Мистров Л.Е., Павлов В.А. Устойчивость адаптивной динамической системы информационного обеспечения [Электронный ресурс] // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования: Научный интернет-журнал. 2014. – № 4(20). Режим доступа http://iea.gostinfo.ru/files/2014_04/2014_04_12.pdf

УДК 681.3

УСТОЙЧИВОСТЬ АДАПТИВНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Мистров Л.Е., профессор Центрального филиала ФГБОУ ВПО «Российская академия правосудия», доктор технических наук, доцент, г. Воронеж

Павлов В.А., профессор кафедры ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», кандидат технических наук, доцент, г. Воронеж

Предложена модель оценки состояния адаптивных динамических систем при наличии внешних возмущений, основанная на теории устойчивости решений дифференциальных уравнений; получены условия устойчивости таких систем для ограниченной области изменения энергетических, частотных и пространственных характеристик входных воздействий; приведены результаты исследования устойчивости двухканальной адаптивной динамической системы

Ключевые слова: конфликтная устойчивость, адаптивная динамическая системам, условие устойчивости, вектор весовых коэффициентов, информативное воздействие, деструктивное возмущение, оценка информативного воздействия, ошибка

UDC 681.3

STABILITY OF ADAPTIVE DYNAMIC SYSTEM OF INFORMATION SUPPORT

Mistrov L.E., professor of the Central Branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Highest Vocational Education “Russian Academy of Justice” (Voronezh)

Pavlov V.A., professor of the department of Air Force Education and Research Center “The N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin Air Force Academy” (Voronezh), candidate of technical science, associate professor

A model for evaluating the adaptive dynamic systems’ state in the presence of external disturbances that is based on the differential equation solutions stability *theory has been developed. The conditions of stability of such systems for the bounded region of variations of the energy, frequency and spatial characteristics of inputs have been stated. The results of investigating the stability of a two-channel adaptive dynamic system have been presented.*

Keywords: conflict stability, adaptive dynamic system, condition of stability, weight vector, information impact, destructive disturbance, information impact evaluation, error

Определяющим свойством функционирования организационно-технических систем (ОТС) в условиях конкуренции выступает конфликтная устойчивость, представляющая фактически критерий заданной эффективности ее применения как функция интегральных показателей эффективности. Эти показатели отражают в значительной степени качеством функционирования системы информационного обеспечения конфликтного взаимодействия ОТС, представляющей собой адаптивную динамическую систему (АДС), обеспечивающую органы управления объектом своевременной, достоверной и точной информацией об информационно-целевой обстановке в конфликте в соответствии с заданным критерием качества в условиях априорной неопределенности о воздействующих внешних факторах. Возможности системы информационного обеспечения в существенной степени определяют показатели эффективности ОТС в условиях конкурентного взаимодействия.

Целью настоящей работы является определение границ устойчивости динамической системы с адаптивной оценкой параметров (восстановлением неизвестной характеристики объекта) в пространстве параметров входных воздействий.

В научно-технической литературе, посвященной АДС [1, 3, 4], под устойчивостью понимают способность системы сохранять показатели качества функционирования в заданных пределах при изменении внешних возмущений.

В большинстве случаев получение условий устойчивости АДС в общем виде, невозможно или сопряжено с большими трудностями [4, 6]. Однако если допустить, что все воздействия на систему – неисчезающие на интервале наблюдения и могут быть описаны какой-либо математической моделью (т. е.

структурированы), а целью функционирования системы является только улучшение качества оценивания параметра, то, воспользовавшись аппаратом исследования устойчивости дифференциальных уравнений, можно получить условия устойчивости АДС в аналитическом виде [2, 5, 6]. Для этого необходимо проанализировать взаимосвязь двух динамических подсистем: объекта управления, характеризуемого вектором вещественных параметров и управляющего модуля, формирующего управляющие команды с учетом текущих оценок информативных входных воздействий, корректирующего полученные оценки.

Для удовлетворительного оценивания параметров и компенсации деструктивных возмущений необходима информация о состоянии системы. Это состояние может быть описано так называемым регрессионным вектором весовых коэффициентов (ВВК) $\mathbf{W}(t)$. В этом случае адаптивная оценка состоит в том, чтобы на основе регрессионного ВВК $\mathbf{W}(t)$, оценки принятого информативного воздействия $y(t)$ и значения ошибки $\varepsilon(t)$ корректируется или заново вычисляется ВВК. Поскольку $\mathbf{W}(t)$ представляет собой описание состояния системы с учетом значений вектора входных воздействий, то ошибка $\varepsilon(t)$ есть ни что иное, как текущее значение показателя качества. Обычно ошибка вычисляется как разность между полученной оценкой информативного воздействия и опорным сигналом системы.

