

Библиографический список использованной литературы

1. Информационные технологии для критических инфраструктур: монография / А.В. Скатков [и др.] — Севастополь: Изд-во «СевНТУ», 2012. — 306 с.
2. Карпов Ю.Г. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5 / Ю.Г. Карпов. — СПб.: БХВ-Петербург, 2005. — 400 с.
3. Воронин Д.Ю., Скатков А.В., Харченко В.С. Технологии Web, Grid, Cloud для гарантоспособных ИТ-инфраструктур / Технологии Web, Grid, Cloud для гарантоспособных ИТ-инфраструктур: Монография/ Под ред. В.С. Харченко, А.В. Горбенко. — Харьков: Изд-во ХАИ, 2013. — 868 с.: табл. 119, ил. 323, библиограф. 321 назв. ISBN 978 — 966 — 662 — 307 — 5.
4. Воронин Д.Ю. Автоматизация управления распределенными вычислительными процессами при использовании библиотеки имитационных моделей / Д.Ю. Воронин, Д.И. Бойко// Тезисы Всеукраинской научно-практ. конф. «Современные информационные технологии и программное обеспечение компьютерных систем». — Кировоград: «КОД», 2013. — С. 185 — 186.
5. Воронин Д.Ю. Информационная технология управления распределенными вычислительными процессами / Д.Ю. Воронин, Д.И. Бойко, М.С. Кобылянская // Современные технологии проектирования управляющих и мехатронных систем: материалы международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. — Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2013. — С. 119 — 123.

Voronin D.Y., Shevchenko V.I., Kobylianskaya M.S. Approach for decision-making in critical infrastructural interaction of distributed computing systems based on simulation Grid-library

The approach for making dispatching decisions at critical infrastructure interaction of distributed computing systems in conditions of uncertainty is considered. The main aspects of the concept, aimed at creating a single unified environment of integrated network management using simulation Grid-library, are discussed.

Key words: critical infrastructure cooperation, decision support, network project, Grid, scheduling, simulation modeling.

УДК 62.50

А.Т. Барабанов, профессор, д-р техн. наук

Е.С. Солдатенко

Севастопольский национальный технический университет

ул. Университетская 33, г. Севастополь, 299053

e-mail: soldatenko@sevnpu.com

АБСОЛЮТНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ КВАЗИОПТИМАЛЬНОЙ НЕЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМЫ

Рассматривается квазиоптимальная нелинейная система при законе управления, построенном линейно-квадратической оптимизацией системы линейного приближения. Ставится и решается задача анализа абсолютной устойчивости в квазиоптимальной системе при парциальном введении нелинейностей.

Ключевые слова: нелинейная система, оптимальный закон управления, абсолютная устойчивость, критерий Попова.

1. Постановка задачи. Рассматривается нелинейная система с аддитивным управлением вида

$$\frac{dx}{dt} = A(x) + Bu(t), \quad 0 \leq t < \infty, \quad (1)$$

где $A(x) \in R^{n \times n}$, $B \in R^{n \times m}$; $x \in R^n$, $u \in R^m$.

Пусть для системы линейного приближения

$$\frac{dx(t)}{dt} = Ax(t) + Bu(t),$$

построено оптимальное управление в виде стационарной отрицательной обратной связи

$$u(t) = -Gx(t). \quad (2)$$

Пусть выделена для рассмотрения одна нелинейность $a_{km}(x_m)$. Нелинейность выносится в «k»-ой строке в отдельное слагаемое, что позволяет записать нелинейную модель в виде

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= (A_0 - BG)x + by, \\ y &= \varphi(\sigma), \quad \sigma = c^T x, \end{aligned} \right\}$$

где

$$\mathbf{A}_0 = \mathbf{A}|_{a_{km}=0}, \quad \mathbf{c}^T = (\underbrace{0 \dots 0}_m \underbrace{1 \ 0 \dots 0}_m),$$

$$\varphi(\sigma) = \pm a_{km}(x_m); \quad \mathbf{b} = \pm (\underbrace{0 \dots 0}_k \underbrace{1 \ 0 \dots 0}_m)^T,$$

знак «+» имеет место при нелинейности $a_{km}(x_m)$, график которой расположен в I, III квадрантах, а знак «-» — при нелинейности во II, IV квадрантах. Таким образом, в любом случае нелинейность $y = \varphi(\sigma)$ имеет график в (I, III) квадрантах.

