

## Библиографические ссылки

1. Гавриленко С. В. Особенности современного этапа развития оптических линий межспутниковой связи / С. В. Гавриленко, Н. Н. Феоктистов, Д. К. Хегай // Приборостроение. – 2008. – Т. 51, № 3. – С. 54–60.
2. Олейник М. П. Оценка требований к угловой ориентации межспутниковых оптических линий связи по навигационным параметрам / М. П. Олейник, А. М. Кулабухов // Вісник Дніпропетр. ун-ту. Сер. : Ракетно-космічна техніка. – 2016. – Т. 24, № 4. – С. 102–107.
3. Лазерная космическая связь / под ред. М. Кацмана. – М. : Радио и связь, 1993. – 240 с.

*Надійшла до редколегії 20.06.2017*

УДК 537.52, 629.78

А. Н. Петренко, В. П. Малайчук

*Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара*

## АВТОМАТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Рассмотрены алгоритмы автоматического контроля текущих параметров электрических ракетных двигательных установок. Определены информативные признаки подсистем ЭРДУ и характер их изменения в процессе работы двигательной установки. Представлены алгоритмы обнаружения скачкообразных изменений информативных признаков при различном объеме априорной информации.

**Ключевые слова:** электрическая ракетная двигательная установка, холловский двигатель, измерение параметров, автоматический контроль, алгоритмы контроля.

Розглянуто алгоритми автоматичного контролю поточних параметрів електричних ракетних двигунних установок. Визначено інформативні ознаки підсистем ЕРДУ і характер їх змін у процесі роботи двигунної установки. Представлено алгоритми виявлення ступеневих змін інформативних ознак при різному обсязі априорної інформації.

**Ключові слова:** електрична ракетна двигунна установка, холловський двигун, вимірювання параметрів, автоматичний контроль, алгоритми контролю.

Algorithms of the parameters automatic control of the electric propulsion engine unit are described. The informative features of the subsystems of the Electric Propulsion Engine Units and the nature of their changes in the process of operation of the propulsion system are determined. The algorithms for detecting jump-like changes in informative features for different volumes of apriority information are presented.

**Keywords:** electric propulsion engine unit, Hall Thruster, measurements of the parameters, automatic control, algorithms of control.

Электрические ракетные двигательные установки (ЭРДУ) находят все более широкое применение при реализации различных космических программ. Основным преимуществом применения ЭРДУ является значительное снижение массы рабочего вещества по сравнению с химическими двигателями малой тяги.

---

© А. Н. Петренко, В. П. Малайчук, 2017

Это обеспечивается значительно большей величиной удельного импульса, обеспечением многократности включения, длительным сроком эксплуатации [1]. ЭРДУ состоит из блоков и подсистем различной физической природы: электрического ракетного двигателя (ЭРД), системы хранения и подачи рабочего вещества (СХП), системы электропитания (СЭП) и системы автоматического управления и контроля (САУ), которая объединяет указанные системы в единое целое.

Наиболее перспективным электрическим ракетным двигателем в настоящее время рассматривается холловский двигатель. В таком двигателе процесс ионизации рабочего вещества осуществляется в скрещенных электрическом и магнитном полях, а ускорение образовавшихся ионов осуществляется продольным электрическим полем [3].

Электрические ракетные двигательные установки требуют сложных алгоритмов управления и контроля. Необходимость применения сложных алгоритмов управления и контроля параметров подсистем ЭРДУ обусловлена спецификой обеспечения электрической энергией космического ЛА, обеспечением надежности работы ЭРДУ в течение длительного срока эксплуатации и стремлением охватить более широкий круг задач, решаемых одной и той же ЭРДУ.

Специфика обеспечения электроэнергией космического аппарата заключается в том, что при длительной эксплуатации в условиях космического пространства солнечные батареи, являющиеся до настоящего времени основным источником электроэнергии для ЭРДУ, подвергаются значительной деградации, в результате чего электрическая мощность существенно снижается. Система автоматического управления и контроля ЭРДУ должна обеспечить оптимальные режимы ЭРДУ в условиях значительного изменения мощности первичного источника электропитания.