Если воздействие на вход системы $x(t)$ представить суммой информативного воздействия $s(t)$, деструктивного возмущения $\xi(t)$ и шума $n(t)$

$$x(t) = s(t) + \xi(t) + n(t), \tag{1}$$

то систему можно представить совокупностью трех подсистем: регрессии, формирования ошибки и адаптации, как показано на рис. 1.

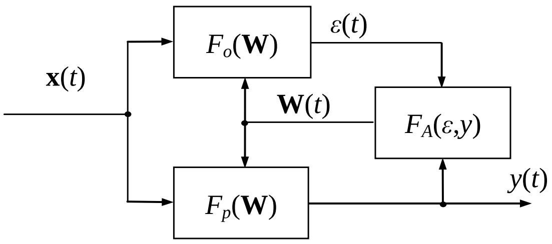

Рис. 1. Структурная схема модели АДС для исследования ее устойчивости

Подсистема регрессии на основании суммарного входного воздействия $x(t)$ и ВВК $\mathbf{W}(t)$ формирует на выходе оценки принятого информативного воздействия *y(t).* Поскольку текущее состояние системы определяется значениями ВВК $\mathbf{W}(t)$, то подсистему регрессии можно описать оператором $F_p(\mathbf{W})$, действующим на вектор суммарного входного воздействия $\mathbf{x}(t)$ и зависящим от $\mathbf{W}(t)$:

$$y(t) = F_p(\mathbf{W})\mathbf{x}(t). \qquad (2)$$

На вход **подсистемы формирования ошибки** поступают суммарное входное воздействие $\mathbf{x}(t)$, ВВК $\mathbf{W}(t)$ и вектор опорного сигнала $\mathbf{D}_o(t)$, а на выходе формируется ошибка

$$\varepsilon(t) = d_0(t) - y(t),$$

где d_0 – опорный сигнал.

Величина ошибки используется для контроля качества функционирования системы. Учитывая параметрическую зависимость $\varepsilon(t)$ от $\mathbf{W}(t)$ и для исключения зависимости от $y(t)$ в явном виде, можно записать с использованием оператора F_o:

$$\varepsilon(t) = F_o(\mathbf{W}) - \mathbf{x}(t). \qquad (3)$$

Подсистема адаптации обеспечивает использование $\varepsilon(t)$ и $y(t)$ для вычисления оптимального (с точки зрения выбранного показателя качества) ВВК $\mathbf{W}(t)$ с помощью оператора F_A в соответствии с реализуемым в системе алгоритмом функционирования:

$$\mathbf{W}(t) = F_A(\varepsilon, y). \qquad (4)$$

В уравнении (4) можно учитывать параметрическую зависимость F_A от величины шага коррекции ошибки и значений опорного сигнала d_0.

Такое разбиение динамической системы на три подсистемы отличается от стандартного, так как объект управления здесь явно не фигурирует. Однако предлагаемая структура позволяет сосредоточить внимание на важности свойств информативного воздействия при адаптации и общих характеристиках операторов, действующих на эти сигналы, а не на структурах и параметрах блока принятия решения и управляющего модуля.

Аналитическая модель АДС может быть представлена в виде:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon(t) \\ y(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_o(\mathbf{W}) \\ F_p(\mathbf{W}) \end{bmatrix} \cdot \mathbf{x}(t) = F(\mathbf{W}) \cdot \mathbf{x}(t). \qquad (5)$$

где:
$$F(\mathbf{W}) = \begin{bmatrix} F_o(\mathbf{W}) \\ F_p(\mathbf{W}) \end{bmatrix}.$$

В общем случае (5) представляет собой систему нелинейных уравнений, несмотря на то, что оператор $F(\mathbf{W})$ линейный при постоянном $y(t)$. В ряде случаев можно доказать глобальную сходимость ВВК и тем самым определить границы устойчивости АДС в целом [2, 6]. Однако допущения, при которых обеспечивается устойчивость системы в целом, часто противоречат реальным условиям и поэтому можно ограничиться рассмотрением локальной устойчивости, т.е. устойчивости при наличии небольших входных возмущений, алгоритмов и начальной установки. С позиций внешних взаимодействий наибольший интерес представляет устойчивость системы при наличии внешних возмущений.

Исследование локальной устойчивости систем (5) проводится с помощью методов линеаризации и теоремы об абсолютной устойчивости. Линеаризация позволяет при достаточной гладкости сглаживания и регулярности (4) построить линейную систему уравнений, у которой условия устойчивости тождественны условиям локальной устойчивости выражения (5).

