УДК 621.51

Н.В. Кривенко[1], С.М. Кучерук[2]

[1] ГП "Севастопольский НПЦ стандартизации, метрологии и сертификации", Севастополь
[2] Киевская государственная академия водного транспорта
имени гетмана Петра Конашевича-Сагайдачного, Киев

МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ ИНВАРИАНТНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

На основе анализа одноконтурных и многоконтурных систем в статье предложен один из подходов реализации динамической надежности инвариантных систем управления. При этом в основу предлагается использовать многоконтурные системы управления, так как на сегодняшний день применяются сложные технические системы, которые динамичны в применении с многосложными связями. Это дает возможность обеспечить динамическую надежность систем управления инвариантных к внешним и внутренним воздействиям.

Ключевые слова: *анализ, система управления, динамическая надежность, инвариантная система, характеристики инвариантной системы, чувствительность.*

Введение

Актуальность темы. В применении в любом производственном процессе степень автоматизации характеризуется частичным или полным освобождением человека от непосредственного выполнения функций управления производственными процессами и передачей этих функций автоматическим устройствам [1]. При этом автоматическими называют устройства, которые управляют различными процессами и контролируют их без непосредственного вмешательства человека [1 – 3]. В настоящее время функционирование интегральных автоматических устройств занимает ведущее место среди большого множества автоматизированных систем управления. Непрерывные линейные инвариантные системы управления получили весьма широкое распространение в различном роде промышленных автоматических устройствах [1, 4]. Техническая реализация принципа инвариантности в таких системах осуществляется достаточно просто, а сами системы обладают высокими динамическими показателями. При этом для систем управления в теории инвариантности исследуются такие процессы управления, которые являются инвариантными как относительно к внешних воздействиям (координатных возмущений), так и относительно произвольно меняющихся параметров (параметрических возмущений) [3 – 5].

Анализ литературы. Проведенный аналитический обзор литературы [5 – 7] показал, что на практике наиболее распространенными являются системы с отрицательной обратной связью, к ним относятся, например, все одноконтурные системы автоматического регулирования, причем в прямой цепи расположен объект, а в обратной – регулятор (рис. 1). При синтезе в данных автоматических систем управления сводится, как упомянуто выше, к выбору настроек регуляторов таким образом, чтобы замкнутая система автоматического регулирования была устойчивой [3, 4]. При этом, очень развиты различные методы настроек параметров для одноконтурных систем управления, что позволяет их эффективно использовать. Однако в любых сложных системах необходим учет как внешних так и внутренних воздействий. Поэтому в системах такого класса используются особенности многоконтурных систем, которые позволяют добиться в них свойств лучших, чем в одноконтурных (рис. 2).

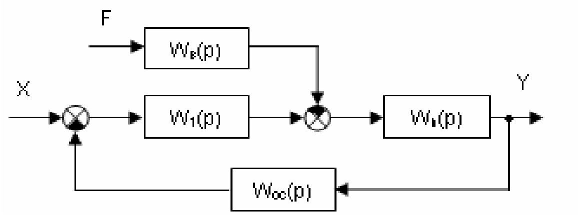

Рис. 1. Структурная схема одноконтурных систем

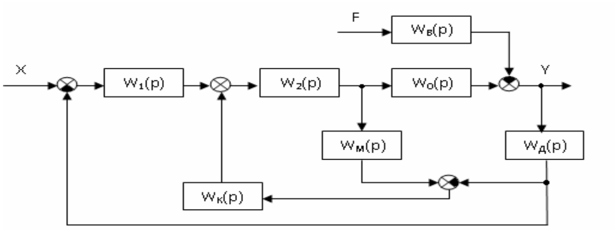

Рис. 2. Структурная схема многоконтурных систем

Для управления сложными технологическими объектами, применяют многоконтурные системы с несколькими внутренними обратными связями по промежуточным регулируемым величинам [6, 8]. Так, например, на рис.2. приведена структурная схема с двумя внутренними обратными связями по промежуточным регулируемым величинам.

