и в генераторном режимах. Иллюстрацией работы стенда может служить сравнение данных, взятых из базы данных испытаний, проведенных в АО «Мотор Сич» с реальным двигателем, и взятых из базы данных испытаний, проведенных в АО «Элемент» на стенде имитаторе – рис. 4.

Имитатор шины выравнивания и коммутатор, подключающий к работе второй стенд-имитатор,

включены в состав стенда на этапе его модернизации для обеспечения проверки выравнивания токов двух СТГ при имитации параллельной работы двух СТГ на двухдвигательном ЛА.

Разработаны два метода имитации параллельной работы – программный (более простой в реализации, но имеющий ограничения) и аппаратный (максимально приближенный к реальной работе в заданном режиме). При аппаратном методе задействован коммутатор, а имитатор шины выравнивания не используется.

При использовании программного метода задействован имитатор шины выравнивания (второй стенд не подключают). Имитация шины выравнивания – это суть программного метода, который основан на фиксации напряжения генерации на уровне 28,5 В и использовании напряжения управления

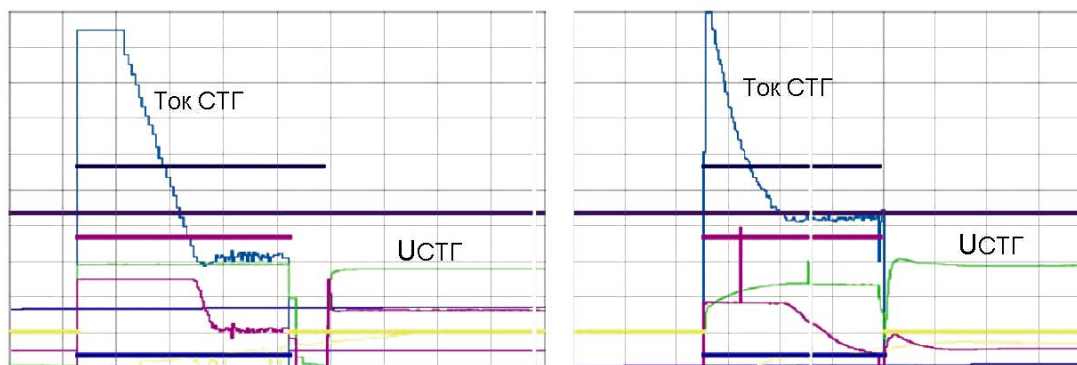


Рис. 4. Графики, иллюстрирующие процесс запуска СТГ с последующим переходом в генераторный режим при испытаниях с реальным двигателем (слева) и на стенде-имитаторе (справа)

обмоткой возбуждения для изменения тока генератора до требуемого уровня сигнала на шине выравнивания. Это обеспечивает настройку БЗГ-450, но не позволяет проанализировать работу двух БЗГ-450 в параллельном режиме.

Суть аппаратного метода – использование реальной шины выравнивания и имитация нагрузки бортовой сети с использованием двух стендов-имитаторов, с встроенными источниками напряжения генерации, имитирующими СТГ. Каждый из двух испытываемых БЗГ-450 управляет одним из двух источников, которые соединены параллельно через нагрузки. БЗГ-450 регулирует выходное напряжение источника так же, как напряжение генерации реального СТГ в эксплуатации.

На нагрузках формируется ток, пропорциональный реальному току СТГ (применяется масштабирование токов, поскольку реальные значения достигают сотен ампер), который преобразуется в сигнал датчика тока, поступающий в БЗГ-450. Стремясь выровнять сигналы с датчиков тока относительно шины выравнивания, БЗГ-450 обеспечивают тем самым выравнивание токов.

Каждый из описанных методов имеет свои преимущества и недостатки.

При использовании программного метода работа ведется с одним БЗГ-450 и одним стендом-имитатором, что упрощает настройку БЗГ-450 по каналам измерения сигналов с шины выравнивания и с датчика тока. В свою очередь аппаратный метод максимально приближен к реальной параллельной бортовой сети. Наилучший эффект достигается путем комбинации двух описанных методов, что и было реализовано в описываемом стенде-имитаторе.

Итак, разработанный стенд обеспечивает выполнение на площадке АО «Элемент» всего комплекса работ по настройке и проверке параметров и функций БЗГ, включая функцию выравнивания токов двух СТГ для исполнения БЗГ-450.

## Заключение

В результате проведенных АО «Элемент» работ разработан и изготовлен стенд, представляющий собой аппаратно-программный комплекс с интегрированной математической моделью СТГ авиационных ГТД, имитирующий СТГ как систему, взаимодействующую с блоком запуска и генерирования БЗГ и обеспечивающий весь комплекс испытаний БЗГ на площадке АО «Элемент», включая проверку выравнивания токов двух СТГ при параллельной работе в генераторном режиме и обеспечение перекрестного запуска на двухдвигательном ЛА.

## Литература

1. Регулятор двигателя АИ-450М – результаты разработки и квалификации на категорию А [Текст] / Г. С. Ранченко, А. Г. Буряченко, В. М. Грудинкин, Н. Л. Голубев, В. В. Данилов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2014. – №10 (117). – С. 93 – 98.
2. Буряченко, А. Г. Стенд-имитатор турбовального двигателя АИ-450М для испытаний регулятора двигателя. Метрологическое обеспечение и аттестация стенда [Текст] / А. Г. Буряченко, В. М. Грудинкин, Д. С. Бурунов // *Вестник двигателестроения*. – 2015. – № 2. – С. 95 – 101.