Исходя из концептуальных основ линеаризации [2] для анализа устойчивости АДС уравнение (5) можно записать в отклонениях значений ошибки $\varepsilon(t)$, оценки принятого информативного воздействия $y(t)$, сформированного ВВК $\mathbf{W}$ от номинальных (настроенных) значений ошибки $\varepsilon_0(t)$, направляющего вектора $\mathbf{D}_o(t)$, оптимального ВВК $\mathbf{W}_0$. Если $\varepsilon_0(t)$, $\mathbf{D}_o(t)$, $\mathbf{W}_0(t)$ – заданные функции времени, то систему (5) можно переписать, введя рассогласования.

$$\begin{gathered}\Delta\varepsilon(t)=\varepsilon_0(t)-\varepsilon(t),\\ \Delta y(t)=d_0(t)-y(t),\\ \Delta\mathbf{W}(t)=\mathbf{W}_0(t)-\mathbf{W}(t).\end{gathered} \tag{6}$$

С учетом (2), (3), (4) выражения (6) принимают вид:

$$\begin{gathered}\Delta\varepsilon(t)=F_0(\mathbf{W}_0)x(t)-F_0(\mathbf{W})x(t)+\delta\varepsilon,\\ \Delta y(t)=F_p(\mathbf{W}_0)x(t)-F_p(\mathbf{W})x(t)+\delta y,\\ \Delta\mathbf{W}(t)=F_A(\varepsilon_0,D_0)-F_A(\varepsilon,y)+\delta\mathbf{W},\end{gathered} \tag{7}$$

где:

$$\begin{gathered}\delta\varepsilon=\varepsilon_0-F_0(\mathbf{W}_0)\mathbf{x}(t),\\ \delta\mathbf{W}=\mathbf{W}_0-F_A(\varepsilon_0\mathbf{D}_0)\mathbf{x}(t),\\ \delta y=d_0-F_p(\mathbf{D}_0)\mathbf{x}(t).\end{gathered} \tag{8}$$

Очевидно, что системы уравнений (7) и (8) тождественны.

В общем случае уравнения (7) являются нелинейными. Однако если операторы $F_0(\mathbf{W})$, $F_p(\mathbf{W})$ и $F_A(\varepsilon,\ y)$ локально дифференцируемы по своим аргументам в области возможных значений $\varepsilon(t)$, $y(t)$ и $\mathbf{W}(t)$ с центром (ε_0, d_0, $\mathbf{W}_0$), то их можно аппроксимировать линейными операторами:

$$\left.\frac{dF_0}{d\mathbf{W}}\right|\mathbf{W}_0\mathbf{x}(t),\quad \left.\frac{dF_p}{d\mathbf{W}}\right|\mathbf{W}_0(t),\quad \left.\frac{dF_A}{d\varepsilon}\right|\varepsilon_0 d_0,\quad \left.\frac{dF_A}{dy}\right|\varepsilon_0 d_0. \tag{9}$$

Следовательно, в ограниченной области возможных значений $\varepsilon(t)$, $y(t)$ и $\mathbf{W}(t)$ уравнение (9) можно написать в виде:

$$\begin{gathered}\Delta\varepsilon(t)=\left(\left.\frac{dF_0}{d\mathbf{W}}\right|\mathbf{W}_0\mathbf{x}(t)\right)^x\mathbf{W}(t)+\delta_1+\delta\varepsilon,\\ \Delta y(t)=\left(\left.\frac{dF_p}{d\mathbf{W}}\right|\mathbf{W}_0\mathbf{x}(t)\right)^X\mathbf{W}(t)+\delta_2+\delta y,\qquad ,\\ \Delta\mathbf{W}(t)=\left.\frac{dF_A}{d\varepsilon}\right|_{\varepsilon_0 d_0}\varepsilon(t)+\left.\frac{dF_A}{dy}\right|_{\varepsilon_0 d_0}^X y(t)+\delta_3+\delta\mathbf{W},\end{gathered} \tag{10}$$

где: δ_1, δ_2 и δ_3 – ошибки, вносимые соответствующими операторами вследствие их линеаризации, ограничены по норме некоторыми значениями $K_1|\mathbf{W}|^2$, $K_2|\mathbf{W}|^2$ и $K_3(|\Delta\varepsilon|^2 + |\Delta y|^2)$ равномерно в области возможных значений $\varepsilon(t)$, $y(t)$, $\mathbf{W}(t)$.