В результате длительного автономного функционирования двигательной установки параметры ее подсистем, в частности, электрического ракетного двигателя, системы хранения и подачи рабочего вещества и системы электропитания могут существенно изменяться, вплоть до их отказа. Поэтому система автоматического управления и контроля должна обеспечить поддержание оптимальных режимов работы ЭРДУ при изменении параметров в определенных пределах, а при возникновении отказов отдельных элементов, сформировать сигналы на отключение отказавших элементов и подключение резервных.

Наиболее информативным параметром, характеризующим нормальный режим работы холловского двигателя, является величина разрядного тока ( $I_d$ ), которая характеризует ионизационные процессы в ускоряющем канале двигателя. При этом информация о состоянии работы двигателей с замкнутым дрейфом электронов содержится как в средней величине тока разряда, так и в уровне и частотных диапазонах колебаний разрядного тока [10; 11].

Системы хранения и подачи рабочего вещества, входящие в состав ЭРДУ, могут быть построены на различных физических принципах, но наибольшее распространение в настоящее время получили газовые системы для инертных газов – ксенон (Xe), аргон (Ar). В газовой СХП информативными параметрами являются: значения давлений ( $P_i$ ) в рабочих трактах системы; информация о состоянии клапанов; величина тока нагрева термодросселя ( $I_{тд}$ ); температурные режимы ( $T_i$ ) в различных точках СХП [7].

Система електропитання ЕРДУ содержит целый ряд управляемых и неуправляемых источников электропитания, обеспечивающих электрические режимы работы отдельных подсистем ЕРДУ. О нормальном функционировании того или иного источника можно судить по величинам напряжения ( $V_i$ ) и тока ( $I_i$ ) и их соответствия требуемым значениям [12].

Таким образом, в электрических ракетных двигателях можно измерять вектор переменных, которые характеризуют текущее состояние двигателя, аналогичные векторы переменных могут быть измерены для системы хранения и подачи рабочего вещества, системы электропитания и блока автоматического управления ЕРДУ.

Блок автоматического контроля параметров ЕРДУ, являющийся составной частью блока автоматического управления, должен обеспечить решение следующих задач: сбор информации о текущем состоянии подсистем; обработку текущей информации с целью выявления аварийных и нештатных ситуаций; обработку текущей информации о параметрах подсистем с целью прогнозирования возникновения аварийных ситуаций и т. д.

В табл. 1 приведены основные контролируемые параметры подсистем ЕРДУ и характер их возможного изменения. Анализ характера возможного изменения контролируемых параметров подсистем ЕРДУ показывает, что в блоке автоматического контроля ЕРДУ наряду с алгоритмами допускового контроля, определяющими нахождение контролируемых параметров в заданном поле допусков, должны быть реализованы алгоритмы выявления скачкообразного изменения, а также медленного дрейфа контролируемых параметров с целью принятия решений, предотвращающих возникновение аварийных и нештатных ситуаций в отдельных подсистемах и в ЕРДУ в целом.

Таблица 1

## Информативные признаки подсистем ЕРДУ и характер их изменения

Блок ЕРДУ	Контролируемые параметры	Характерные аномалии
Холловский двигатель: - стационарный плазменный двигатель; - двигатель с анодным слоем	Среднее значение тока разряда ( $I_d$ ). Амплитуда ( $A_i$ ) и частота ( $\omega_i$ ) колебаний напряжения ( $V_d$ ) и тока ( $I_d$ ) разряда.	Скачкообразное изменение, медленный дрейф. Скачкообразное изменение, медленный дрейф.
Газовая система хранения и подачи рабочего вещества	Давление в рабочих трактах СХП ( $P_i$ ). Информация о состоянии клапанов. Ток нагрева термодросселя ( $I_{tr}$ ).	Медленный дрейф. “Открыт – Закрыт”.  Скачкообразное изменение, медленный дрейф.
Источники электропитания	Величины напряжения ( $V_i$ ) и тока ( $I_i$ ) источников электропитания, увеличение амплитуды пульсаций ( $\Delta V, \Delta I$ ).	Скачкообразное изменение, медленный дрейф.