Применяя преобразование Лапласа к линейной части системы, представим модель нелинейной системы в удобной для анализа блочной форме, представленной на рисунке 1.

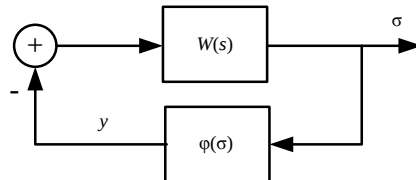


Рисунок 1 — Модель системы в блочной форме

Передаточная функция $W(s)$ линейной части определена как

$$W(s) = -\mathbf{c}^T (s\mathbf{I} - \mathbf{A}_*)^{-1} \mathbf{b}, \quad (3)$$

где

$$\mathbf{A}_* = \mathbf{A}_0 - \mathbf{B}\mathbf{G}.$$

Ставится задача исследовать зависимость интервала абсолютной устойчивости нелинейной системы (1) от закона управления (2).

2. Гурвице в угол. Заменим нелинейный элемент линейной обратной связью

$$\varphi(\sigma) = k, \quad y = k\sigma.$$

Полученную замкнутую систему называют системой сравнения [1].

Пусть передаточная функция (3) представлена в виде отношения двух многочленов

$$W(s) = p(s)/q(s).$$

Тогда характеристический многочлен замкнутой системы равен

$$Q(s) = q(s) + k \cdot p(s). \quad (4)$$

Наименьшее $k_{\min}$ и наибольшее $k_{\max}$ значения k , при которых система попадает на границу устойчивости, ограничивают угол $(k_{\min}, k_{\max})$, называемый гурвицевым углом.

Для нахождения гурвицева угла используем метод D -разбиения. Граница устойчивости определяется уравнением

$$Q(j\omega) = 0,$$

из которого следует

$$Q(j\omega) = q(j\omega) + k \cdot p(j\omega),$$

$$k = -\frac{q(j\omega)}{p(j\omega)} = -\frac{1}{W(j\omega)}.$$

Граничные значения k_* определяются частотами ω_* , при которых $\text{Im}W(j\omega_*) = 0$.

Из представления

$$W(j\omega) = \frac{A(\xi)}{D(\xi)} + j\omega \frac{\bar{B}(\xi)}{D(\xi)}, \quad \xi = -\omega^2 < 0,$$

где

$$\left. \begin{aligned} A(\xi) &= a(\xi)c(\xi) - \xi b(\xi)e(\xi), \\ \bar{B}(\xi) &= b(\xi)c(\xi) - a(\xi)e(\xi), \\ D(\xi) &= c^2(\xi) - \xi e^2(\xi), \end{aligned} \right\}$$

$$p(s) = a(x) + sb(x), \quad q(s) = c(x) + se(x), \quad x = s^2,$$

следует

$$\omega_* = 0 \text{ и } \bar{B}(\xi_*) = 0.$$

Тогда

$$k_* = -\frac{q(0)}{p(0)} \text{ и } k_* = -\text{Re} \frac{1}{W(j\omega_*)} = -\frac{D(\xi_*)}{A(\xi_*)}.$$

Полученными точками действительная ось значений k разбивается на интервалы с одинаковым распределением корней характеристического многочлена (4). Выбирая в каждом интервале произвольную точку для анализа устойчивости, определяем интервал устойчивости системы сравнения (гурвицев угол).

3. Абсолютная устойчивость. Рассмотрим частотный критерий В.М. Попова абсолютной устойчивости одномерных нелинейных систем.

