

УДК 629.735.083.02.004.58 (045)

С. В. ЕНЧЕВ¹, М. О. ОЛАЛИ², Н. В. ОЛАЛИ²¹ *Национальный авиационный университет «НАУ», Киев, Украина*² *Найдж Дельта Университет, Нигерия*

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АВИАДВИГАТЕЛЯМИ В ЗАДАЧАХ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЕЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ

В статье рассмотрена методика оценки качества функционирования системы автоматического управления авиационным двигателем как системы логико-динамического класса для решения задачи идентификации ее технического состояния на базе разработанного критерия - обобщенного показателя качества мультипликативного вида. Основой для разработки критерия явился прямой метод оценки качества функционирования систем по виду переходных процессов. Составлена динамическая модель системы управления авиадвигателями по каналу управления винтовентилятором. Построена поверхность изменения обобщенного показателя качества как функции коэффициента усиления и постоянной времени гидромеханического регулятора.

Ключевые слова: *техническое состояние, идентификация, система автоматического управления двигателем, авиационный двигатель, прямой метод оценки качества, обобщенный показатель качества.*

Введение

Системы автоматического управления двигателями (САУД) воздушных судов (ВС) выполняют важные специфические задачи управления режимами работы и запуском силовых установок, контроля параметров двигателя, и относятся к системам высокой целостности и готовности, которые существенно влияют на вероятность выполнения полетного задания, безопасность полетов и эффективность применения.

При решении задач диагностирования САУД ВС и практической их реализации в условиях авиапредприятий возникает проблема оценки качества этих систем.

1. Постановка проблемы

Алгоритм синтеза САУ на основе минимизации этого функционала при введении дополнительных ограничений подробно рассмотрен А. А. Красовским [1]. Косвенные методы оценки САУ [2, 3] имеют качественный характер и не дают возможности количественно оценить такие основные критерии качества САУ, как быстрдействие и точность. Как правило, они не позволяют однозначно определить форму переходного процесса, что обуславливает существенную неопределенность в решении задачи. При этом оптимальным переходным процессом будет считаться процесс, максимально приближенный к входному возмущению типа «скачок»

при воспроизведении регулируемой величины, что для САУД недопустимо.

Таким образом, метод прямой оценки [4 - 6] позволяет наиболее точно и наглядно оценить техническое состояние САУД по виду переходного процесса. Он не нашел широкого распространения из-за трудностей вычислений, особенно корней характеристических уравнений, что в настоящее время может быть преодолено использованием автоматизированных технологий. В этом случае возможно решение очень важной задачи – диагностирования и прогнозирования САУД без нарушения их функционирования, т.е. без разрывов обратных связей в процессе использования по назначению. Этот фактор является принципиально важным, т.к. метод реализуется современными средствами при высоком уровне «безопасных» отказов и неисправностей систем.

2. Формирование обобщенного показателя качества функционирования системы "САУД-АД"

Основные теоретические положения реализации метода по формированию частных и обобщенного показателей качества (ОПК) «САУД – ВС» изложены в [4], где получены условия исправного, работоспособного и частично работоспособного состояний сложных систем логико-динамического класса. Использование математических моделей для формирования области безотказной работы показывает, что требования к ее границам более жестки,

чем требования, предъявляемые встроенной системой контроля (ВСК). Это естественно, т.к. уровень параметрического резервирования должен поддерживаться обоснованно.

Для формирования обобщенного показателя качества (ОПК) САУ необходимо ограничить число показателей качества переходных процессов, по которым будет производиться оценивание. Применительно к задаче формирования ОПК системы «САУД– АД» [4], следует, что основными показателями качества переходного процесса, определяющими с высокой степенью достоверности характер и параметры кривой переходного процесса (рис. 1), могут служить следующие показатели:

- отношение амплитуд второго и первого выбросов $\mu = M_2 / M_1$;
- перерегулирование $\sigma = M_1 / \gamma_0$ при входном единичном скачке $[\gamma_0] = 1$, $\sigma = M_1$;
- относительная частота собственных колебаний $\bar{\omega}_c = t_{cp} / t_{cob}$;
- время регулирования t_p .

