

УДК 681.51

**О КОНТРОЛЕ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ СВОЙСТВ ОБЪЕКТА
УПРАВЛЕНИЯ И ЕГО ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ****В.Ф. Евтушенко, Г.В. Макаров, Е.В. Буркова***Сибирский государственный индустриальный университет*

Предложен вариант алгоритма текущего контроля нестационарности объекта управления совместно с действующими на него неконтролируемыми возмущениями и проведены численные исследования его эффективности. Основное назначение алгоритма связано с оперативным выявлением причин нестационарности: изменение динамических свойств преобразующих каналов объекта управления либо неконтролируемых возмущений, оцениваемых косвенно по приведенным к выходу объекта возмущениям. В алгоритме используются четыре признака, включая два показателя точности функционирования системы регулирования и точности экстраполяции приведенного возмущения, а также два коэффициента корреляции как показатели линейной статистической связи между указанными точностными характеристиками и ошибками регулирования и экстраполяции. Контроль нестационарности свойств объекта управления и внешних возмущений базируется на текущем расчете значений этих признаков, анализе их трендов и знака этих трендов. Даны структурная схема и описание алгоритма контроля нестационарности объекта управления и его внешних возмущений. Для оценивания информативности выбранных признаков и соответственно эффективности предлагаемого алгоритма проведено численное моделирование функционирования системы регулирования по отклонению при изменении свойств приведенного возмущения (дисперсии и показателя спада автокорреляционной функции), а также при увеличении и уменьшении коэффициента передачи по каналу преобразования регулируемых воздействий. По результатам численного моделирования сделаны выводы о работоспособности и эффективности предложенного алгоритма.

Ключевые слова: алгоритм контроля нестационарности, система регулирования, приведенные возмущения, информативность признаков, численное моделирование, преобразующие каналы объекта.

DOI: 10.17212/1727-2769-2015-4-71-83

Введение

Натурные объекты управления, например технологические агрегаты, и протекающие в них процессы характеризуются тем, что их основные свойства и условия функционирования зачастую не являются постоянными. Это связано с изменением качества поставляемого сырья, нестабильностью работы и износом технологического оборудования, старением агрегатов и другими причинами. Кроме того функционирование технологических объектов управления осуществляется в условиях постоянно действующих неконтролируемых возмущений, косвенная оценка которых показывает, что их свойства также изменяются.

Выявление устойчивых тенденций динамических свойств объектов управления и действующих на них возмущений (контролируемых и неконтролируемых) есть одна из важных задач в системе управления нестационарными объектами. В дальнейшем взаимосвязанную совокупность объекта управления и влияющих на его состояние внешних возмущений будем называть комплексом «объект управления – внешнее возмущение» или сокращенно «О–В». Указанная задача яв-

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ, проект № 15-07-01972.

ляется актуальной, в частности, при установлении подобия систем управления [1], а также при идентификации объектов управления [2, 3]. В первом случае оценивание нестационарности свойств «О–В» диктуется необходимостью целенаправленного изменения (управления) этими свойствами с целью сохранения подобия систем управления нестационарными объектами. Во втором случае это необходимо для проведения активных или комбинированных экспериментов с целью получения достоверных данных для построения адекватных математических моделей каналов преобразования объекта управления, если по результатам работы алгоритма контроля нестационарности принято решение об идентификации объекта.

Поэтому для систем управления такими объектами целесообразно разрабатывать и реализовывать специальные алгоритмы контроля нестационарности свойств «О–В». Такие алгоритмы должны однозначно выявлять причины появления нестационарности: изменений динамических свойств каналов преобразования объекта управления или свойств действующих на него возмущений. В дальнейшем с целью упрощения, но без потери общности, будем рассматривать разработку и исследование алгоритма оценивания нестационарности применительно к объекту, являющемуся частью системы автоматического регулирования (САР) по отклонению.

1. Алгоритм контроля нестационарности

Ниже рассматривается один из вариантов алгоритма контроля нестационарности «О–В», в основу которого положены следующие гипотезы.

1. Структура модели преобразующих каналов объекта управления остается постоянной в процессе его функционирования, значения ее параметров изменяются со скоростью, существенно меньшей, чем скорость изменения значений приведенного к выходу объекта возмущения, как интегральной характеристики неконтролируемых возмущений в масштабе изменений его выходной переменной.

2. Дрейф динамических характеристик каналов преобразования объекта управления и существенные изменения таких свойств внешних возмущений как их уровень, разброс относительно этого уровня, память динамического процесса (ряда) обязательно окажут влияние на эффективность функционирования систем управления. Следовательно, соответствующие критерии эффективности будут количественно отображать это изменение, в частности, среднемодульная ошибка регулирования $Q_p(i)$, где i – дискретное время, будет возрастать при увеличении дисперсии внешних возмущений.

Можно надеяться с большой вероятностью, что текущее отслеживание значений такой ошибки регулирования, принятой в качестве признака, позволит оперативно оценивать зарождающуюся тенденцию свойств нестационарного «О–В». Однако однозначно определить причину появления этой тенденции, основываясь только на анализе одного такого критерия, по-видимому, невозможно. Следует дополнительно привлекать для этой цели другие информативные признаки.