Пусть передаточная функция линейной части $W(s)$ устойчива и невырождена. Тогда для абсолютной устойчивости равновесия $x=0$ для нелинейностей $\varphi(\sigma)$ класса $(0,k)$ достаточно, чтобы существовало такое число θ , для которого выполняется условие Попова

$$\frac{1}{k} + \operatorname{Re}[(1 + j\omega\theta)W(j\omega)] > 0, \quad \omega \in [0, \infty).$$

Из представления частотной характеристики линейной части

$$W(j\omega) = U(\omega) + jV(\omega)$$

получаем

$$\frac{1}{k} + U(\omega) - \theta\omega V(\omega) > 0.$$

Введем модифицированную частотную характеристику линейной части

$$W_M(j\omega) = U_M(\omega) + jV_M(\omega),$$

где $U_M(\omega) = U(\omega)$, $V_M(\omega) = V(\omega)$.

Тогда критерий Попова запишется в виде

$$\frac{1}{k} + U_M(\omega) - \theta V_M(\omega) > 0. \quad (5)$$

Из этого следует графическая интерпретация критерия: неравенство (5) выполняется, если модифицированная частотная характеристика располагается справа от прямой

$$\frac{1}{k} + U_M - \theta V_M = 0. \quad (6)$$

Прямая (6) проходит через точку $-\frac{1}{k}$ на вещественной оси с наклоном $\frac{1}{\theta}$.

Определим эту прямую так, чтобы она была касательной к модифицированному годографу $W_M(j\omega)$. Для этого неизвестный параметр θ должен удовлетворять условию

$$\frac{1}{\theta} = \frac{V'_M(\omega)}{U'_M(\omega)}$$

для какой-то частоты ω_* . Отсюда

$$\theta_* = \frac{U'_M(\omega_*)}{V'_M(\omega_*)}. \quad (7)$$

Частота ω_* удовлетворяет уравнению

$$\frac{1}{k} + U_M(\omega) - \frac{U'_M(\omega)}{V'_M(\omega)} V_M(\omega) = 0. \quad (8)$$

Для касательной критерий Попова (5) преобразуется в условие

$$\frac{1}{k} + U_M(\omega) - \theta_* V_M(\omega) \geq 0, \quad (9)$$

т.к. равенство будет иметь место на частоте ω_* .

Раскроем полученные выражения, используя представления

$$U(\omega) = \frac{A(\xi)}{D(\xi)}, \quad V(\omega) = \omega \frac{\bar{B}(\xi)}{D(\xi)}, \quad \xi = -\omega^2 < 0,$$

$$U_M(\omega) = \frac{A(\xi)}{D(\xi)}, \quad V_M(\omega) = -\frac{B(\xi)}{D(\xi)}, \quad B(\xi) = \xi \bar{B}(\xi).$$

Тогда (7), (8), (9) преобразуются к виду

$$\theta_* = -\frac{A'(\xi_*)D(\xi_*) - A(\xi_*)D'(\xi_*)}{B'(\xi_*)D(\xi_*) - B(\xi_*)D'(\xi_*)}, \quad (10)$$

$$\frac{1}{k} B'(\xi)D(\xi) - \frac{1}{k} B(\xi)D'(\xi) + A(\xi)B'(\xi) - A'(\xi)B(\xi) = 0, \quad (11)$$

$$\frac{1}{k} D(\xi) + A(\xi) + \theta_* B(\xi) \geq 0. \quad (12)$$

Полученные выражения будем использовать в алгебраическом подходе к исследованию абсолютной устойчивости нелинейной системы.

4. Алгоритм нахождения интервала абсолютной устойчивости по критерию Попова

Прежде чем воспользоваться критерием Попова, необходимо убедиться, что линейная часть системы устойчива и невырождена. Затем находим гурвицев угол системы сравнения. Для этого находим частоты из уравнения

$$\bar{B}(\xi_*) = 0, \quad (13)$$

которые вместе с нулевой частотой дают точки пересечения годографа линейной части системы с вещественной осью

$$k_* = -\frac{q(0)}{p(0)}$$

и

$$k_* = -\operatorname{Re} \frac{1}{W(j\omega_*)} = -\frac{D(\xi_*)}{A(\xi_*)}. \quad (14)$$

Данные точки разбивают действительную ось на интервалы, из которых находим интервал устойчивости линейной системы сравнения

$$k_{\min} < k < k_{\max},$$

ограниченный частотами $\omega_{\min}, \omega_{\max}$.