Следующим шагом на пути к получению ОПК является выработка критериев, приводящих показатели переходного процесса к безразмерной и общей для всех форме.

Предлагается построить критерий K_i таким образом, чтобы графически он представлял прямую, начинающуюся в точке $(\Pi_i^{opt}, 1)$, и проходящую через точку $(\Pi_i^{gp}, 0)$. Здесь Π_i^{opt} , Π_i^{gp} обозначают соответственно оптимальное и граничное значения рассматриваемого показателя качества переходного процесса. График зависимости критерия K_i от показателя качества Π_i изображен на рис. 2, и как следует из графика, критерий K_i равен для оптимальной величины Π_i единице, для граничной – нулю, для недопустимой – меньше нуля.

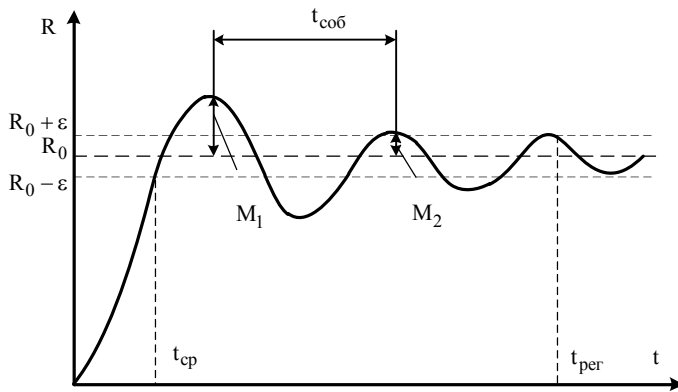


Рис. 1. График переходного процесса

Аналитически критерий K_i можно выразить как:

$$K_i = 1 - \frac{|\Pi_i^{opt} - \Pi_i|}{\Pi_i^{gp} - \Pi_i^{opt}}, \tag{1}$$

что для выбранных показателей качества выглядит следующим образом:

$$K_1 = 1 - \frac{|\mu^{opt} - \mu|}{\mu^{gp} - \mu^{opt}}; \quad K_1 = 1 - \frac{\mu}{\mu^{gp}} \Rightarrow 1;$$

$$K_2 = 1 - \frac{|\sigma^{opt} - \sigma|}{\sigma^{gp} - \sigma^{opt}}; \quad K_2 = 1 - \frac{\sigma}{\sigma^{gp}} \Rightarrow 1;$$

$$K_3 = 1 - \frac{|\bar{\omega}_c^{opt} - \bar{\omega}_c|}{\bar{\omega}_c^{gp} - \bar{\omega}_c^{opt}}; \quad K_3 = 1 - \frac{\bar{\omega}_c}{\bar{\omega}_c^{gp}} \Rightarrow 1;$$

$$K_4 = 1 - \frac{|t_p^{opt} - t_p|}{t_p^{gp} - t_p^{opt}}; \quad K_4 = 1 - \frac{t_p}{t_p^{gp}} \Rightarrow 1.$$

Оценку качества САУ предлагается осуществлять по ОПК, равному

$$ОПК = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4. \tag{2}$$

При сформулированном выше в качестве ограничений по качеству переходного процесса понятии отказа для САУД, ОПК как критерий качества функционирования является мерой, определяющей области:

- безотказной работы:

$$ОПК = [0, 1]; \tag{3}$$

$$X = [K_1 > 0] \wedge [K_2 > 0] \wedge [K_3 > 0] \wedge [K_4 > 0] \Rightarrow 1;$$