**Математическая постановка задачи автоматического контроля параметров ЕРДУ.** Для автоматического контроля параметров подсистем ЕРДУ используются измерения тех или иных информативных признаков, которые характеризуют функционирование и работоспособность установки. Моделью таких измерений может служить последовательность случайных величин – одномерный случайный сигнал  $X(1), X(2), X(3), \dots, X(k)$  или последовательность случайных векторов  $[X(1)], [X(2)], \dots, [X(k)]$  – многомерный дискретный случайный сигнал, где  $[X(k)] = [X_1(k), X_2(k), \dots, X_m(k)]^T$ ;  $T$  – знак транспонирования. Свойства дискретных сигналов и их использование для решения задач прогнозирования и управления рассмотрены в работе [2].

Очевидно, что измеренные сигналы содержат информацию о состоянии подсистем ЭРДУ, и могут использоваться для решения задач контроля.

Задача автоматического контроля ЭРДУ может быть сформулирована следующим образом. В нормальном режиме работы характеристики дискретных сигналов не меняются и значения их параметров не выходят за установленные границы. Признаком тревоги служат изменения свойств дискретных сигналов. Обнаружение этих изменений и оценка их параметров является основной задачей обработки сигналов [8; 9]. Несмотря на многообразие характера изменения контролируемых сигналов, можно выделить несколько типовых моделей таких изменений.

Наиболее характерными для информационных признаков работы подсистем ЭРДУ являются быстрые изменения (скачки) среднего значения сигнала, ошибки измерения которого – независимые нормальные случайные величины с нулевым математическим ожиданием и известной дисперсией. В частном случае может быть известно направление скачка (вверх, вниз). Скачками могут изменяться дисперсия, параметры законов распределения, сами законы, спектральные (корреляционные) свойства сигналов. При этом задача обработки измерений параметров ЭРДУ состоит в обнаружении изменений, их распознавании, определении момента обнаружения и оценки параметров. По этим данным могут быть построены модели изменений для решения задач контроля, прогноза и управления.

В настоящее время хорошо разработана теория обнаружения и распознавания импульсных сигналов на фоне помех в системах связи, радиолокации, радионавигации [5; 6]. Эти сигналы, как правило, известны с точностью до параметров. Неизвестными являются амплитуда, фаза или частота. Задача сводится к вычислению отношения функций правдоподобия и сравнению его с порогом, значение которого выбирается по критерию Неймана–Пирсона из условия, при котором число ложных тревог не должно превышать заданную величину.

В рассматриваемых задачах контроля вычислить отношение правдоподобия не всегда представляется возможным, так как часто неизвестны ни вид сигнала, ни его параметры, а в ряде случаев неизвестны и характеристики возмущений, действующих на подсистемы ЭРДУ. Проблема обнаружения и оценки изменений свойств стохастических сигналов и динамических систем в настоящее время превратилась в интенсивно развивающееся направление математической статистики.

В работе [8] дан обзор исследований в этой области, рассмотрены алгоритмы последовательного анализа, максимума правдоподобия, на основе непараметрических методов и возможности их применения в сейсмологии, сегментации речи, для анализа геофизических сигналов и электрокардиограмм. Эти и другие методы математической статистики могут быть использованы для обнаружения скачков и трендов, выделения кусочно-постоянных, кусочно-линейных и квадратичных функций, и оценки их параметров в задачах обработки измерений в средствах и системах контроля и технической диагностики разнообразных объектов, в том числе и ЭРДУ. В условиях только качественной априорной информации об ожидаемых изменениях сигналов (увеличение, уменьшение) эффективными являются непараметрические методы оценки однородности выборок измерений по критерию омега-квадрат, на основе  $F$ -распределения Фишера, восстановления самих законов и оценки их параметров [4; 5; 6].