Для нахождения интервала абсолютной устойчивости $(0, K)$ предлагается следующий алгоритм.

1) Если уравнение (13) не имеет вещественных отрицательных корней, то $K = k_{\max}$.

Иначе, переходим к п. 2).

2) Проверяем, является ли точка $k_{\max}$ верхней границей интервала абсолютной устойчивости.

Если $k_{\max}$ определяется частотой $\omega_{\max} = 0$, то переходим к п. 4).

Если $k_{\max}$ определяется частотой $\omega_{\max}$, удовлетворяющей уравнению (13), то по формуле (10) находим параметр θ_* и проверяем условие (12).

Если $k_{\max}$ определяется частотой $\omega_{\max} = \infty$, то параметр θ_* находится как предел формулы (10) и проверяется условие (12).

Для проверки условия (12) делим многочлен

$$P(\xi) = \frac{1}{k} D(\xi) + A(\xi) + \theta B(\xi) \quad (15)$$

на $(\xi - \xi_*)^2$, $\xi_* = -\omega_{\max}^2$, т.е. пробуем представить его в виде

$$P(\xi) = (\xi - \xi_*)^2 \bar{P}(\xi). \quad (16)$$

Если такое представление возможно и многочлен $\bar{P}(\xi)$ не имеет вещественных отрицательных корней, то условие (12) выполняется, верхняя граница интервала абсолютной устойчивости найдена. В противном случае переходим к п. 3).

3) Уменьшаем значение $k_{\max}$ по модулю, например, $k = 0.99k_{\max}$. Переходим к п. 4).

4) Проверка критерия Попова для конечных значений k , не являющихся точками (14).

Находим вещественные отрицательные корни ξ_i уравнения (11), которые определяют точки касания модифицированного годографа прямыми, проходящими через точку $(-\frac{1}{k}, 0)$. Из уравнения (6) находим параметры этих прямых

$$\theta_i = \frac{1/k + U_M(\omega_i)}{V_M(\omega_i)} = -\frac{1/k D(\xi_i) + A(\xi_i)}{B(\xi_i)}. \quad (17)$$

Условие абсолютной устойчивости (12) выполняется, если хотя бы для одного из параметров (17), обозначим его θ_j , условие (12) выполняется при всех найденных ξ_i , т.е.

$$\exists j: \frac{1}{k} D(\xi_i) + A(\xi_i) + \theta_j B(\xi_i) \geq 0 \quad \forall i. \quad (18)$$

Если условие (18) не выполняется ни для одного из параметров (17), то возвращаемся к п. 3). Иначе верхняя граница интервала абсолютной устойчивости найдена.

В результате алгоритма получаем наибольшую верхнюю границу интервала абсолютной устойчивости нелинейной системы.

5. Пример. Рассмотрим задачу управления боковым движением ЛА. В качестве линеаризованной модели принята модель тяжелого гражданского самолета Боинг 747, приведенная в работе [2]

$$\begin{pmatrix} \dot{v} \\ \dot{\omega}_y \\ \dot{\omega}_x \\ \dot{\gamma} \\ \dot{\psi} \\ \dot{z} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -0,089 & -2,190 & 0,328 & 0,319 & 0 & 0 \\ 0,076 & -0,217 & -0,166 & 0 & 0 & 0 \\ -0,602 & 0,327 & -0,975 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,150 & 1,000 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1,000 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1,000 & 0 & 0 & 0 & 2,210 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} v \\ \omega_y \\ \omega_x \\ \gamma \\ \psi \\ z \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -0,0327 \\ 0,0264 & 0,151 \\ 0,227 & -0,0636 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \delta_3 \\ \delta_H \end{pmatrix},$$

где $v = -V\beta$ – скорость бокового скольжения; β – угол бокового скольжения; ω_y – угловая скорость рыскания; ω_x – угловая скорость крена; γ – угол крена; ψ – угол рыскания; z – боковое отклонение. За единицы для углов принято 0,01 рад, для перемещений 0,305 м, соответственно для скоростей 0,305 м/с.