3. Аналогичные рассуждения позволили сформировать в качестве признаков нестационарных свойств «О–В» следующий вектор:

$$P = \{P_j\}; \quad j = 1, 2, 3, 4, \quad (1)$$

где P_1 – среднемодульная ошибка регулирования $Q_p(i)$; P_2 – среднемодульная ошибка экстраполяции $Q_s(i)$ приведенных к выходу объекта регулирования возмущений; P_3 – оценка коэффициента корреляции $r_q(i)$, отражающая линейную

статистическую связь текущих значений критериев $Q_p(i)$ и $Q_3(i)$; P_4 – оценка коэффициента корреляции $r_\varepsilon(i)$, отражающая линейную статистическую связь текущих значений ошибок регулирования $\varepsilon_p(i)$ и экстраполяции приведенных возмущений $\varepsilon_3(i)$.

4. Будем считать также, что реакции выбранных в качестве признаков показателей «О – В» будут значимо отличаться друг от друга при одинаковых изменениях свойств объекта управления и/или действующих на него внешних возмущений. В этом случае каждый конкретный тип нестационарности «О – В» должен характеризоваться различным сочетанием качественных изменений выбранных признаков, а это в свою очередь позволит оценить причину его нестационарности.

5. Для выявления зарождающихся изменений (тенденций) выбранных признаков целесообразно использовать вычислительную процедуру, основанную на расчете текущих значений оценки скорости изменения $\hat{v}(i)$ соответствующего признака, полагая при этом, что выполнение условия

$$|\hat{v}(i)| \geq \delta v, \quad (2)$$

где δv – допустимое значение скорости тренда соответствующего признака нестационарности, превышение которого соответствует началу зарождения тенденции, характеризует появление тенденции в исследуемом динамическом ряде, а многократное выполнение условия (2) характеризует устойчивое наличие этой тенденции.

На рис. 1 приведены укрупненная структура и краткое описание алгоритма контроля нестационарности свойств «О – В». В основу ее формирования положена многоэтапная итерационная процедура, включающая первоначальное формирование нескольких перспективных вариантов алгоритма, настройку, исследование и оценку эффективности каждой структуры с помощью модельных, натурно-модельных экспериментов и последующую корректировку первоначально выбранных вариантов.

В алгоритме предусматривается реализация следующих основных операций.

Ввод исходных данных о входных, выходных воздействиях и проверка их достоверности производится в алгоритмическом блоке (АБ) 1.

При вводе исходных данных в процессе функционирования системы используются типовые процедуры, как правило, предусматривающие следующих два способа [4]:

- автоматический, из общей базы исходных данных при наличии действующей автоматизированной информационной системы;
- ручной, с помощью клавиатуры ЭВМ и (или) специальных устройств ручного ввода данных.

Проверка достоверности исходных данных $Z(i)$ осуществляется после их ввода и включает как типовые логические операции, используемые практически в любых алгоритмах, так и нетиповые, учитывающие конкретные задачи и особенности объектов исследования. К числу типовых, в частности, относятся проверка попадания текущих значений в рабочий (допустимый) диапазон их изменения как по уровню