В работе [8] предложено обнаружитель считать оптимальным, если при фиксированном среднем времени между ложными тревогами запаздывание в обнаружении минимально. В системах автоматического контроля технических систем самой важной задачей является обнаружение изменений. Поэтому в отличие от предложенных в [8] алгоритмов здесь исследуются алгоритмы по критерию Неймана–Пирсона: максимум вероятности обнаружения при заданной вероятности ложной тревоги, при этом время запаздывания рассматривается как управляемое ограничение. Это означает, что вероятность обнаружения можно регулировать путем изменения времени задержки, если информация обрабатывается в реальном масштабе времени.

**Математическая постановка задачи обнаружения скачков при нормальных измерениях.** Рассматривается дискретная последовательность измерений некоторого параметра  $X_1, X_2, \dots, X_k$ , где  $X_k = a + \Delta X_k$ ,  $\Delta X_k$  – ошибка измерений. Известно, что закон распределения ошибок – нормальный с нулевым математическим ожиданием и дисперсией  $\sigma^2$ . Параметр  $a$  может принимать два значения  $a_1$  и  $a_2$ , при этом изменение происходит скачком в неизвестный заранее момент времени  $\Delta t K_1$ .

Необходимо, располагая такой априорной информацией, предложить алгоритм обработки измерений для обнаружения скачка и оценки момента его появления –  $K_1^*$ . После обнаружения (принятия решения о наличии скачка) измерения прекращаются. Очевидно, что решение, принятое при  $K_1^* < K_1$  является ошибочным (ложным), а решение при  $K_1^* > K_1$  принимается с запаздыванием, при этом ошибка определения момента скачка равна  $\Delta t (K_1^* - K_1)$ .

Представляются очевидными следующие качественные требования к алгоритму обнаружения:

1) вероятность принятия ошибочного решения  $P_{ор}$  в интервале времени  $0 \leq t < \Delta t K_1$  должна быть достаточно мала;

2) время запаздывания обнаружения  $\Delta t (K_1^* - K_1)$  не должно превышать заданное значение –  $t_3$ .

Приведенные требования являются противоречивыми, это обстоятельство должно учитываться при обосновании алгоритма обработки измерений. В рассматриваемой задаче решения должны приниматься последовательно на каждом шаге по мере поступления измерений. Хорошо известна задача распознавания двух объектов  $A_1$  и  $A_2$  [4]. Если измеряется вектор признаков распознавания  $[X]^T = [X_1, X_2, \dots, X_k]$  и известны условные законы распределения вероятностей случайного вектора  $W([X] / A_1)$  и  $W([X] / A_2)$ , то решающее правило по критерию минимума среднего риска (средней стоимости ошибок) формулируется следующим образом:

1) по измерениям  $[X]$  необходимо вычислить значение отношения правдоподобия  $l([X]) = W([X] / A_2) / W([X] / A_1)$ ;

2) определить порог сравнения  $l_0 = \frac{P_1 C_{12}}{P_2 C_{21}}$ ,

где  $P_1, P_2$  – априорные вероятности появления объектов  $A_1$  и  $A_2$ ;  $C_{12}$  и  $C_{21}$  – стоимости ошибок распознавания принять первый объект за второй и второй за первый;

3) если имеет место неравенство  $l([X]) \geq l_0$ , то принимается решение – объект  $A_2$ ; если  $l([X]) < l_0$ , то должно быть принято решение – объект  $A_1$ .

При использовании такого алгоритма будет минимальным математическое ожидание стоимости ошибок (среднего риска)  $M[C] = P_1 P_{12} C_{12} + P_2 P_{21} C_{21}$ , где  $P_{12}$  и  $P_{21}$  – вероятности принятия ошибочных решений.

Если неизвестны вероятности  $P_1$  и  $P_2 = 1 - P_1$ , то порог сравнения можно выбрать, полагая стоимости ошибок  $C_{12}$  и  $C_{21}$  обратно пропорциональными вероятностями их появления  $P_1$  и  $P_2$ . В этом случае всегда  $l_0 = 1$ .