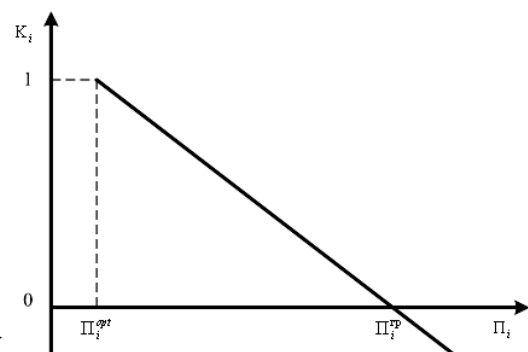


Рис. 2. Зависимость критерия качества K_i от показателя качества Π_i

– неработоспособных (отказных) состояний:

$$\text{ОПК} = -1;$$

$$\bar{X} = [K_1 < 0] \wedge [K_2 < 0] \wedge [K_3 < 0] \wedge [K_4 < 0].$$

Качество функционирования САУД определяется интервалом $[0, 1]$, при $\text{ОПК} = 1$ имеем дело с оптимальным переходным процессом, при $0 \leq \text{ОПК} < 1$ переходный процесс в САУД протекает с потерей эффекта функционирования; при $\text{ОПК} = -1$ переходный процесс имеет желаемый характер (оптимальный процесс). При $\text{ОПК} = -1$ согласно критериям формулировки в системе наступает отказ (неработоспособные состояния).

Идентифицируя состояния системы, можно говорить, что при $\text{ОПК} = 1$ состояние САУД исправно, т.е. выполняются основные и второстепенные требования; при $\text{ОПК} = [0, 1]$ система работоспособна и функционирует с частичной потерей качества («продолжающаяся работа»). Обобщенный показатель качества позволяет не только идентифицировать работоспособные состояния системы, но также в определенной мере ответить на вопрос о ее техническом состоянии.

Уравнение (3) идентифицирует работоспособные состояния «САУД – АД» и позволяет косвенным образом оценить отклонение основных параметров системы через частные критерии качества от их оптимальных значений. При значениях ОПК , близких к нулю даже небольшое отклонение хотя бы одного параметра системы может привести к переходу одного из критериев K_i в зону отрицательных чисел, что однозначно связано с переходом «САУД – АД» в неработоспособное состояние.

Таким образом, величина ОПК непосредственно связана с надежностью системы (отказоустойчивость, безотказность), а оптимальный выбор путем изменения параметров системы позволяет повысить ее. Иными словами, при помощи предложенного ОПК идентифицируются уровни параметрического резервирования САУД (уровни выходного эффекта системы).

3. Разработка динамической модели САУ винтовентилятора

Рассмотрим задачу разработки динамической модели канала управления частотой вращения винтовентилятора системы СУ-77. Канал управления состоит из следующих звеньев:

- программный задатчик скорости вращения (ЭСУ-27);
- измерительное устройство 1 (датчик $\alpha_{\text{РУД}}$);

- измерительное устройство 2 (датчик $n_{\text{ТВВ}}$);

- гидроусилитель;
- исполнительный механизм (гидропривод);
- авиационный двигатель.

Передаточные функции звеньев:

1. Передаточную функцию программного задатчика можно представить в виде звена чистого запаздывания:

$$W_{\text{ЭСУ}}(p) = e^{-\tau p},$$

где постоянная запаздывания τ определяется частотой выполнения алгоритма, $\tau = 0,01$ с.

2. В качестве измерителя угла положения рычага управления двигателем (РУД) $\alpha_{\text{РУД}}$ используется датчик ДБСКТ-250-1, передаточную функцию которого можно представить в виде пропорционального звена:

$$W_{\alpha}(p) = k_1.$$

3. В качестве измерителя скорости вращения турбины винтовентилятора $n_{\text{ВВ}}$ используется датчик ДТА-13, передаточную функцию которого можно представить в виде пропорционального звена:

$$W_n(p) = k_2.$$

4. Передаточная функция гидроусилителя с гидроприводом (гидрорегулятор) представляет собой реальное пропорционально-интегрирующее звено [7]:

$$W_p(p) = \frac{k_p}{T_p p + 1} \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i p} \right),$$

где k_p – коэффициент усиления регулятора, характеризующий эффективность пропорциональной составляющей алгоритма его работы; T_i – постоянная времени, характеризующая при заданном k_p быстродействие интегральной составляющей алгоритма; T_p – постоянная времени, характеризующая инерционность регулятора.