$$Z^{\min} \leq Z(i) \leq Z^{\max}, \quad (3)$$

так и по приращениям $\delta Z(i) = |Z(i) - Z(i-1)|$,

$$\delta Z^{\min} \leq \delta Z(i) \leq \delta Z^{\max}. \quad (4)$$

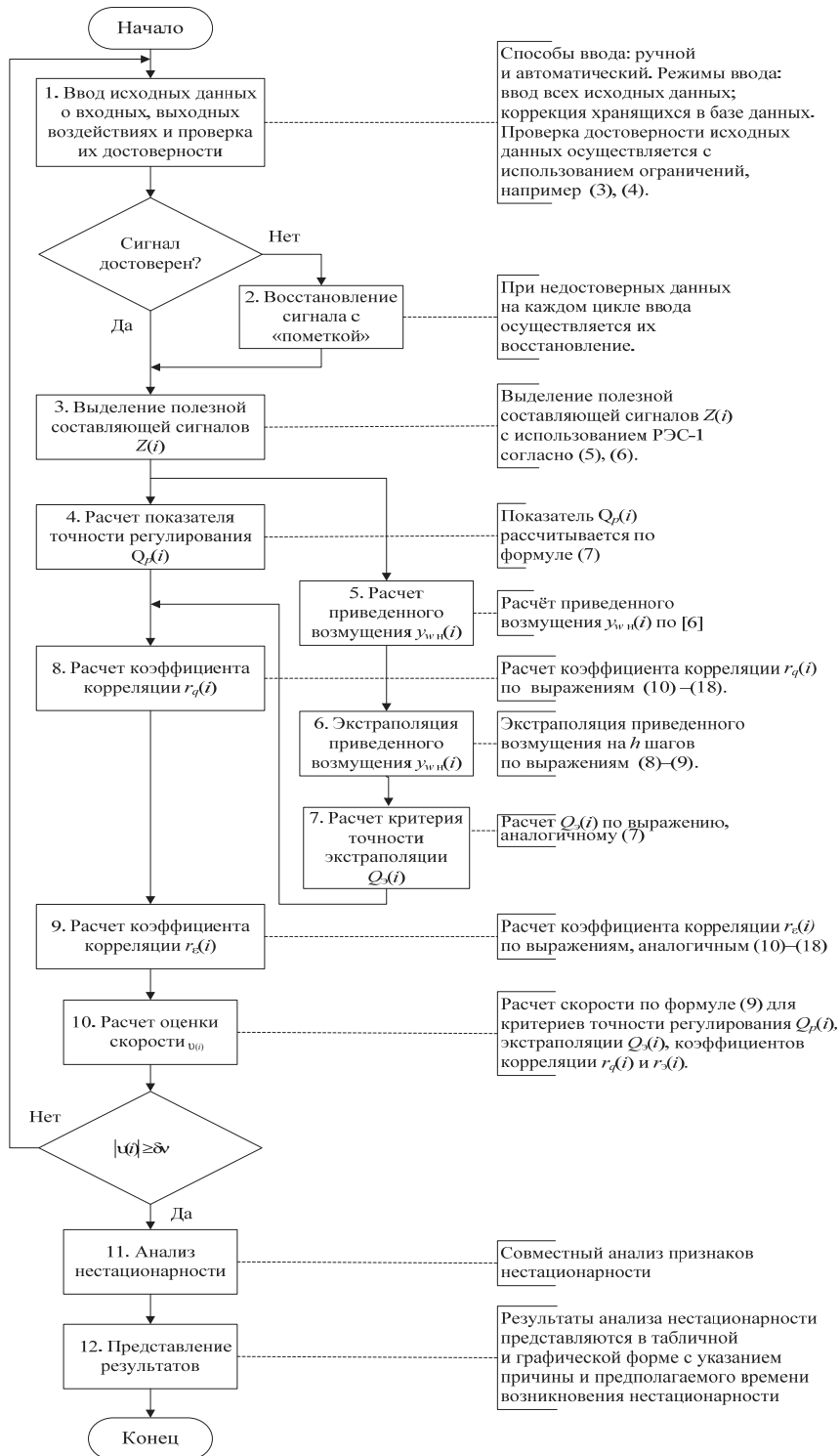


Рис. 1 – Структура алгоритма контроля нестационарности «О–В»

Fig. 1 – Structure of the control algorithm unsteadiness «O–B»

В случае недостоверности сигнала $Z(i)$ осуществляется в АБ 2 его восстановление, для чего могут быть использованы, например, алгоритмы экстраполяции [5]. Восстановленный сигнал, как правило, сопровождается соответствующей меткой.

Выделение полезной составляющей сигналов $Z(i)$ в АБ 3 осуществляется с помощью известных процедур фильтрации [5], конкретная структура которых определяется свойствами самого сигнала. В частности, при наличии грубых ошибок (выбросов) могут быть применены процедуры релейно-экспоненциального сглаживания первого порядка (РЭС-1). Формульное представление алгоритма РЭС-1 имеет вид:

$$\tilde{Z}_m(i) = \tilde{Z}_m(i-1) + \alpha_m \cdot \begin{cases} [Z_m(i) - \tilde{Z}_m(i-1)] & \text{при } |[\cdot]| \leq \beta_m; \\ \beta_m \cdot \text{Sign}([\cdot]) & \text{при } |[\cdot]| > \beta_m, \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{Sign}(\cdot) = \begin{cases} -1 & \text{при } (\cdot) < 0; \\ 0 & \text{при } (\cdot) = 0; \\ 1 & \text{при } (\cdot) > 0. \end{cases} \quad (6)$$

Значение показателя точности регулирования $Q_p(i)$ рассчитывается в АБ 4 на каждом шаге моделирования в соответствии с выражением

$$Q_p(i) = Q_p(i-1) + \alpha_p [|y^*(i) - y(i)| - Q_p(i-1)], \quad (7)$$

где α_p – коэффициент сглаживания, $y^*(i)$ и $y(i)$ – соответственно задающее и выходное воздействия системы регулирования.

Приведенное возмущение $y_{\text{вн}}(i)$ рассчитывается в АБ 5. Существует две схемы расчета приведенных возмущений. Первая из них [6] предназначена для расчета приведенных к выходу объекта $y_{\text{вн}}(i)$ возмущений и использует математические модели каналов преобразования отклонений входных (регулирующих $u(i)$ и контролируемых внешних $w_k(i)$) воздействий объекта в отклонения выходных воздействий $y(i)$, а также регистрируемые в действующей системе данные о входных и выходных воздействиях. Согласно второй схеме [7] неконтролируемые возмущения приводятся к одному из управляющих входов объекта управления. Отметим, что изложенные в [6] и [7] схемы косвенного оценивания неконтролируемых возмущений справедливы при выполнении гипотезы о линейности объекта. В предлагаемом алгоритме контроля нестационарности «О–В» в качестве косвенной оценки неконтролируемых возмущений используются оценки $y_{\text{вн}}(i)$ приведенных к выходу объекта управления возмущений. Однако можно предположить, что свойства алгоритма и его эффективность существенно не изменятся при использовании в нем возмущения, приведенного к одному из регулирующих входов.