## References

1. Ranchenko, G. S., Burjachenko, A. G., Grudinkin, V. M., Golubev, N. L., Danilov, V. V. Regulator dvigatelja AI-450M – rezultaty razrabotki i kvalifikacii na kategoriju A [AI-450M Engine regulator - results of development and qualification category A]. *Aviacionno-kosmicna tehnika i tehnologia - Aerospace technic and technology*, 2014, no. 10 (117), pp. 93 – 98.
2. Burjachenko, A. G., Grudinkin, V. M., Burunov, D. S. Stand-imitator turboval'nogo dvigatelja AI-450M dlja ispytanij reguljatora dvigatelja. Metrologicheskoe obespechenie i attestacija stenda [The

stand-simulator of the turboshaft engine AI-450M for testing the engine regulator. Metrological support and attestation of the stand]. *Vestnik dvigatelestroenija*, 2015, no. 2, pp. 95 – 101.

*Поступила в редакцию 11.04.2018, рассмотрена на редколлегии 27.07.2018*

### СТЕНД-ІМІТАТОР СТАРТЕР-ГЕНЕРАТОРА З ФУНКЦІЄЮ ІМІТАЦІЇ РОБОТИ ДВОХ СТАРТЕР-ГЕНЕРАТОРІВ НА СПІЛЬНУ БОРТОВУ МЕРЕЖУ

*А. Г. Буряченко, Г. Ф. Цалимов, А. А. Царев*

Описані результати розробки спеціалізованого випробувального обладнання – стенду, що імітує електричний стартер-генератор постійного струму і призначений для налаштування і перевірки в лабораторних умовах у повному обсязі параметрів і функцій блоку запуску і генерації (БЗГ). Висвітлені питання формування математичної моделі стартер-генератора, вбудованої у стенд-імітатор. Наведена і описана структура стенду. Особлива увага приділена етапу модернізації стенду з метою забезпечення перевірки перехресного запуску і вирівнювання токів двох стартер-генераторів на дводвигунному літальному апараті. Наведені основні характеристики стенду-імітатора і освітлені досвід та результати застосування у процесі розробки, виготовлення і випробувань БЗГ.

**Ключові слова:** комплектуючий виріб авіаційної техніки, математична модель, дводвигунний літальний апарат

### STAND-SIMULATOR STARTER-GENERATOR WITH FUNCTION OF IMITATION OF WORK OF TWO STARTER-GENERATORS ON THE GENERAL ONBOARD NETWORK

*A. G. Buryachenko, G. F. Tsalimov, A. A. Tsarev*

Results of development of the specialized test equipment are described. This equipment (developed by specialists of enterprise “Element”) is the stand-simulator which simulates an electric starter-generator of a direct current and is intended for adjustment and testing in laboratory conditions in full parameters and functions of the block of start and generating which is the development of enterprise “Element” too. The basic characteristics of the stand-simulator are shown and experience and results of its application during development, manufacturing and tests the block of start and generating are covered. This stand-simulator is the hardware-software complex simulating the starter-generator as a system which interacts with the block of start and generating by electrical signals interchange. Questions of formation of mathematical model of the starter-generator which has been integrated in the stand-simulator are reflected. Mathematical model was formed as a result of the starter-generator tests with the real aircraft engine and with the block of start and generating. These tests were fulfilled on the engine test bench of specialized enterprise “Motor Sich”. The structure of the stand is given and is described the same way as the input and output electrical signals which are provided by stand-simulator during the process of the block of start and generating adjustment and testing. The special attention is given to a stage of modernization of the stand-simulator with the purpose of maintenance of checking of cross start and alignment of currents of two starter-generators on two-engine aircraft. Two methods of checking of cross start are applied in the stand-simulator. The one of these methods can be called software-method and the second is so-called hardware-method. The hardware-method is close to the real conditions as much as possible. These two methods are described, advantages and disadvantages of each one are illustrated and the conclusion concerning the using both of them is substantiated. The results of the stand-simulator application for block of start and generating tests are verified by the comparison with the results of the real tests of that block with the starter-generator and with the real engine.

**Keywords:** component unit of the aircraft unit type, mathematical model, two-engine aircraft

**Буряченко Анна Григорьевна** – главный метролог АО «Элемент», Одесса, Украина, e-mail:annaodessa55@gmail.com.

**Цалимов Григорий Федорович** – канд. техн. наук, старший научный сотрудник, АО «Элемент», Одесса, Украина, e-mail:odessa@element.od.ua.

**Царев Андрей Анатольевич** – инженер-электроник АО «Элемент», Одесса, Украина, e-mail:odessa@element.od.ua

**Burjachenko Anna Hryhorievna** – Chief Metrologist, JSC “Element”, Odessa, Ukraine e-mail:annaodessa2007@rambler.ru.

**Tsalimov Grigoriy Fedorovich** – Doctor PhD, Senior Researcher, JSC “Element”, Odessa, Ukraine, e-mail:odessa@element.od.ua

**Tsarev Andrey Anatolievich** – engineer electronic, JSC “Element”, Odessa, Ukraine, e-mail:odessa@element.od.ua