Задача бокового маневра состоит в переходе из начального состояния на траекторию прямолинейного движения (в [2] – выход на взлетно-посадочную полосу).

Для нахождения закона управления (2) решаем задачу ЛКО с критерием

$$J = \int_0^{\infty} (x^T P x + u^T R u) dt \rightarrow \min.$$

Матрицы P и R задаем в виде

$$P = k_p \cdot I_{6 \times 6}, \quad R = k_R I_{2 \times 2},$$

где I – единичная матрица, k_p, k_R – весовые коэффициенты.

В качестве нелинейного элемента выбран $a_{21}(x_1)$.

Исследовалось влияние весовых коэффициентов k_p, k_R критерия на устойчивость линейной части (см. рисунок 1) квазиоптимальной нелинейной системы.

В результате расчетов получено, что линейная часть $W(s)$ устойчива при

$$\frac{k_p}{k_R} > 0,022.$$

Далее исследовался интервал абсолютной устойчивости в зависимости от коэффициентов k_p, k_R , определяющих закон управления (2).

Приведем расчеты этого интервала для случая $k_p = 1, k_R = 1$.

В программной среде *MatLab* функцией «*care*» получена матрица оптимального закона управления в виде

$$G = \begin{bmatrix} 2,2101 & 3,7711 & 1,8567 & 2,1154 & 8,1338 & 0,8828 \\ 1,0614 & 6,6256 & 0,8994 & 1,5268 & 6,3860 & 0,4698 \end{bmatrix}.$$

Передачная функция линейной части системы устойчива и имеет вид

$$W(s) = \frac{1,973s^4 + 2,417s^3 + 0,943s^2 + 0,541s + 0,126}{s^6 + 2,711s^5 + 3,399s^4 + 2,867s^3 + 1,505s^2 + 0,439s + 0,0613}.$$

Многочлены $A(\xi), B(\xi), D(\xi)$ равны

$$A(\xi) = 1,973\xi^5 + 1,099\xi^4 - 2,094\xi^3 - 0,642\xi^2 + 0,010\xi + 0,0077,$$

$$\bar{B}(\xi) = -2,932\xi^4 + 0,542\xi^3 + 1,563\xi^2 + 0,187\xi - 0,0222,$$

$$D(\xi) = \xi^6 - 0,549\xi^5 - 0,980\xi^4 - 0,246\xi^3 + 0,166\xi^2 - 0,008\xi + 0,0038.$$

Корни многочлена $\bar{B}(\xi)$ $\xi_* = -0,22$ и $\xi_* = -0,54$.

$$\text{Точки Д-разбиения } k_1 = -\frac{q(0)}{p(0)} = -0,49; \quad k_2 = -\frac{D(-0,22)}{A(-0,22)} = 8,3; \quad k_3 = -\frac{D(-0,54)}{A(-0,54)} = -0,42.$$

Характеристический многочлен замкнутой системы $Q(s) = q(s) + k \cdot p(s)$ при $k=0$ устойчивый, значит гурвицев угол системы сравнения $[-0,42 < k < 8,3]$.

Определим, является ли точка $k_{\max} = 8,3$ верхней границей интервала абсолютной устойчивости. Для этого по формуле (10) определяем значение параметра θ для точки $\xi_{\max} = -0,22$

$$\theta_{\max} = 0,703.$$

Определяем многочлен (15) и его представление (16)

$$P_{\max}(\xi) = 0,12\xi^6 - 0,15\xi^5 + 1,36\xi^4 - 1,02\xi^3 - 0,49\xi^2 - 0,006\xi + 0,008,$$

$$P_{\max}(\xi) = (\xi + 0,22)^2 (0,12\xi^4 - 0,21\xi^3 + 1,45\xi^2 - 1,65\xi + 0,17),$$

$$\bar{P}_{\max}(\xi) = 0,12\xi^4 - 0,21\xi^3 + 1,45\xi^2 - 1,65\xi + 0,17.$$

Многочлен $\bar{P}_{\max}(\xi)$ отрицательных вещественных корней не имеет. Условие (12) выполняется, значит $k_{\max}$ является верхней границей интервала абсолютной устойчивости.

Таким образом, интервал абсолютной устойчивости $(0; 8,3)$.

Для проверки построим модифицированный годограф линейной части системы — рисунок 2.

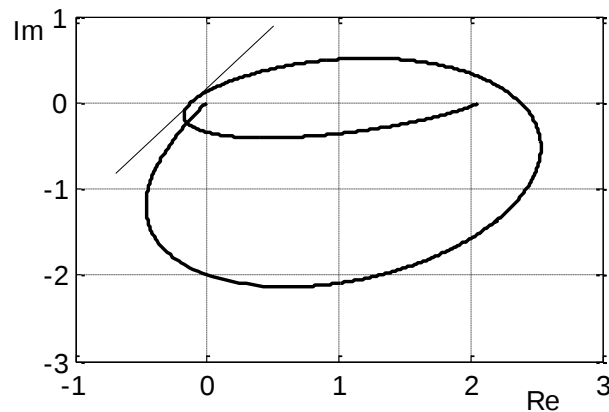


Рисунок 2 — Модифицированный годограф $W_M(j\omega)$

На рисунке показана прямая (6), определяемая значениями $k_{\max}$ и $\theta_{\max}$. Видно, что модифицированный годограф системы лежит правее построенной прямой, что подтверждает найденный интервал абсолютной устойчивости.

Рассмотрим другой случай, получаемый при $k_p = 0,2$; $k_R = 1$.

Корни многочлена $\bar{B}(\xi)$ $\xi_1 = -0,51$ и $\xi_2 = -0,11$.

Интервал устойчивости системы сравнения $[-0,088 < k < 0,915]$. Верхняя точка $k_{\max} = 0,915$ соответствует частоте $\xi_{\max} = -0,11$.

Параметр касательной по формуле (10) $\theta_{\max} = -0,86$.

Многочлены по формулам (15), (16)

$$P_{\max}(\xi) = 1,09\xi^6 + 3,62\xi^5 - 1,51\xi^4 - 2,81\xi^3 - 0,42\xi^2 + 0,0015\xi + 0,0018,$$

$$\bar{P}_{\max}(\xi) = 1,09\xi^4 + 3,37\xi^3 - 2,29\xi^2 - 2,33\xi + 0,14.$$

Многочлен $\bar{P}_{\max}(\xi)$ имеет два отрицательных вещественных корня $(-3,50$ и $-0,64)$, значит $k_{\max}$ не является верхней границей интервала абсолютной устойчивости. Будем ее искать, уменьшая значение $k_{\max}$.

Проверим точку $k_* = 0,99k_{\max} = 0,905$.

Вещественные отрицательные корни уравнения (11)

$$\xi_1 = -1,12, \quad \xi_2 = -0,123, \quad \xi_3 = -0,105.$$

По формуле (17) находим $\theta_1 = -0,051$.

Многочлен (15)

$$P_1(\xi) = 1,10\xi^6 + 1,61\xi^5 - 0,96\xi^4 - 1,84\xi^3 - 0,34\xi^2 - 0,0014\xi + 0,0018.$$

Условие (18) запишется в виде $P_1(\xi_i) \geq 0$.

Т.к. $P_1(\xi_2) = -7,8 \cdot 10^{-5}$, условие не выполняется для θ_1 . Проверим θ_2 .

$$\theta_2 = -0,52; \quad P_2(\xi) = 1,10\xi^6 + 2,77\xi^5 - 1,28\xi^4 - 2,41\xi^3 - 0,39\xi^2 + 0,0003\xi + 0,0018.$$

Т.к. $P_2(\xi_1) = -1,84$, условие не выполняется для θ_2 . Проверим θ_3 .

$$\theta_3 = -1,25; \quad P_3(\xi) = 1,10\xi^6 + 4,57\xi^5 - 1,79\xi^4 - 3,27\xi^3 - 0,46\xi^2 + 0,0028\xi + 0,0018.$$

Т.к. $P_3(\xi_1) = -4,68$, условие не выполняется для θ_3 .