Экстраполяция приведенного возмущения $y_{\text{вн}}^3(i+h)$; $h = 1, 2, 3, \dots, H$, осуществляется в АБ 6 на h будущих шагов дискретного времени с использованием на i -м шаге оценки скорости $\tilde{v}_y(i)$ тренда экстраполируемого сигнала

$$y_{\text{вн}}^3(i+h) = \tilde{y}_{\text{вн}}(i) + h\tilde{v}_y(i); \quad (8)$$

$$\tilde{y}_y(i) = \frac{\tilde{y}_{\text{вн}}(i) - \tilde{y}_{\text{вн}}(i-L)}{L}, \quad (9)$$

где L – настроечный параметр.

Расчет критерия точности $Q_3(i)$ экстраполяции значений приведенных возмущений осуществляется в АБ 7 в соответствии с выражением, аналогичным (7).

Оценка коэффициента корреляции $r_q(i)$ между значениями критериев точности регулирования $Q_p(i)$ и экстраполяции $Q_3(i)$ рассчитывается в АБ 8 в соответствии со следующими выражениями:

$$r_q(i) = \frac{R_q(i)}{\sigma_p(i)\sigma_3(i)}; \quad (10)$$

$$R_q(i) = R_q(i-1) + \alpha_R [\delta Q_p(i) \cdot \delta Q_3(i) - R_q(i-1)]; \quad (11)$$

$$\delta Q_p(i) = Q_p(i) - Q_p^{\text{cp}}(i); \quad (12)$$

$$\delta Q_3(i) = Q_3(i) - Q_3^{\text{cp}}(i); \quad (13)$$

$$Q_p^{\text{cp}}(i) = Q_p^{\text{cp}}(i-1) + \alpha_p [Q_p(i) - Q_p^{\text{cp}}(i-1)]; \quad (14)$$

$$Q_3^{\text{cp}}(i) = Q_3^{\text{cp}}(i-1) + \alpha_3 [Q_3(i) - Q_3^{\text{cp}}(i-1)]; \quad (15)$$

$$\sigma_p^2(i) = \sigma_p^2(i-1) + \alpha_\sigma [\delta q_p^2(i) - \sigma_p^2(i-1)]; \quad (16)$$

$$\sigma_3^2(i) = \sigma_3^2(i-1) + \alpha_\sigma [\delta Q_3^2(i) - \sigma_3^2(i-1)]; \quad (17)$$

$$\sigma_\varepsilon(i) = \sqrt{\sigma_\varepsilon^2(i)}; \quad \sigma_u(i) = \sqrt{\sigma_u^2(i)}, \quad (18)$$

где $R_q(i)$ – корреляционный момент между $Q_p(i)$ и $Q_3(i)$ в i -й момент времени; $Q_p^{\text{cp}}(i)$, $Q_3^{\text{cp}}(i)$ – средние значения показателей $Q_p(i)$ и $Q_3(i)$; α_R , α_ε , α_σ – коэффициенты сглаживания; $\sigma_p^2(i)$, $\sigma_3^2(i)$ – дисперсии критериев точности регулирования $Q_p(i)$ и экстраполяции $Q_3(i)$, рассчитанные в i -й момент времени.

Оценка коэффициента корреляции $r_\varepsilon(i)$ между ошибками регулирования и экстраполяции рассчитывается в АБ 9 по выражениям (10)–(18). Расчет оценки скорости тренда (АБ 10) по каждому признаку нестационарности осуществляется в соответствии с выражением (9). Для последующего анализа дрейфа параметров динамической модели каналов преобразования входных воздействий объекта регулирования и статистических характеристик этих воздействий в логическом блоке осуществляется проверка условия (2). Устойчивое (подряд наперед заданном числе шагов расчета) выполнение этого условия должно характеризовать тенденцию по каждому из выбранных признаков.

Анализ нестационарности свойств «О–В» производится в АБ 11, исходя из данных о наличии тренда признаков, а также знака этого тренда. По их сочетанию возможно сделать вывод о причине нестационарности, а также времени ее воз-

никновения. Результаты анализа признаков представляются (АБ 12) исследователю как в графической, так и в табличной форме с указанием причины и времени возникновения нестационарности с целью принятия решения о направлении дальнейших исследований или реализации соответствующих управляющих воздействий, в частности, для увеличения степени подобия систем управления.

2. Численные исследования алгоритма

Численные исследования, модельные и натурно-модельные, были проведены для нескольких вариантов объектов и законов регулирования. В работе приводятся постановка, схема и результаты решения задачи численного исследования алгоритма оценивания нестационарности О–В для системы регулирования с моделью объекта, представленной инерционным звеном первого порядка с запаздыванием, как наиболее распространенной в производственной практике.

Основной целью исследования является оценивание работоспособности и эффективности алгоритма контроля нестационарности «О–В», которые в основном будут определяться информативностью вектора признаков $P(i)$. В дальнейшем под информативностью признака будем понимать его свойство значимо изменять свое значение при изменении динамических свойств каналов преобразования объекта регулирования и влияющих на его состояние внешних воздействий, чтобы своевременно оценить зарождающиеся тенденции нестационарности комплекса «О–В». При этом важно не только своевременно определить зарождающиеся тенденции нестационарности, но и ее причину: изменение динамических свойств преобразующих каналов объекта и/или характеристик внешних воздействий.