Второй способ выбора порога – по критерию Неймана – Пирсона: необходимо задать одну из вероятностей ошибок (например,  $P_{12}$ ) и определить величину порога  $l_0$ .

Решение удобно принимать, вычисляя логарифм отношения правдоподобия. В этом случае, если  $Z = \ln l([X])$ , то решающее правило обнаружения объекта  $A_2$  имеет следующий вид:

- 1) по критерию среднего риска  $-Z \geq 0$ ;
- 2) по критерию Неймана – Пирсона  $-Z \geq Z_0$ .

В рассматриваемом случае для независимых измерений условные законы распределения выборки  $[X_k] = [X_1, X_2, \dots, X_k]$  запишутся в виде

$$W([X_k] / A_{1,2}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^k (X_i - a_{1,2})^2\right]. \quad (1)$$

Для логарифмического отношения правдоподобия получаем выражение вида

$$Z(k) = \frac{a_2 - a_1}{\sigma^2} \left[ \sum_{i=1}^k X_i - \frac{k(a_2 + a_1)}{2} \right]. \quad (2)$$

Последовательность  $Z(k)$ ,  $k = 1, 2, \dots$  представляет собой дискретный нормальный случайный сигнал, математическое ожидание которого до скачка ( $k < K_1$ ), как это следует из (2), равно

$$M[Z(k/0)] = M_1(k) = -\frac{(a_2 - a_1)^2}{2\sigma^2} k, \quad 1 \leq k < K_1.$$

Разность  $a_2 - a_1 = \Delta a$  представляет собой величину скачка. Отношение  $\Delta a^2 / \sigma^2 = q^2$  равно отношению мощности скачка к мощности измерительного шума. Поэтому можно записать

$$M_1(k) = -q^2 k / 2, \quad 1 \leq k < K_1 \quad (3)$$

Математическое ожидание  $Z(k)$  после скачка ( $k \geq K_1$ ) запишется в виде

$$M[Z(k/c)] = M_2(k) = M_1(K_1 - 1) + q^2 (k - K_1 + 1) / 2.$$

В результате получаем

$$M_2(k) = q^2 (k - 2K_1 + 2) / 2. \quad (4)$$

Дисперсия  $Z(k)$  не зависит от наличия скачка и равна

$$D[Z(k)] = (a_2 - a_1)^2 k / \sigma^2 = q^2 k. \quad (5)$$

Вероятность принятия решения в момент времени  $\Delta t k$  можно определить как вероятность выполнения неравенства  $Z(k) \geq 0$ :  $P_p(k) = \int_0^{\infty} W(Z(k)) dZ(k)$ .

Используя (3), (4) и (5), получим

$$P_p(k) = \begin{cases} 1 - \Phi(q\sqrt{k}/2), & 1 \leq k < K_1, \\ \Phi\left(\frac{q(k - 2K_1 + 2)}{2\sqrt{k}}\right), & K_1 \leq k < \infty. \end{cases} \quad (6)$$

Анализ выражения (6) показывает, что вероятность принятия ошибочных решений (участок  $1 \leq k < K_1$ ) непрерывно уменьшается и достигает минимума при  $k = K_1 - 1$ . Затем начинается медленное увеличение вероятности обнаружения скачка ( $k \geq K_1$ ). В точке  $k = 2(K_1 - 1)$  вероятность обнаружения равна 0,5, а запаздывание  $-t_3 = \Delta t (K_1 - 1)$ . Совершенно очевидно, что рассмотренный алгоритм не пригоден для практического использования, так как при  $k \rightarrow \infty$   $t_3(k) \rightarrow \infty$ , хотя при этом  $P_p(k) \rightarrow 1$ .