Уравнение динамики регулятора, связывающее формируемое им управляющее воздействие m_p с рассогласованием $\Delta n_{\text{ВВ}}$, имеет вид:

$$\begin{aligned} m_p(p) &= \frac{k_p}{T_p p + 1} \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i p} \right) \cdot \Delta n_{\text{ВВ}}(p) = \\ &= m_n(p) + m_i(p), \end{aligned}$$

где $m_n(p) = \frac{k_p}{T_p p + 1} \cdot \Delta n_{ВВ}(p)$ – пропорциональная составляющая управляющего воздействия, формируемая статической частью регулятора;

$$m_i(p) = \frac{k_p}{T_i p (T_p p + 1)} \cdot \Delta n_{ВВ}(p) \text{ – интегральная}$$

составляющая управляющего воздействия, формируемая астатической частью регулятора

5. Динамические свойства двигателя по данной координате можно выразить через апериодическое звено [7]:

$$W_m(p) = \frac{k_m}{T_m p + 1}.$$

Динамическая модель САУД скоростью вращения винтовентилятора представлена на рис. 3.

Пренебрегая звеном чистого запаздывания, в виду малости постоянной запаздывания, проведя необходимые преобразования, получим:

$$\begin{aligned} (a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0) \cdot n_{ВВ}(p) = \\ = (b_1 p + b_0) \cdot \alpha_{РУД}(p), \end{aligned}$$

где $a_3 = T_i T_p T_T$; $a_2 = T_i (T_p + T_T)$;

$$a_1 = T_i (1 + k_2 k_m k_p); a_0 = k_2 k_m k_p;$$

$$b_1 = T_i k_1 k_m k_p; b_0 = k_1 k_m k_p,$$

а передаточная функция системы

$$\Phi_{\alpha}^n(p) = \frac{n_{ВВ}(p)}{\alpha_{РУД}(p)} = \frac{b_1 p + b_0}{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0}.$$

Уравнение, описывающее динамику канала управления, включает в себя два регулируемых параметра k_p, T_i и при добавлении к нему ОПК (2) оказывается, что искомая область безотказной работы представляется трехмерной фигурой.

4. Определение области безотказной работы САУД по каналу управления винтовентилятором

Согласно проведенным математическим выкладкам, произведем расчет переходного процесса и ОПК с помощью пакета системы символьной математики MathCAD 11A [8]. Характеристика зависимости обобщенного показателя качества ОПК от регулируемых параметров k_p, T_i изображена на рис. 4.

Для точки, являющейся оптимальной, с точки зрения принятого ОПК и настройке системы, построена кривая переходного процесса (рис.2 б). Видно, что она соответствует принятым критериям для системы СУ-77 [4] и отображает не близкий к скачкообразному переходный процесс (как в случае большинства косвенных оценок), а монотонный переходный процесс с заданными параметрами.

Выводы

Применение математического моделирования позволяет идентифицировать задачу оценки технического состояния системы автоматического управления винтовентилятором. Величина ОПК всегда лежит в пределах $0 \leq \text{ОПК} \leq 1$ или равна -1 и она тем больше, чем лучше качество регулирования САУД. При ОПК равной ОПК^{\max} имеет место оптимальный переходный процесс с точки зрения