Краткая постановка задачи исследования представлена в следующем виде.

Дано

1. Структура системы регулирования по отклонению при наличии постоянно действующих на объект неконтролируемых возмущений $w_n(s)$ (рис. 2).

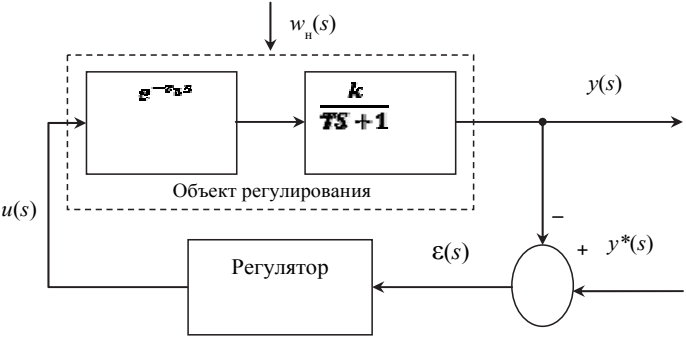


Рис. 2 – Блок-схема САР по отклонению

Fig. 2 – Block diagram of the ACS in the deviation

На рис. 2 приняты следующие обозначения: $u(s)$ – регулирующее воздействие, $w_n(s)$ – неконтролируемые внешние возмущения, $y(s)$ – выходное воздействие, $y^*(s)$ – задающее воздействие, $\epsilon(s)$ – ошибка регулирования, представленные в пространстве оператора дифференцирования s .

Модель объекта представлена в операторной форме выражением

$$\varphi(s) = \frac{k_{и}}{T_{и}s + 1} e^{-\tau_{и}s}, \tag{19}$$

где $k_{\text{и}}$ – коэффициент передачи, $T_{\text{и}}$ – время инерции, $\tau_{\text{и}}$ – время запаздывания канала преобразования регулирующих воздействий.

Регулятор, реализующий пропорционально-интегральный закон регулирования, со значениями параметров, определенными в соответствии с инженерной методикой [6].

В рекуррентно-разностную форму выражения преобразовывали методом Z-преобразования.

2. Алгоритм контроля нестационарности «О–В».

3. Вектор признаков $P(i)$.

Требуется

Оценить работоспособность и эффективность функционирования алгоритма контроля нестационарности объекта управления и влияющих на его состояние внешних воздействий.

Условия моделирования

1. Для моделирования системы регулирования по отклонению (рис. 2) использовали эквивалентную ей модельную схему с приведенным к выходу объекта возмущением [6] и нулевыми начальными условиями.

2. Приведенные к выходу объекта возмущения представляли модельными и натурно-модельными стационарными динамическими временными рядами с заданной автокорреляционной функцией (АКФ) $r_{\text{пр}}(\theta)$; значения возмущений формировали с помощью алгоритма в виде замкнутой динамической системы [8].

$$r_{\text{пр}}(\theta) = \sigma_{\text{пр}}^2 e^{-\alpha|\theta|}, \quad (20)$$

где $\sigma_{\text{пр}}^2$ – дисперсия приведенного возмущения, α – коэффициент спада АКФ, θ – время сдвига между сечениями ряда приведенных возмущений с диапазонами

$$1,0 \leq \sigma_{\text{пр}}^2 \leq 2,0; \quad 0,01 \leq \alpha \leq 0,1. \quad (21)$$

3. Ограничение в виде условия воспроизводимости реализаций приведенных возмущений в стационарном режиме (при постоянных значениях параметров $k_{\text{и}}$, $T_{\text{и}}$, $\tau_{\text{и}}$, $\sigma_{\text{пр}}^2$ и α , выраженное через целевой критерий эффективности системы, в частности через среднемодульную ошибку регулирования $Q_p^{\text{н}}$,

$$\left| Q_{pk}^{\text{н}} - Q_{pl}^{\text{н}} \right| \leq 0,05; \quad k \neq l, \quad (22)$$

где k, l – условный номер реализаций приведенного возмущения; надстрочный символ «н» означает нормализованные значения критерия, рассчитанные как отношение их текущих значений к средневыборочному.

4. Значения среднемодульной ошибки регулирования $Q_p(i)$ и экстраполяции $Q_3(i)$ рассчитывали по выражениям, аналогичным (7), а оценки коэффициента корреляции $r_{\text{пр}}(\theta)$ $r_q(i)$ и $r_{\varepsilon}(i)$ – по выражениям (10)–(18).

5. Интервал моделирования изменяли в диапазоне $I = 3000 \dots 6000$ с. Шаг дискретизации по времени $\Delta t = 1$ с. Значения коэффициента по α меняли с шагом дискретизации $\Delta \alpha = 0,01$.