Итак, ни для одной касательной условие Попова не выполняется. Еще уменьшаем значение k_* и делаем аналогичную проверку. На седьмой итерации будем иметь

$$k_* = 0,8524;$$

$$\xi_1 = -1,08, \quad \xi_2 = -0,139, \quad \xi_3 = -0,091.$$

$$\theta_1 = -0,08; P_1(\xi) = 1,17\xi^6 + 1,64\xi^5 - 1,05\xi^4 - 1,88\xi^3 - 0,34\xi^2 - 0,0013\xi + 0,0019.$$

$P_1(\xi_1) = 0$, $P_1(\xi_2) = 2,4 \cdot 10^{-5}$, $P_1(\xi_3) = 4,9 \cdot 10^{-4}$, значит условие (18) выполняется, $k_* = 0,8524$ — верхняя граница интервала абсолютной устойчивости.

Для проверки и наглядного представления результатов построим модифицированный годограф линейной части системы — рисунок 3.

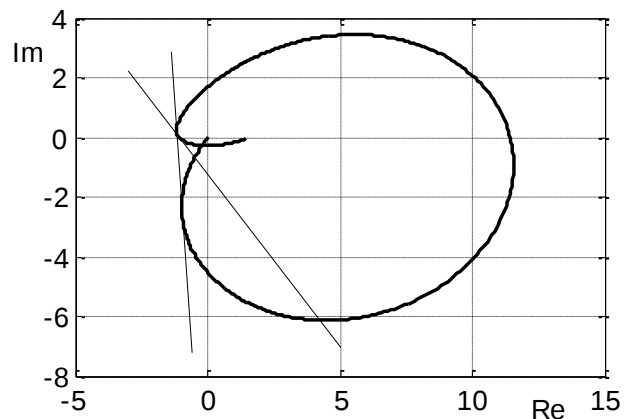


Рисунок 3 — Модифицированный годограф $W_M(j\omega)$

На рисунке показана прямая (6), определяемая значениями $k_{\max}$ и $\theta_{\max}$, которая пересекает нижнюю часть годографа, а также прямая при полученных итеративно $k_* = 0,8524$ и $\theta_1 = -0,08$, которая касается годографа, но не пересекает его.

В таблицу 1 сведены результаты расчетов при различных законах управления, определяемых отношением параметров k_P , k_R в критерии задачи ЛКО.

Таблица 1 — Верхние границы устойчивости при различных управлениях

k_P / k_R	Верхняя граница гурвицева угла	Верхняя граница абсолютной устойчивости
0,2	0,9145	0,85
0,3	1,1175	1,07
0,4	1,3624	1,34
0,5	1,6709	1,65
0,6	2,0783	2,0783
0,7	2,6494	2,6494
0,8	3,5189	3,5189
0,9	5,0231	5,0231
1,0	8,3071	8,3071
1,1	21,4328	21,4328
1,2	Inf	Inf

Из таблицы видно, что верхняя граница интервала абсолютной устойчивости практически не отличается от верхней границы гурвицева угла при $k_P / k_R = 0,2; 0,3; 0,4; 0,5$. При $k_P / k_R > 0,5$ границы совпадают. С ростом k_P / k_R увеличивается интервал устойчивости, при $k_P / k_R > 1,2$ система устойчива при любой характеристике нелинейного элемента в первом квадранте.

6. Заключение. Поставленная задача алгебраического анализа абсолютной устойчивости в квазиоптимальной системе при парциальном введении нелинейностей достаточно подробно рассмотрена. Представлен алгебраический метод проверки критерия Попова, а также алгоритм нахождения интервала абсолютной устойчивости. Для системы управления боковым движением летательного аппарата проведен анализ абсолютной устойчивости при введении аддитивных нелинейностей. Выявлено влияние коэффициентов критерия ЛКО на интервал устойчивости квазиоптимальной нелинейной системы.