Для уменьшения запаздывания необходимо отбросить (забыть) часть старых измерений. Эту процедуру можно выполнить при помощи  $n$ -мерного подвижного окна, которое из последовательности  $X(k)$  выделяет последовательность  $X(k-n)$ ,  $X(k-n+1)$ ,  $X(k-n+2)$ , ...,  $X(k-1)$ . В этом случае логарифмическое отношение правдоподобия запишется в виде

$$Z(k) = \frac{a_2 - a_1}{\sigma^2} \left[ \sum_{i=1}^n X(k-i) - \frac{n(a_2 + a_1)}{2} \right]. \quad (7)$$

Если на участке в точке  $k$  ( $n \leq k \leq K_1$ ) имеет место неравенство  $Z(k) > 0$ , то такое событие называется ложной тревогой и его вероятность равна

$$P_{ЛТ} = \int_0^{\infty} W(Z/0) dZ = \frac{1}{\sqrt{2\pi D}} \int_0^{\infty} e^{-\frac{(Z-M_1)^2}{2D}} dZ = 1 - \Phi\left(\frac{q\sqrt{n}}{2}\right). \quad (8)$$

Чтобы скачок был обнаружен, необходимо выполнение следующего условия: на участке  $1 < k \leq K_1 - 1$  не должно быть ни одной ложной тревоги. Вероятность этого события (отсутствия ложного обнаружения) равна

$$1 - P_{ЛО} = (1 - P_{ЛТ})^{K_1 - 1} = \left[ \Phi\left(\frac{q\sqrt{n}}{2}\right) \right]^{K_1 - 1}.$$

Таким образом, чтобы удовлетворить требованиям высокой вероятности обнаружения скачка заданной интенсивности  $q$  необходимо увеличивать размер окна и уменьшать вероятность ложной тревоги.

В реальных условиях задача обнаружения скачков отличается от идеализированной модели и прежде всего по содержанию априорной информации о контролируемом процессе.

Возможны следующие варианты исходных данных:

1) при нормальных измерениях известно начальное значение  $a_1$ , неизвестна величина скачка  $\Delta a = a_2 - a_1$ , известна или неизвестна дисперсия измерительного шума;

2) при нормальних измерениях неизвестными являются  $a_1$  и  $a_2$ ; известна или неизвестна дисперсия измерительного шума;

3) при нормальных измерениях ожидается скачок мощности измерительного шума;

4) законы распределения измерений неизвестны, скачком может изменяться как вид закона, так и его параметры;

5) ожидается, что в неизвестный момент времени контролируемый процесс становится нестационарным (например, начинает изменяться его математическое ожидание или дисперсия).

Необходимо в условиях априорной неопределенности исходных данных предложить и исследовать алгоритмы обработки измерений и решающие правила обнаружения скачков, оценки их интенсивности и ошибок определения времени появления (времени запаздывания). На основе этих данных может быть решена задача прогнозирования состояния контролируемого объекта и обнаружения аварийных ситуаций.

**Выводы.** Сформулирована задача автоматического контроля переменных, характеризующих текущее состояние электрической ракетной двигательной установки на базе холлового двигателя. Определены информативные признаки подсистем ЭРДУ и характер их изменения в процессе работы двигательной установки. Сформулирована математическая задача обнаружения скачкообразных изменений информативных признаков ЭРДУ. Представлены алгоритмы обнаружения скачкообразных изменений информативных признаков при различном объеме априорной информации. Предложенные алгоритмы могут быть использованы при разработке реальных электрических ракетных двигательных установок.