Схема проведения численного эксперимента

В процессе численного моделирования было реализовано два режима функционирования модельного комплекса «О–В» и, соответственно, два режима функционирования системы регулирования. Первый – стационарный режим, который характеризовался постоянными значениями параметров модельного объекта регулирования $k_{и}, T_{и}, \tau_{и}$, а также постоянными значениями характеристик приведенного возмущения $y_{вн}(i)$: дисперсии и коэффициента спада нормированной автокорреляционной функции. Второй режим – нестационарный, когда в процессе моделирования целенаправленно изменяли параметры модели объекта и приведенных возмущений.

Основная задача первого режима моделирования заключалась в определении таких значений параметров рекуррентно-разностных соотношений для расчета значений составляющих вектора признаков P , которые обеспечили бы требуемую точность воспроизводимости реализаций приведенных к выходу объекта возмущений, выраженную через ограничение (22). Для этого использовали поисковые процедуры оптимизации, в частности основанные на методе деформируемых многогранников [9, 10].

Во втором режиме численного моделирования оценивали информативность вектора признаков P при изменении значений коэффициента передачи объекта регулирования, дисперсии и коэффициента спада автокорреляционной функции приведенного возмущения. В первой серии численных экспериментов изменяли значения коэффициента передачи $k_{и}$ модели объекта, оставляя неизменными значения других ее параметров $T_{и}$ и $\tau_{и}$, а также дисперсии и коэффициента спада автокорреляционной функции приведенных возмущений. При этом значения коэффициента $k_{и}$ меняли в диапазоне

$$0,5k_{и} = k_{и}^{\min} \leq k_{и} \leq k_{и}^{\max} = 1,5k_{и} \tag{23}$$

с шагом дискретности $\Delta k = 0,1$.

Во второй серии численных экспериментов при постоянных значениях параметров модели объекта регулирования $k_{и}, T_{и}, \tau_{и}$ поочередно изменяли значения дисперсии с шагом $\Delta \sigma^2 = 0,1$ и показателя спада нормированной автокорреляционной функции приведенных возмущений с шагом $\Delta \alpha = 0,01$.

Результаты исследований

Результаты проведенных численных исследований обобщены ниже в таблице в виде качественных характеристик («0», «–», «+») тенденций признаков $P_1...P_4$.

Изменения признаков $P_1...P_4$ от вида нестационарности
The signs $P_1...P_4$ depends on the type of unsteadiness

| Вид нестационарности | Признак | | | |
|--------------------------------------|---------|-------|-------|-------|
| | P_1 | P_2 | P_3 | P_4 |
| 1. Стационарный режим | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2. Увеличение коэффициента передачи | + | + | – | – |
| 3. Уменьшение коэффициента передачи | 0 | + | + | + |
| 4. Увеличение дисперсии возмущения | + | + | 0 | 0 |
| 5. Увеличение коэффициента спада АКФ | + | 0 | 0 | – |
| 6. Уменьшение коэффициента спада АКФ | – | 0 | 0 | + |

В таблице «0» означает, что значения соответствующего признака колеблются в допустимых пределах, «-» означает устойчивую тенденцию признака к уменьшению с пересечением нижней границы предела, а «+» означает устойчивую тенденцию признака к увеличению с пересечением верхней границы предела.

По результатам исследования сделаны следующие выводы.

1. Использование поисковой процедуры на базе метода деформируемого многогранника позволило осуществить настройку алгоритма контроля нестационарности «О-В» и, соответственно, удовлетворить требования (22), характеризующие условия функционирования этого комплекса в стационарном режиме.

2. Все из выбранных признаков по-разному реагируют на изменения коэффициента передачи объекта по каналу преобразования регулирующих воздействий, а также на изменения дисперсии и коэффициента спада нормированной автокорреляционной функции приведенных к выходу объекта регулирования возмущений (см. таблицу), что указывает на работоспособность исследуемого алгоритма контроля. Из таблицы видно, что для распознавания приведенных в ней видов нестационарности достаточно использовать только два признака P_1 и P_2 , тем не менее другие признаки P_3 и P_4 были оставлены в составе вектора P для дальнейших исследований других видов нестационарности.

3. Уменьшение значений признаков P_3 , P_4 и одновременное увеличение признаков P_1 , P_2 свидетельствуют об увеличении коэффициента передачи объекта и могут быть распознаны через 350 шагов отсчета. Рост значений признаков P_2 , P_3 , P_4 и отсутствие реакции у признака P_1 характеризуют уменьшение коэффициента k , при этом показатель P_4 является более чувствительным и позволяет распознать уменьшение коэффициента передачи объекта уже через 250 шагов расчета.

4. Совместное увеличение значений признаков P_1 и P_2 при неизменных значениях P_3 и P_4 свидетельствует об увеличении дисперсии приведенного возмущения, при этом признак P_2 реагирует раньше и через 300 шагов расчета можно распознать этот вид нестационарности.

5. Увеличение P_1 и уменьшение P_4 при неизменных P_2 и P_3 свидетельствуют об увеличении коэффициента спада автокорреляционной функции приведенного возмущения, при этом значения признаков P_1 и P_4 реагируют одинаково оперативно и можно распознать нестационарность возмущений спустя 400 шагов расчета. Уменьшение значений признаков P_1 и P_4 при неизменных P_2 и P_3 характеризует уменьшение коэффициента спада автокорреляционной функции приведенного возмущения и может быть определено спустя 400 шагов расчета.