Библиографический список использованной литературы

1. Цыпкин Я.З. Основы теории автоматических систем / Я.З. Цыпкин. — М.: Наука, 1977. — 560 с.

2. Брайсон А. Новые идеи по теории управления / А. Брайсон // Аэрокосмическая техника. —1986. —№8.— С. 59—75.

3. Воронов А.А. Теория автоматического управления. Ч. II. Теория нелинейных и специальных систем автоматического управления. / А.А. Воронов, Д.П. Ким, В.М. Лохин и др.; Под ред. А.А. Воронова. — М.: Высш. шк., 1986. — 504с.

Барабанов О.Т., Солдатенко О.С. Абсолютна стійкість квазіоптимальної нелінійної системи

Розглядається квазіоптимальна нелінійна система при законі управління, побудованому лінійно-квадратичною оптимізацією системи лінійного наближення. Ставиться і вирішується завдання аналізу абсолютної стійкості в квазіоптимальній системі при парціальному введенні нелінійностей.

Ключові слова: нелінійна система, оптимальний закон керування, абсолютна стійкість, критерій Попова.

Barabanov A.T., Soldatenko E.S. Absolute stability of quasi-optimal nonlinear system

The quasi-optimal nonlinear system with control law, constructed by linear-quadratic optimization for the linear approximation, is considered. The problem of absolute stability analysis in quasi-optimal system with a partial introduction of nonlinearities is posed and solved.

Keywords: nonlinear system, optimal control law, absolute stability, criterion of Popov.

УДК 004.56

А.А. Брюховецкий доц., канд. техн. наук

А.В. Скатков, проф., д-р техн. наук

Д.Ю. Воронин, канд. техн. наук

В.С. Ловягин, канд. техн. наук

Севастопольский национальный технический университет

ул. Университетская 33, г. Севастополь, 299053

e-mail: kvt.sevntu@gmail.com

МЕТОДОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ ОБНАРУЖЕНИЯ СЕТЕВЫХ ВТОРЖЕНИЙ В КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЯХ¹⁵

Представлен комплексный подход к построению систем обнаружению сетевых атак, который сочетает две дополняющие друг друга технологии. Первая позволяет распознавать угрозы сетевых вторжений и базируется на методах интеллектуального анализа данных, в то время как вторая использует информацию об изменении состояния вектора системных показателей компьютерной сети.

Ключевые слова: обнаружение сетевых атак, информационная безопасность критических систем.

В статье представлена методология построения систем обнаружения сетевых вторжений (СОВ) в компьютерных сетях. Применение методологической схемы разработки СОВ обеспечивает воспроизводимость полученных результатов, позволяет создавать опытные образцы перспективных программно-инструментальных средств обнаружения и распознавания сетевых атак для обеспечения информационной защиты компьютерных систем, подготавливает почву для перехода на новый уровень исследований в рамках ОКР.

Анализ проблематики решения фундаментальной задачи обеспечения информационной безопасности на основе методов построения систем обнаружения вторжений в телекоммуникационных сетях показал, что:

- Развитие информационных технологий на базе телекоммуникационных сетей (ТКС) приводит к повышению эффективности промышленного производства и многих инфраструктур в энергетической, транспортной, социальной сферах.
- ТКС, как одна из основных подсистем инфраструктур, должна обеспечивать высокую реактивность, достоверность и своевременность передачи информации между функциональными подсистемами инфраструктуры.
- Отказ или нарушение работы ТКС может привести к дезорганизации функционирования всей инфраструктуры и, следовательно, опасности возникновения критических ситуаций, которые могут иметь катастрофические последствия.

Кроме того, известным из литературных источников СОВ [1 — 2] присущи следующие недостатки:

- ограничиваются решением отдельных задач и не носят комплексный характер,

¹⁵ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-47-01514).