Система (5) описывает взаимосвязь составляющих подсистем регрессии, ошибки и адаптации. Системы (5) и (10) тождественны. Если операторы F_0, F_A и F_p являются достаточно гладкими функциями своих аргументов в области возможных значений $\varepsilon(t)$, $y(t)$ и $\mathbf{W}(t)$, то (7) и, следовательно, (5) тождественны уравнениям (10), представляющим собой систему линейных операторных уравнений с адаптивными задающими членами двух видов – априорно ограниченными функциями (8) и членами, равномерно квадратически ограниченными в области возможных значений $\varepsilon(t)$, $y(t)$, $\mathbf{W}(t)$. Таким образом, уравнения (10) описывают линеаризацию уравнений (5) и (7) относительно значений ε_0, d_0, $\mathbf{W}_0$.

Используя теорему об абсолютной устойчивости [2, 6] можно доказать, что если в уравнениях (10) линейный оператор – сжимающий, при достаточно ограниченных сигналах $\delta\varepsilon$, $\delta\mathbf{W}$, δy в области возможных значений $\varepsilon(t)$, $y(t)$, $\mathbf{W}(t)$, то существует единственное ограниченное решение уравнений (10) и, следовательно, уравнений (5).

При синтезе АДС номинальные сигналы и операторы F_0, F_A и F_p выбираются таким образом, чтобы выполнялись условия теоремы об абсолютной устойчивости.

Некоторые виды возмущений могут создать ситуации, когда условия устойчивости не выполняются. Устойчивость уравнений (5) при изменении внешних воздействий можно анализировать с помощью теоремы об абсолютной устойчивости. При этом существуют два пути использования этой теоремы: анализ уравнений (5); анализ линеаризованного варианта (10).

Очевидно, что при исследовании устойчивости многопараметрических АДС, функционирующих в сложных внешних условиях второй путь проще и более информативен.

Для определения границ устойчивости АДС по характеристикам входных воздействий достаточно установить границы устойчивости дифференциальных уравнений, описывающих изменения ВВК во времени. Подобные задачи решались в [2, 6]. В частности, показано, что для матричной T – периодической интегрируемой функции времени система дифференциальных уравнений устойчива тогда, когда собственные значения переходной матрицы не зависят от времени (под переходной матрицей понимаем значение матричной функции на интервале наблюдения, равном ее периоду). а ее максимальное собственное значение отвечает условию

$$\max|\lambda_i| < 1, \tag{11}$$

где: λ_i – i-е собственное значение переходной матрицы.

Условие (11) может быть использовано для определения границ устойчивости в пространстве параметров, влияющих на величину собственных значений переходной матрицы.

Для двумерной модели АДС при воздействии на ее вход информативного воздействия, деструктивного возмущения и шума ее состояние достаточно полно характеризуется вектором весовых коэффициентов. Для случая непрерывного управления изменение ВВК в процессе адаптации достаточно точно описывается дифференциальным уравнением [6]

$$\frac{d\dot{\mathbf{W}}(t)}{dt} = \frac{k_w}{\tau_w}\dot{\mathbf{W}}_0 - \frac{k_w}{\tau_w}\left[\frac{1}{k_w}\mathbf{I} + \dot{\mathbf{\Phi}}_{xx}\right]\dot{\mathbf{W}}(t), \tag{12}$$

где k_w – коэффициент передачи; τ_w – время адаптации; $\dot{\mathbf{W}}_0$ – начальное состояние ВВК; $\mathbf{I}$ – единичная матрица; $\dot{\mathbf{\Phi}}_{xx}(t) = \mathbf{x}(t)\cdot\mathbf{x}^T(t)/n^2(t)$ – ковариационная матрица входных воздействий.

Используя положения теории матриц можно найти собственные значения переходной матрицы. При отсутствии корреляции между информативным воздействием и деструктивным возмущением условие устойчивости (11) принимает вид

$$\lambda_1 = \left| \frac{2q_д(\omega)\cos^2\varphi_д(\omega)}{2} + 2q_и(\omega) + \frac{q_д^2(\omega)}{2q_и(\omega)}\sin^2\varphi_д(\omega) + \frac{1}{k_w} \right| < 0;$$

$$\lambda_2 = \left| \frac{2q_д(\omega)\cos^2\varphi_д(\omega)}{2} - \frac{q_д^2(\omega)}{2q_и(\omega)}\sin^2\varphi_д(\omega) - \frac{1}{k_w} \right| < 0, \qquad (13)$$

где $q_д$ и $q_и$ – энергия деструктивного возмущения и информационного воздействия относительно фонового шума, соответственно; ω – частота входного воздействия; $\varphi_д$ – приращения мнимой части элементов двумерного вектора деструктивного воздействия.