Заключение

1. Алгоритм оценивания нестационарности объекта управления и его внешних воздействий целесообразно разрабатывать, основываясь на расчете и анализе сформированного множества таких показателей, как среднемодульные ошибки регулирования и экстраполяции приведенного возмущения, оценки коэффициентов корреляции между этими критериями, а также между ошибками регулирования и экстраполяции приведенного возмущения.

2. Результаты численных исследований предложенного алгоритма контроля нестационарности свойств объекта, функционирующего в составе системы регулирования по отклонению, и его внешних воздействий подтверждают целесообразность его использования после соответствующей настройки, в действующих системах регулирования нестационарных объектов для их эффективного функционирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Понятия и условия подобия систем управления / Л.П. Мышляев, В.Ф. Евтушенко, Д.Г. Березин, Г.В. Макаров, К.А. Ивушкин // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2012. – № 12. – С. 58–60.
2. **Цыпкин Я.З., Поляк Б.Т.** Идентификация нестационарных динамических объектов // Итоги науки и техники. Техническая кибернетика. – 1987. – Т. 21. – С. 68–91.
3. Идентификация динамических характеристик установки сжигания водоугольного топлива / Л.П. Мышляев, В.Ф. Евтушенко, К.Г. Венгер, М.Г. Чичиндаев, А.А. Куценко // Вестник КузГТУ. – 2011. – № 5. – С. 117–122.
4. Теория и практика прогнозирования в системах управления / С.В. Емельянов, С.К. Коровин, Л.П. Мышляев, А.С. Рыков, В.Ф. Евтушенко, С.М. Кулаков, Н.Ф. Бондарь. – Кемерово: Кузбассвуиздат – АСТШ; М.: Российские университеты, 2008. – 487 с.
5. **Андерсен Т.** Статистический анализ временных рядов: пер. с англ. – М.: Мир, 1976. – 756 с.
6. **Ротач В.Я.** Расчет динамики промышленных автоматических систем регулирования. – М.: Энергия, 1973. – 439 с.
7. **Барковский В.В., Захаров В.Н., Шаталов А.С.** Методы синтеза систем управления. – М.: Машиностроение, 1969. – 385 с.
8. Генератор модельных воздействий с заданными свойствами как замкнутая динамическая система / Л.П. Мышляев, В.Ф. Евтушенко, Г.В. Макаров, Е.В. Буркова // Информационно-телекоммуникационные системы и технологии: материалы Всероссийской научно-практической конференции, г. Кемерово, 16–17 октября 2014 г. – Кемерово, 2014. – С. 402–403.
9. **Рыков А.С.** Методы системного анализа: оптимизация. – М.: Экономика, 1999. – 255 с.
10. **Рыков А.С.** Симплексно-градиентные поисковые алгоритмы оптимизации // Проблемы оптимизации в системных исследованиях / отв. ред. В.В. Калашников. – М., 1978. – С. 20–24.

DETECTION OF NONSTATIONARY CHARACTERISTICS OF A PLANT AND ITS EXTERNAL INFLUENCES

Evtushenko V.F., Makarov G.V., Burkova E.V.

Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russian Federation

An alternative algorithm of monitoring plant nonstationarity and uncontrolled disturbances acting on it is proposed in the paper. In addition, a computational investigation of the algorithm efficiency is conducted. The main function of the algorithm is the detection of nonstationarity i.e. changing of dynamical characteristics of plant transforming channels or uncontrolled disturbances estimated indirectly by the output disturbances. The algorithm includes 4 criteria, namely, two indicators of control system operation accuracy and the extrapolation accuracy of the reduced output disturbance as well as two correlation coefficients as indicators of linear statistical relation between accuracy indicators and control and extrapolation errors. The detection of nonstationarity characteristics of the plant and its external disturbances is based on current calculations of indicator values, on the analysis of indicator trends and on the sign of trends. The structure and description of the plant nonstationarity control algorithm are proposed in the paper. A computational investigation has been performed to assess the information value of the indicators as well as the algorithm efficiency. The computational modeling of the control system functioning when the output disturbance characteristics such as variance and properties of the autocorrelation function change as well as when the plant transfer coefficient increases or decreases has been conducted. Based on the numerical modeling results some conclusions concerning the capacity for work and efficiency of the algorithm are presented in this paper.

Keywords: nonstationarity control algorithm; control system; uncontrolled output disturbances; information value of indicators; numerical modeling; plant transforming channels.