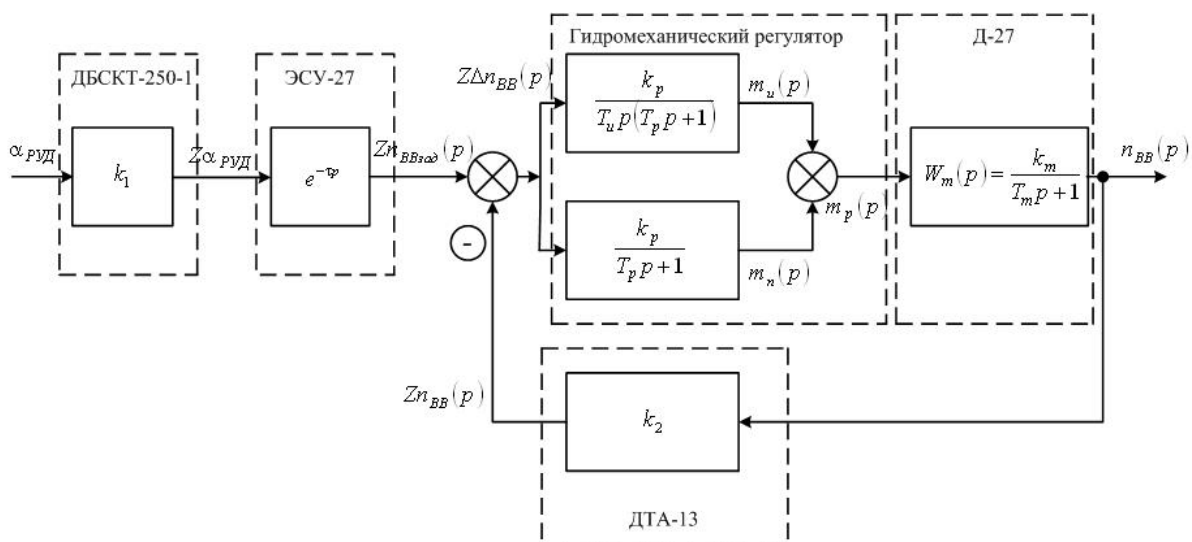


Рис. 3. Динамическая модель САУД скорости вращения винтовентилятора

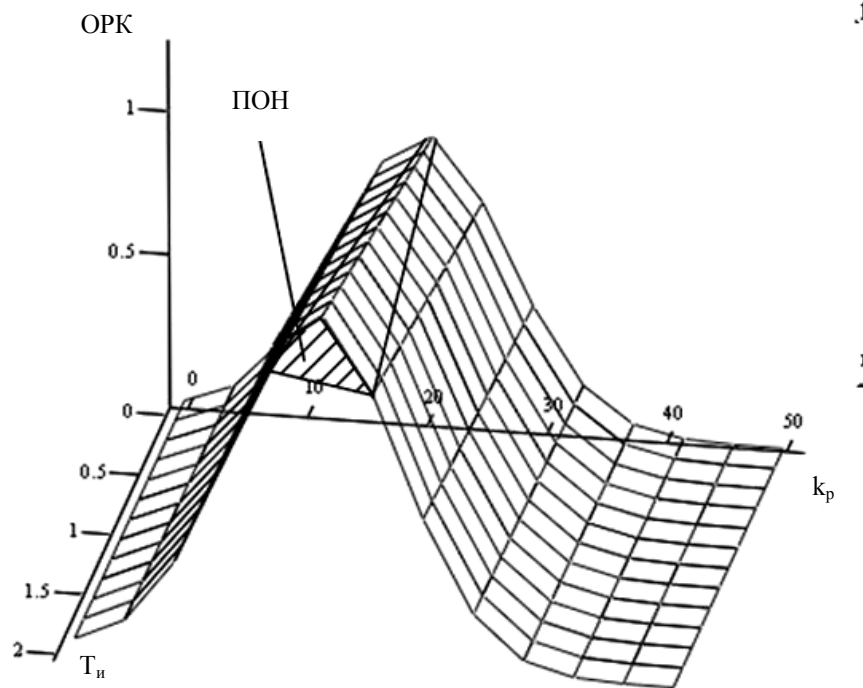


Рис. 4. Характеристика зависимости обобщенного показателя качества от регулируемых параметров k_p, T_n САУД управления скоростью вращения винтовентилятором

принятых показателей качества; при ОПК равной 0 – граничный и при ОПК равной -1 неработоспособное состояние системы. Величина -1 выбрана произвольно и может быть любым числом. Ее задачей является идентификация неработоспособных состояний системы. При такой постановке задачи появляется возможность влиять на надежность системы путем повышения ее параметрического резервирования до требуемого уровня, то есть оптимальным выбором ее параметров.

Литература

1. Красовский, А. А. Автоматическое конструирование контуров управления летательными аппаратами [Текст] / А. А. Красовский. – М. : Машиностроение, 1969. – 240 с.
2. Козлов, В. И. Системы автоматизированного управления летательными аппаратами [Текст] / В. И. Козлов. – М. : Машиностроение, 1979. – 216 с.
3. Иващенко, Н. Н. Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем [Текст] /

Н. Н. Иващенко. – М. : Машиностроение, 1978. – 738 с.