### Библиографические ссылки

1. **Архипов А. С.** Стационарные плазменные двигатели Морозова / А. С. Архипов, В. П. Ким, Е. К. Сидоренко. – М. : МАИ, 2012. – 292 с.
2. **Бокс Дж.** Анализ временных рядов, прогноз и управление / Дж. Бокс, Г. Дженкинс – М. : Мир, 1974.
3. **Бугрова А. И.** Плазменные ускорители и ионные инжекторы / А. И. Бугрова, В. П. Ким; под общ. ред. Н. П. Козлова, А. И. Морозова. – М. : Наука, 1984. – 272 с.
4. **Дуда Р.** Распознавание образов и анализ сцен / Р. Дуда, П. Харт. – М. : Мир, 1976.
5. **Левин Б. Р.** Теоретические основы статистической радиотехники. Книга 2. – М. : Сов. радио, 1975.
6. **Левин Б. Р.** Теоретические основы статистической радиотехники. Книга 3. – М. : Сов. радио, 1976.
7. **Ломакин В. Д.** Результаты математического моделирования системы подачи как исполнительного устройства для ЭРД / В. Д. Ломакин, С. Е. Быков, А. Н. Петренко // Труды II Всесоюзной научно-технической конференции "Современные проблемы двигателей и энергетических установок летательных аппаратов". – М. : МАИ, 1980. – С. 133.
8. Обнаружение изменения свойств сигналов и динамических систем / под ред. М. Бассавиль, А. Банвениста. – М. : Мир, 1989.
9. Технические средства диагностирования : справочник / В. В. Клюев и др. ; под общ. ред. В. В. Клюева. – М. : Машиностроение, 1989.
10. **Petrenko O. N.** Results of Research of Steady Work Modes of Stationary Plasma Thrusters", Processing of the 47th International Astronautical Congress, IAF-96-S.3.03, Beijing, China, 7–11 October, 1996.



11. **Petrenko O. N.** “Problem of Automatic Control and Parameters Monitor System Designing for the Electrical Propulsion Engine Modules”, Processing of the Fourth Ukraine-Russia-China Symposium on Space Science and Technology, Vol. 1, P. 349–351, September 12–17, 1996, Kiev, Ukraine.

12. **Petrenko O. N.** “The Problem of Control and Monitor Units Development for the Electrical Propulsion Modules” / Petrenko O. N., Prisiakov V. F. // Processing of the First IAA Symposium on Realistic Near-term Advanced Scientific Space Missions, June 25–27, 1996, Torino, Italy.

*Надійшла до редколегії 06.10.2017*

УДК 537.52, 629.78

**А. Н. Петренко, В. П. Малайчук**

*Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара*

## **АЛГОРИТМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК**

Рассмотрены алгоритмы автоматического контроля текущих параметров электрических ракетных двигательных установок. Представлены алгоритмы обнаружения скачкообразных изменений информативных признаков при различном объеме априорной информации, а также изменения информативных признаков в виде линейных трендов.

**Ключевые слова:** электрическая ракетная двигательная установка, измерение параметров, автоматический контроль, алгоритмы контроля.

Розглянуто алгоритми автоматичного контролю поточних параметрів електричних ракетних двигунних установок. Представлені алгоритми виявлення ступеневих змін інформативних ознак при різному обсязі априорної інформації, а також змін інформативних ознак у вигляді лінійних трендів.

**Ключові слова:** електрична ракетна двигунна установка, вимірювання параметрів, автоматичний контроль, алгоритми контролю.

Algorithms of the parameters automatic control of the electric propulsion engine unit are described. The algorithms for detecting jump-like changes in informative features for different volumes of apriority information and changes of the information features in a form of the linear trends are presented.

**Keywords:** electric propulsion engine unit, measurements of the parameters, automatic control, algorithms of control.

Известно, что параметры и характеристики электрических ракетных двигательных установок (ЭРДУ) изменяются с течением времени [1; 3]. Отсюда вытекает задача автоматического контроля параметров подсистем ЭРДУ в процессе их функционирования. Для автоматического контроля параметров подсистем ЭРДУ используются измерения информативных признаков, которые характеризуют функционирование и работоспособность установок.

Моделью таких измерений может служить последовательность случайных величин – одномерный случайный сигнал  $X(1), X(2), X(3), \dots, X(k)$  или последовательность случайных векторов  $[X(1)], [X(2)], \dots, [X(k)]$  – многомерный дискретный случайный сигнал, где  $[X(k)] = [X_1(k), X_2(k), \dots, X_m(k)]^T$ ;  $T$  – знак транспонирования. Свойства дискретных сигналов и их использование для