График зависимости собственных значений переходной ковариационной матрицы входных воздействий от энергии деструктивного возмущения для различных значений приращения мнимой части элементов вектора входных воздействий представлен на рис. 2.

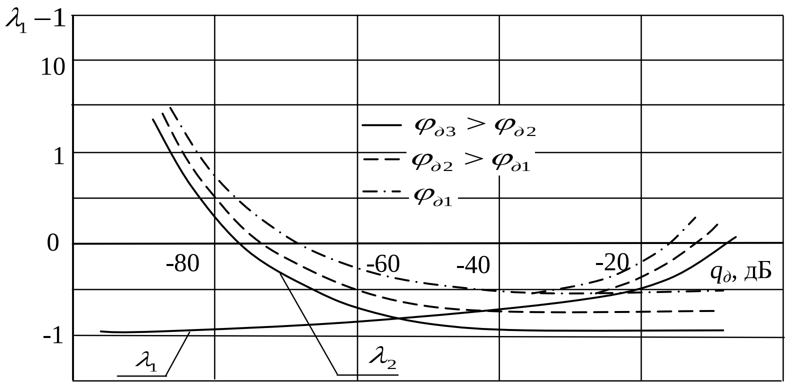

Рис. 2. Зависимость собственных значений переходной матрицы от энергии деструктивного возмущения

Видно, что нижняя граница области устойчивости определяется энергией информативного воздействия, а верхняя – деструктивного возмущения. С уменьшением приращения мнимой части элементов вектора входных воздействий область устойчивости АДС уменьшается.

На рис. 3 иллюстрируется зависимость собственного значения ковариационной матрицы входных воздействий от соотношения частот информативного воздействия и деструктивного возмущения.

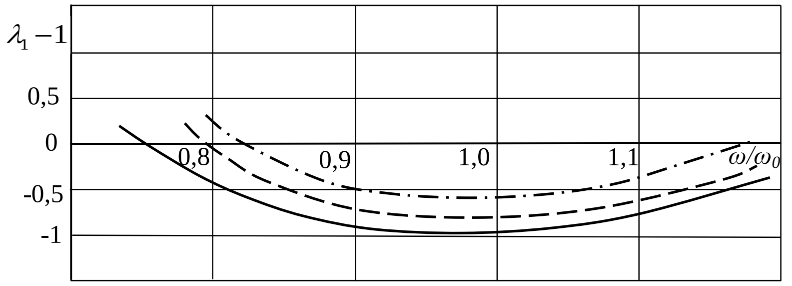

Рис. 3. Зависимость собственных значений переходной матрицы от частоты деструктивного возмущения

Наибольшая устойчивость АДС обеспечивается при равенстве частот. С уменьшением приращения мнимой части элементов вектора входных воздействий область устойчивости АДС уменьшается.

Таким образом, результаты проведенных исследований показывают, что для определения границ устойчивости АДС в области изменения характеристик входных воздействий достаточно установить границы устойчивости дифференциальных уравнений, описывающих изменения ВВК во времени. Выбором параметров информационных воздействий и характеристик подсистем регрессии и адаптации можно варьировать границами области устойчивости АДС.

Список использованных источников и литературы

1. Тузов Г.И. Адресные системы управления и связи. Вопросы оптимизации / Тузов Г.И., Фурядников Ю.Ф., Прытков В.И. и др. Под ред. Г.И. Тузова. – М.: Радио и связь, 1993.
2. Беллман Р. Теория устойчивости дифференциальных уравнений / Р. Беллман. – М.: Мир, 1955.
3. Клыков Ю.И. Ситуационное управление большими системами / Ю.И. Клыков. – М.: Энергия, 1974.
4. Музыкин С.Н. Моделирование динамических систем / С.Н. Музыкин, Ю.М. Родионова. – Ярославль: Верхневолжское книжное издательство, 1984, 304 с.
5. Попов А.А. Основы общей теории систем. Части I, II / А.А. Попов, И.М. Телушкин, С.Н. Бушуев и др. – Санкт-Петербург: ВАС, 1992.
6. Андерсон Б. Устойчивость адаптивных систем: Перевод с английского / Б. Андерсон, Р. Битмид, К. Джонсон и др. – М.: Мир, 1989.

7. Докукин А.В., Ершова Т.Б., Коновалов В.А., Стреха А.А. Основы разработки стандартов информационной безопасности // Стандарты и качество. 2008. № 8.