4. Формирование обобщенного показателя качества функционирования логико-динамических систем авионики [Текст] / В. М. Воробьев, В. А. Захарченко, С. В. Енчев, С. В. Кондратенко // Электроника та системи управління : зб. наук. праць НАУ. – Вип. 1. – К., 2005. – С. 106 – 117.

5. Воробьев, В. М. Критерии качества систем автоматического управления полетом воздушных судов [Текст] / В. М. Воробьев, В. Вуйцик // Вопросы оптимального обслуживания и ремонта АиРЭО воздушных судов ГА : сб. науч. тр. КИИГА. – К., 1985. – С. 83-87.

6. Мартин, Ф. Моделирование на вычислительных машинах [Текст] / Ф. Мартин. – М. : Сов. радио, 1987. – 285 с.

7. Климентовский, Ю. А. Системы автоматического управления силовыми установками летательных аппаратов [Текст] / Ю. А. Климентовский. – К. : КВИЦ, 2001. – 400 с.

8. Кирьянов, Д. В. Самоучитель MathCAD 11. [Текст] / Д. В. Кирьянов. – СПб. : БХВ-Петербург, 2003. – 560 с.

Поступила в редакцию 15.06.2014, рассмотрена на редколлегии 17.06.2014

Рецензент: д-р техн. наук, профессор, декан механико-энергетического факультета О. В. Самков, Национальный авиационный университет, Київ.

ОЦІНКА ЯКОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ АВІАДВИГУНАМИ В ЗАДАЧАХ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ЇЇ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ

С. В. Єнчев, М. О. Олалі, Н. В. Олалі

У статті розглянуто методику оцінки якості функціонування системи автоматичного керування авіаційним двигуном як системи логіко-динамічного класу для вирішення завдань ідентифікації її технічного стану на базі розробленого критерію - узагальненого показника якості мультиплікативного вигляду. Основою для розробки критерію з'явився прямий метод оцінки якості функціонування систем по вигляду перехідних процесів. Складено динамічну модель системи управління авіадвигунами по каналу управління гвинтовентилятором. Побудовано поверхню зміни узагальненого показника якості як функції коефіцієнта посилення і постійною часу гідромеханічного регулятора.

Ключові слова: технічний стан, ідентифікація, система автоматичного керування двигуном, авіаційний двигун, прямий метод оцінки якості, узагальнений показник якості.

ESTIMATION OF QUALITY FUNCTIONING CONTROL AVIATION ENGINE SYSTEM IS IN TASKS OF IDENTIFICATION OF ITS TECHNICAL STATE

S. V. Enchev, M. O. Olali, N. V. Olali

In the article the method estimation quality functioning of the automatic control an aviation engine system, as systems of logical-dynamic class, is considered for the decision of tasks identification its technical state, on the base of the developed criterion - generalized index of quality multiplicative kind. Basis for development of criterion was a direct method estimation quality functioning of the systems by appearance transitional processes. The dynamic model of the control aviation engine system is made on the channel of control screw-ventilator. The surface of change the generalized index of quality as functions of amplification factor is built and permanent time of hydro-mechanic regulator.

Keywords: technical state, identification, automatic control an engine system, aviation engine, direct method of estimation quality, generalized index of quality.

Єнчев Сергей Васильевич – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри автоматизації та енергоменеджмента, Аэрокосмический институт Национального авиационного университета «НАУ», Киев, Украина, e-mail: esw@ukr.net.

Олалі Майкл Олала – канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры механико-морской инженерии, Найджа Дельта Университет, Вибельфорс, Нигерия, e-mail: diamant1@ukr.net.

Олалі Наталья Васильевна – канд. физ.-мат. наук, старший преподаватель кафедры математики и компьютерных наук, Найджа Дельта Университет, Вибельфорс, Нигерия, e-mail: diamant1@ukr.net.