DOI: 10.17212/1727-2769-2015-4-71-83

REFERENCES

1. Myshlyaev L.P., Evtushenko V.F., Berezin D.G., Makarov G.V., Ivushkin K.A. Similarity of control systems. *Steel in Translation*, 2012, vol. 42, no. 12, pp. 823–824. doi: 10.3103/S0967091212120066. Translated from *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Chernaya metallurgiya*, 2012, no. 12, pp. 58–60.
2. Tsyppkin Ya.Z., Polyak B.T. Identifikatsiya nestatsionarnykh dinamicheskikh ob"ektov [Identification of nonstationary dynamic plants]. *Itogi nauki i tekhniki. Tekhnicheskaya kibernetika – The results of science and technology. Technical cybernetics*, 1987, vol. 21, pp. 68–91.
3. Myshlyaev L.P., Evtushenko V.F., Venger K.G., Chichindaev M.G., Kutsenko A.A. Identifikatsiya dinamicheskikh kharakteristik ustanovki szhiganiya vodougol'nogo topliva [Identification of dynamical characteristics of a plant for burning of water-coal fuel]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Vestnik of Kuzbass State Technical University*, 2011, no. 5, pp. 117–122.
4. Emel'yanov S.V., Korovin S.K., Myshlyaev L.P., Rykov A.S., Evtushenko V.F., Kulakov S.M., Bondar' N.F. *Teoriya i praktika prognozirovaniya v sistemakh upravleniya* [Theoretical and practical aspects of prediction in control systems]. Kemerovo, Kuzbassvuzizdat – ASTSh Publ., Moscow, Rossiiskie universitety Publ., 2008. 487 p.
5. Andersen T. *The statistical analysis of time series*. New York, Wiley-Interscience Publ., 1994. 720 p. (Russ. ed.: Andersen T. *Statisticheskii analiz vremennykh ryadov*. Translated from English. Moscow, Mir Publ., 1976. 756 p.).
6. Rotach V.Ya. *Raschet dinamiki promyshlennykh avtomaticheskikh sistem regulirovaniya* [Dynamic calculations of industrial automatic control systems]. Moscow, Energiya Publ., 1973. 439 p.
7. Barkovskii V.V., Zakharov V.N., Shatalov A.S. *Metody sinteza sistem upravleniya* [Methods of control system synthesis]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1969. 385 p.
8. Myshlyaev L.P., Evtushenko V.F., Makarov V.G., Burkova E.V. [Generator of modeling influences with defined properties as closed dynamic system]. *Informatsionno-telekommunikatsionnye sistemy i tekhnologii: materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Information and telecommunication systems and technologies: materials of the All-Russian scientific and practical conference], Kemerovo, 16–17 October 2014, pp. 402–403.
9. Rykov A.S. *Metody sistemnogo analiza: optimizatsiya* [Methods of systems analysis: optimization]. Moscow, Ekonomika Publ., 1999. 255 p.
10. Rykov A.S. Simpleksno-gradientnye poiskovye algoritmy optimizatsii [Simplex-gradient search algorithms of optimization]. *Problemy optimizatsii v sistemnykh issledovaniyakh* [Problems of optimization in research systems]. Ed. V.V. Kalashnikov. Moscow, 1978, pp. 20–24.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Евтушенко Виктор Федорович – родился в 1941 году, д-р техн. наук, профессор кафедры АИС Сибирского государственного индустриального университета. Область научных интересов: моделирование, прогнозирование, идентификация, подобие систем управления. Опубликовано 209 научных работ. (Адрес: 654007, Россия, Новокузнецк, Кирова, 42. Email: evtushenko_vf@sibsiu.ru).

Evtushenko Viktor Fedorovich (b. 1941) – Doctor of Science (Eng.), Professor at the AIS Department in the Siberian State Industrial University. His research interests are currently focused on modeling, forecasting, identification, and similarity of control systems. He is the author of 209 scientific papers. (Address: 42, Kirov Str., Novokuznetsk, 654007, Russian Federation. Email: evtushenko_vf@sibsiu.ru).



Макаров Георгий Валентинович – родился в 1989 году, старший преподаватель кафедры АИС Сибирского государственного индустриального университета. Область научных интересов: моделирование, анализ данных, подобие систем управления. Опубликовано 36 научных работ. (Адрес: 654007, Россия, Новокузнецк, Кирова, 42. Email: maggog1@gmail.com).

Makarov Georgy Valentinovich (b. 1989) – Senior Lecturer at the AIS Department in the Siberian State Industrial University. His research interests are currently focused on modeling, data analysis, and similarity of control systems. He is the author of 36 scientific papers. (Address: 42, Kirov Str., Novokuznetsk, 654007, Russian Federation. Email: maggog1@gmail.com).



Буркова Екатерина Владимировна – родилась в 1991 году, аспирант, кафедры АИС Сибирского государственного индустриального университета. Область научных интересов: моделирование, подобие систем управления. Опубликовано 16 научных работ. (Адрес: 654007, Россия, Новокузнецк, Кирова, 42. Email: e.v.burkova@gmail.com).

Burkova Ekaterina Vladimirovna (b. 1991) – a postgraduate student of the AIS Department in the Siberian State Industrial University. Her research interests are currently focused on modeling and similarity of control systems. She is the author of 16 scientific papers. (Address: 42, Kirov Str., Novokuznetsk, 654007, Russian Federation. Email: e.v.burkova@gmail.com).

Статья поступила 23 октября 2015 г.

Received October 23, 2015

To Reference:

Evtushenko V.F., Makarov G.V., Burkova E.V. O kontrole nestacionarnosti svojstv ob"ekta upravlenija i ego vneshnih vozdeystvij [Detection of nonstationary characteristics of a plant and its external influences]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2015, no. 4 (29), pp. 71–83. doi: