

УДК 681.142

С.В. Лозня<sup>1</sup>, М.И. Торхов<sup>1</sup>, С.А. Пустовой<sup>1</sup>,  
В.А. Седристый<sup>2</sup>, Ю.В. Черкасов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Общество с ограниченной ответственностью “Котрис”, Украина,*  
<sup>2</sup>*Государственное предприятие “Ивченко - Прогресс”, Украина*

## АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ДИАГНОСТИКА И НАСТРОЙКА САУ ПРИ МОТОРНЫХ ИСПЫТАНИЯХ ТРДДФ

Предложена процедура выполнения автоматической диагностики сбоя измерительных каналов САУ, базирующаяся на идентификации в реальном времени авторегрессионных моделей сигнала со скользящим средним. Предложена процедура автоматизированной настройки алгоритмов фильтрации сигналов измерительных каналов замкнутых контуров электронной части САУ с применением оптимальных цифровых фильтров Калмана и Аккермана. Рассмотрены основные этапы выполнения автоматизированной настройки параметров замкнутых и разомкнутых контуров управления ТРДДФ на примере контуров управления реактивным соплом и дозаторами форсажного топлива. Приведенные подходы базируются на аппаратно-программном комплексе автоматизации испытаний двигателей КАИ-25Ф, созданном для решения задач сопровождения разработки и испытаний контуров управления соплом и форсажом двигателя АИ222-25Ф.

**Система автоматического управления, аппаратно-программный комплекс автоматизации испытаний двигателей, автоматизированная диагностика и настройка параметров**

### Введение

Обоснование структуры, синтез и настройка параметров электронных систем автоматического управления (САУ) является одной из наиболее ответственных, трудоемких и сложных проблем на этапе создания и доводки современных авиационных двигателей (АД), характеризующихся большим числом одновременно регулируемых параметров. Решение ее в значительной степени зависит от качества созданных математических моделей (ММ) двигателя и гидромеханических агрегатов САУ, уровня оснащённости моторных стендов специальными комплексами и системами, позволяющими автоматизировать сложные процедуры настройки и оптимизации параметров регуляторов разомкнутых и замкнутых контуров управления авиационным двигателем.

### 1. Формулирование проблемы

В настоящее время настройка параметров САУ производится разработчиками на полунатурных и моторных стендах АД, при этом оптимальность настройки определяется опытом разработчика, а созданные ММ в основном применяются для оценки

качества подобранных параметров [1,2].

Актуальной задачей является разработка процедур автоматизированной настройки параметров замкнутых и программных контуров управления АД с целью повышения качества настройки САУ и расширения ее возможностей на этапе серийных испытаний.

### 2. Решение проблемы

Автоматизированная диагностика и настройка параметров САУ турбореактивного двигателя с форсажной камерой сгорания (ТРДДФ) при моторных испытаниях двигателя реализованы на базе аппаратно-программного комплекса автоматизации испытаний КАИ-25Ф, созданного для решения задач сопровождения разработки и испытаний контуров управления соплом и форсажом двигателя АИ222-25Ф.

В состав аппаратной части комплекса КАИ-25Ф входят (рис.1):

- модуль сопряжения с объектом, обеспечивающий нормализацию и гальваническую развязку входных сигналов;
- промышленный компьютер на PC-платформе,

работающий под управлением операционной системы Windows XP;

- модуль оцифровки сигналов на базе RISK-процессорной платы аналого-цифрового преобразования (АЦП);

- модуль цифро-аналогового преобразования (ЦАП) для формирования управляющих сигналов;

- модуль имитации сигналов преобразователей первичной информации ТРДДФ;

- модуль последовательного канала связи со стендовым оборудованием по цифровому протоколу ARINC 429;

- модуль последовательного канала связи с электронным регулятором двигателя по последовательному цифровому интерфейсу.

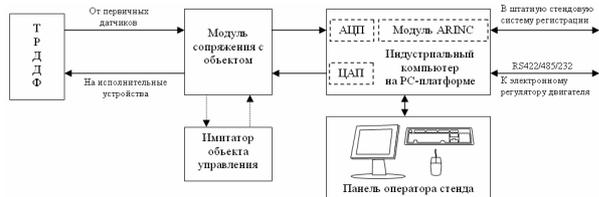


Рис.1. Состав аппаратной части комплекса КАИ-25Ф

Реализованная на базе данного комплекса система автоматизированной диагностики и настройки САУ ТРДДФ позволяет выполнять:

- сбор, архивирование и анализ данных моторных испытаний;

- автоматическую диагностику сбоев измерительных каналов САУ ТРДДФ;

- автоматизированную настройку алгоритмов фильтрации сигналов измерительных каналов замкнутых контуров электронной части САУ;

- автоматизированную настройку параметров замкнутых контуров управления ТРДДФ;

- автоматизированную настройку параметров программно-задающих устройств, управляющих запуском форсажной камеры сгорания (ФКС), противомпажной системы, системы заполнения коллекторов ФКС и др.

### 2.1. Подсистема сбора, анализа и архивирования информации

Функции сбора информационных сигналов и преобразования их в унифицированные сигналы 4-20мА выполняет модуль сопряжения с объектом (рис.1). Нормированные сигналы оцифровываются модулем АЦП с частотой 40 Гц и масштабируются в значения физических величин, размерность которых оптимальна для отображения и работы последующих подсистем комплекса.

По каналу ARINC 429 обеспечивается передача регистрируемой комплексом информации в штатную стендовую систему регистрации. Через интерфейс RS422/485/232 осуществляется взаимодействие комплекса с электронным регулятором двигателя.

Все результаты опроса каналов АЦП, а также расчетные параметры и переменные, в автоматическом режиме записываются в архивную базу данных комплекса.

В комплексе имеется модуль отображения трендов реального времени. Модуль трендов является сетевым приложением, и может функционировать на удаленном компьютере, подключенном посредством стандартного сетевого интерфейса Windows.

Файлы архивной базы данных имеют стандартный формат электронных таблиц "\*.csv". Данный формат поддерживается такими программами как Microsoft Office Excel, Open Office Calc и др. Помимо представленных программ, поддерживающих просмотр файлов архива, в комплексе имеется интегрированное средство работы с файлами архивов – "StorageKAI25F". Данный модуль представляет собой средство автоматической обработки, просмотра и анализа архивных данных, со следующими функциональными возможностями: трендовый анализ, ZOOM-анализ, маркерный анализ, скроллинг трендов, распечатка отчетов, экспорт данных испытаний.

### 2.2. Автоматическая диагностика сбоев измерительных каналов САУ

Принцип формирования диагностического сигнала исправности измерительного канала САУ ТРДДФ основан на идентификации в реальном времени мо-

делей сигнала и оценке качества прогнозирования значений сигнала с применением полученной модели.

В качестве моделей временного сигнала измерительных каналов применяются авторегрессионные модели со скользящим средним. При появлении дефекта измерительного канала модель стационарного временного сигнала дает существенные ошибки прогноза в сравнении с измеренным сигналом, что свидетельствует об отказе. Дефект регистрируется в виде увеличения шума ошибок прогнозирования.

В качестве примера рассмотрим зарегистрированные тренды параметров при испытаниях замкнутого контура управления степенью повышения давления воздуха за вентилятором (рис.2) с воздействием на площадь сопла (рис.3) ТРДДФ.

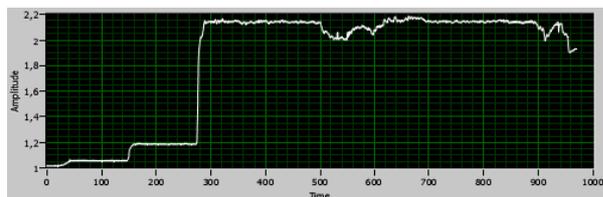


Рис.2. Временной сигнал исправного канала давления воздуха за вентилятором ТРДДФ

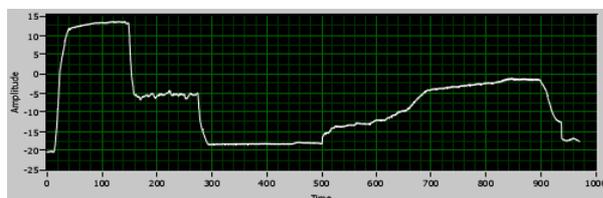


Рис.3. Изменение положения сопла при исправном канале давления воздуха за вентилятором ТРДДФ

При нарушении контакта в разъемах измерительного канала давления воздуха за вентилятором САУ ТРДДФ, как видно из рис.4, возможно появление скачкообразных изменений сигнала, не превышающих 1,5% от диапазона измерения, и соизмеримых с погрешностью измерительного канала. Такой низкий уровень сбоев не пригоден для отсева допусковыми и перекрестными методами контроля, и в то же время, приводит к видимым отклонениям положения управляющего органа замкнутого контура стабилизации степени повышения давления воздуха за вентилятором (рис.5).

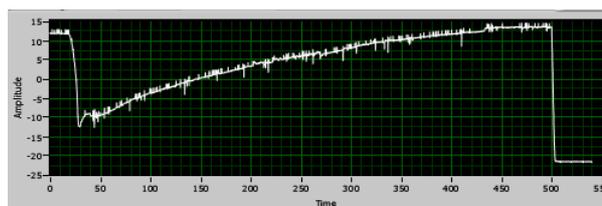


Рис.4. Временной сигнал канала давления воздуха за вентилятором ТРДДФ при наличии дефекта в разъеме АЦП

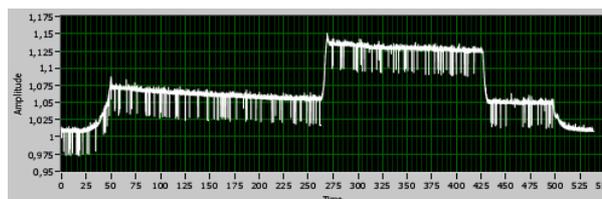
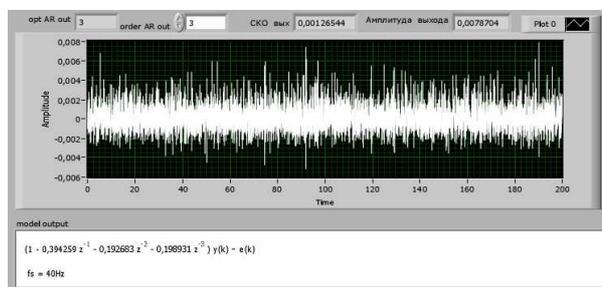
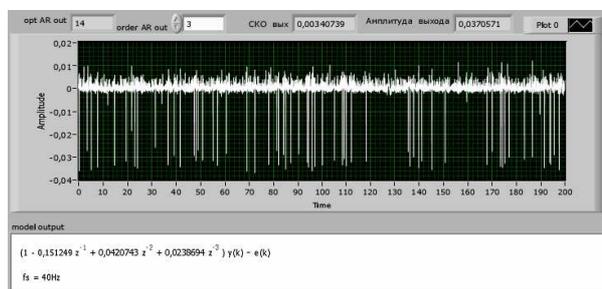


Рис.5. Изменение положения сопла ТРДДФ при наличии дефекта в разъеме АЦП

Для полученных исходных сигналов идентифицируются авторегрессионные модели и определяются ошибки прогноза. Как видно из рис.6, А), максимальная амплитуда ошибок прогноза для исправного канала измерения давления не превышает 0,2% от диапазона измерения.



А)



Б)

Рис.6. Авторегрессионная модель и ошибка прогнозирования: А) – исправного измерительного канала; Б) – неисправного измерительного канала

В то же время для отказавшего канала давления за вентилятором ошибки прогноза составляют по-

рядка 1% от диапазона измерения, то есть в 5 раз превышают аналогичную величину в исправном канале, что уже вполне достаточно для реализации допусковых процедур контроля (рис.6, Б).

Преимуществами используемой технологии диагностики каналов является ее достаточная вычислительная эффективность, так как идентификация авторегрессионных моделей не требует итеративных оптимизационных процедур, а результирующая модель всегда устойчива.

**2.3. Автоматизированная настройка алгоритмов фильтрации сигналов измерительных каналов САУ**

Фильтрация измеренных сигналов осуществляется с применением оптимальных цифровых фильтров Калмана и Аккермана. Автоматизированная процедура настройки фильтров измерительных каналов на примере сигналов измеренного давления топлива и скорости его нарастания в пусковом коллекторе ФКС включает:

1. Выбор участка трендов заданного положения дозатора и измеренного давления топлива из архива моторных испытаний (рис.7).

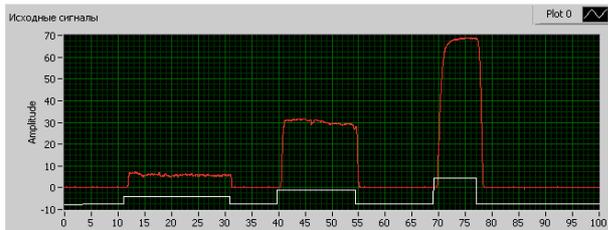


Рис.7. Оциллограмма изменения заданного положения дозатора и измеренного давления топлива в коллекторе

2. Автоматическая идентификация модели давления топлива и скорости его изменения по заданному положению дозатора (рис.8) и оценка качества моделирования (рис.9).

$$\begin{bmatrix} dx(k) \\ y(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -28,3502 & -101,495 & 5,62702E-14 & -6,94025E-15 & -5,97134E-14 & -4,2817E-14 & -2,23418 \\ 101,495 & -28,3502 & -8,17492E-14 & -3,84394E-15 & -2,9366E-14 & -3,72308E-15 & 1,50643 \\ 1,26315E-14 & -1,34456E-14 & -1,58278 & -0,499747 & -5,53522E-15 & 1,42539E-14 & 0,0072236 \\ -1,41326E-15 & 1,0341E-13 & 0,499747 & -1,58278 & -7,11067E-14 & -3,3782E-14 & 1,32662 \\ -3,67686E-14 & -7,97212E-14 & 3,83985E-14 & 1,18508E-14 & -16,8407 & -51,2823 & -1,6127 \\ -4,43786E-14 & -5,21472E-15 & 8,68983E-15 & 7,30357E-15 & 51,2823 & -16,8407 & 0,609897 \\ 0,2245 & -0,336537 & -22,9285 & -0,706829 & -0,610095 & -0,338416 & 0,0025711 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ u(k) \end{bmatrix}$$

Рис.8. Непрерывная модель состояния дозатора

пускового коллектора ФКС

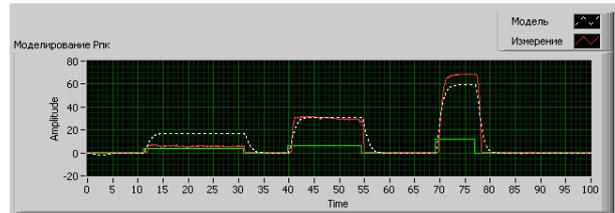


Рис.9. Оценка качества модели состояний динамики давления пускового коллектора

3. Синтез оптимального вектора усиления и на его основе – параметров наблюдателя (рис.10), обеспечивающего заданное размещение полюсов наблюдателя (алгоритм Аккермана) или оптимальную оценку при наличии шумов измерений (фильтр Калмана).

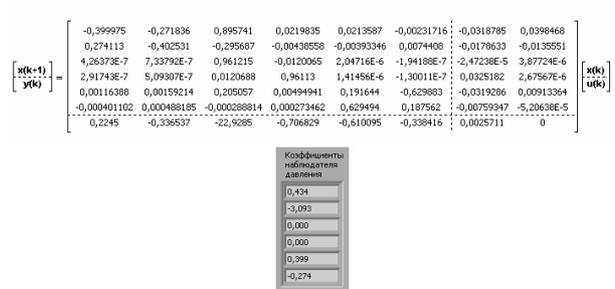


Рис.10. Дискретный наблюдатель Аккермана для оценки давления топлива в пусковом коллекторе

4. Анализ качества работы фильтра при имитации сигнала с шумами датчика давления (рис.11).

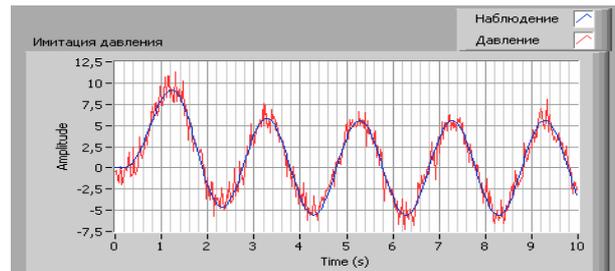


Рис.11. Имитация сигнала с шумами датчика давления топлива

**2.4. Автоматизированная настройка параметров замкнутых контуров управления ТРДДФ**

Автоматизированная настройка параметров замкнутых контуров управления ТРДДФ основывается на базе моделей, полученных при настройке фильтров измеренных сигналов и на примере контура стабилизации давления форсажного коллектора

включает:

1. Синтез для полученной модели параметров ПИД-регулятора, обеспечивающего заданные технические требования к качеству переходных процессов (рис.12).

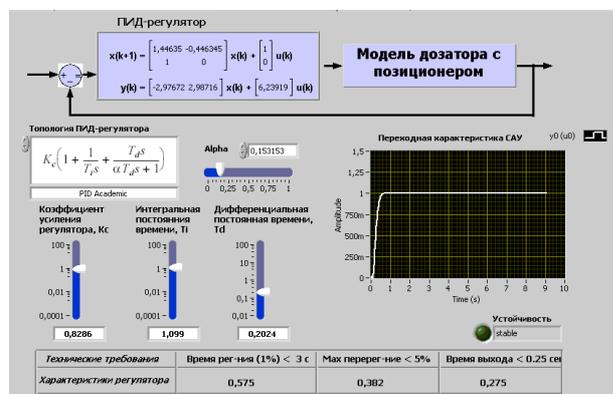


Рис.12. Синтез ПИД-регулятора положения дозатора пускового коллектора

2. Анализ качества переходных процессов при имитации динамики САУ с учетом реальных ограничений на управляющие воздействия (рис.13).

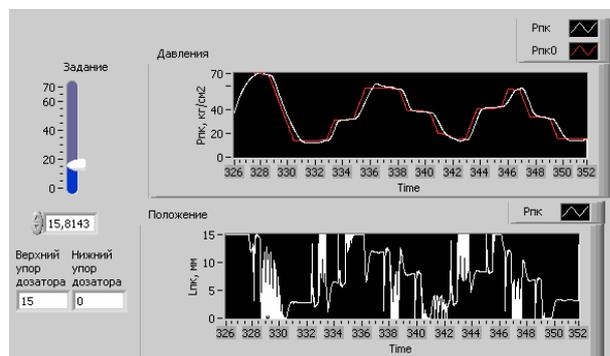


Рис.13. Имитация работы замкнутого контура САУ

### 2.5. Автоматизированная настройка параметров программных контуров управления

Основными этапами автоматизированной настройки программных регуляторов на примере программного контура управления соплом являются:

1. Подготовка трендов параметров для настройки программного контура управления соплом ТРДДФ (рис.14).

2. Формирование программы управления соплом (табл.1) по расходу топлива в форсажную камеру  $F_{kr}=f(G_{tf\Sigma})$ .

Таблица 1

Момент времени	Режим	$G_{tf ПК}$ , кг/ч	$G_{tf ВК}$ , кг/ч	$G_{tf НК}$ , кг/ч	$G_{tf \Sigma}$ , кг/ч	$F_{kr_2}$ , см <sup>2</sup>
42:50	ПФ	730	2093	3400	6223	2260
43:25	1,6М	730	1774	2900	5404	2140
43:55	1,5М	730	1375	2275	4380	2000
44:15	Ф	730	1200	2000	3930	1936
44:40	ВК	730	1200	0	1930	1805

3. Имитация работы САУ ТРДДФ при запуске и форсажной приемистости с оценкой газодинамической устойчивости компрессоров.



Рис.14. Снятие программных значений площади критического сечения сопла для площадок дроссельной характеристики ТРДДФ

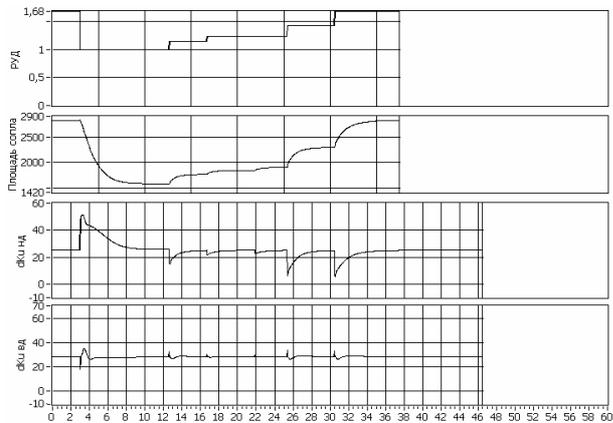
В качестве примера на рис.15, А) приведены результаты имитации работы САУ ТРДДФ на переходных режимах без разомкнутого контура управления соплом по РУД и частоте вращения компрессора и настроенным программным регулятором (рис.15, Б), обеспечивающем снижение используемых запасов газодинамической устойчивости вентилятора вследствие корректного согласования изменения расхода форсажного топлива и площади сопла.

При автоматизированной настройке параметров программного контура управления заполнением коллекторов ФКС выполняются:

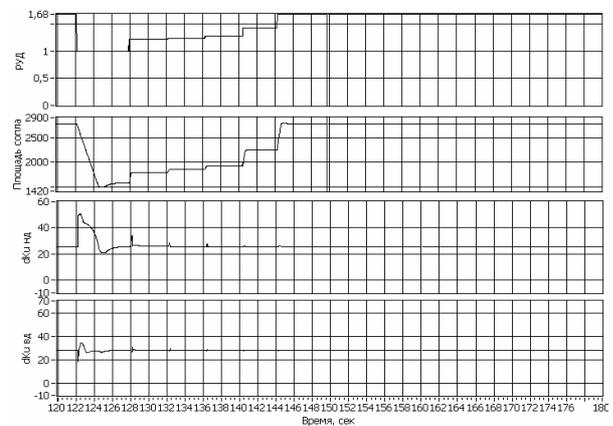
1. Подготовка архивных трендов параметров заданного положения дозаторов и давления топлива перед форсунками с заполнением и без заполнения коллекторов.

2. Автоматическая идентификация на базе методов корреляционного анализа импульсных переходных характеристик и оценка транспортного запаздывания между изменениями заданного положения до-

заторов и давления топлива по количеству коэффициентов, величина которых меньше доверительного уровня оценки импульсной характеристики (рис.16).



А)



Б)

Рис.15. Приемистость ТРДДФ на режимах “М-МФ-ВК-НК-Ф-ПФ”: А) – с не настроенным разомкнутым контуром управления соплом; Б) – с настроенным разомкнутым контуром управления соплом

3. Оценка времени заполнения коллектора по разности запаздывания в трендах с заполнением и без заполнения коллекторов.

4. Формирование программы заполнения коллекторов с учетом  $L_{доз}/dt$ .

**Выводы**

Таким образом, реализованная на базе комплекса автоматизации испытаний КАИ-25Ф система автоматизированной диагностики и настройки параметров САУ при моторных испытаниях двигателя позволяет:

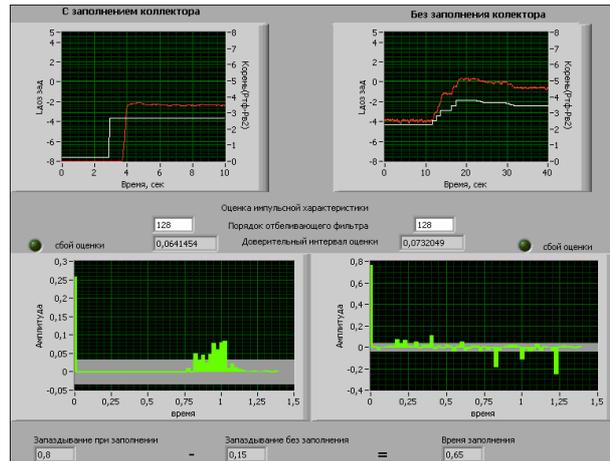


Рис.16. Автоматизированная оценка времени заполнения коллекторов ФКС

- контролировать отказы измерительных каналов САУ, уровень которых находится в диапазоне нормальной работы применяемых в настоящее время допусковых и перекрестных методов контроля;
- повысить качество настройки замкнутых и программных контуров управления САУ;
- сократить потребное время моторных испытаний двигателя за счет автоматизации процедур поиска оптимальных параметров контуров управления САУ.

**Литература**

1. Васильев В.И., Гусев Ю.М., Иванов А.И. и др.. Автоматический контроль и диагностика систем управления силовыми установками летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1989. – 240 с.
2. Интегральные системы автоматического управления силовыми установками самолетов / Под ред. докт. техн. наук проф. А.А.Шевякова. – М.:Машиностроение, 1983. – 283 с.

*Поступила в редакцию 16.06.2008 г.*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Епифанов С.В. Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Харьков.