Каждая обратная связь образует контур регулирования своей величины $X(p)$. Причем, второй контур охватывает первый контур, а регулятор второго контура вырабатывает задающее воздействие для первого контура. Принцип построения многоконтурной системой с таким каскадным включением регуляторов можно отнести к так называемому принципу подчиненного регулирования.

Определение настроечных параметров регуляторов системы управления, построенной по принципу подчиненного регулирования, осуществляют путем последовательной оптимизации контуров, начиная с внутреннего (первого) с объектом регулирования, имеющим передаточную функцию (см. рис. 2). После определения настроечных параметров регулятора первого контура, а следовательно и передаточной функции, переходят к определению настроечных параметров регулятора второго контура. При этом в качестве объекта регулирования рассматривают соединение собственного объекта второго контура, имеющего передаточную функцию, и звена эквивалентного замкнутому первому контуру с передаточной функцией. Таким образом, синтез систем управления подчиненного регулирования с тремя и более контурами проводится аналогично вышеописанному, т. е. путем последовательной оптимизации контуров, начиная с внутреннего.

Решение такой задачи для инвариантности в многоконтурных системах получено в классе систем с дифференциальной компенсирующей связью в работах [1-6] Душина С.Е., Лукаса В.А., Макарова И.М., Солодовникова В.В., Цыпкина Я.З. Подобные системы рассматривал и Дж. Траксел [9-11], который назвал их системами с нулевой чувствительностью к изменению параметров объекта.

Цель статьи. В связи с этим большинство реализуемых на практике систем управления представляют собой многоконтурные структуры. Поэтому многие методы расчета анализа и синтеза разработанные для одноконтурных систем не применимы или дают результаты, которые необходимо уточнять. В связи с этим возникает необходимость разработки научно-методического аппарата для сложных многоконтурных динамических систем управления инвариантных к воздействиям. Поэтому в статье на основе обзора литературы предлагается подход к динамической надежности систем управления, которые учитывают внешние воздействия в условиях априорной неопределенности.

Изложение основного материала

Учитывая вышеизложенное, рассмотрим многоконтурную систему управления и представим условие двукратной абсолютной инвариантности для таких систем, которые имеет известный вид [1]

$$W_k^0(p) = W_M^{-1}(p)\,W_2^{-1}(p). \qquad (1)$$

При этом инвариантная система описывается следующими уравнениями

$$W_p(p) = \frac{Y(p)}{F(p)} = 0\,, \qquad (2)$$

$$\phi(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{1}{\left[W_1^{-1}(p)\,W_2^{-1}(p)\,W_M^{-1}(p)+1\right]W_A(p)}\,.$$

Однако в действительности в системах реализуется инвариантность до ε что связано, во-первых, с невозможностью физической реализации оператора $W_k^0(p)$, степень числителя у которого превышает степень знаменателя, и, во-вторых, с отклонением характеристик этого оператора из-за неизбежных технологических погрешностей при изготовлении и настройке контура. Существенным является также то обстоятельство, что при неточном выполнении условие (1) вариации параметров объекта оказывает влияние на динамические свойства системы. При этом система описывается уравнениями, отличными от (2), и естественно, возникает задача оценки степени приближения ее характеристик к желаемым.

По-видимому, наибольшую общность при исследовании этой задачи позволяет получить подход, основанный на определении динамической надежности системы, изложенный в работе А.А. Ерофеева [7]. Под динамической надежностью будем понимать вероятность выполнения требуемых динамических свойств системы, в частности, попадания ее частотных характеристик в заданное поле.

Решение задачи проведем в частотной области методами теории чувствительности, предполагая, что исследуемая система является стационарной стохастической системой, грубой в области возможных вариаций параметров. Частный случай этой задачи, связанный с учетом реальных свойств компенсирующего контура, рассмотрен в [2, 3]. Можно отметить, что такая постановка задачи во многом аналогична задаче построения системы минимальной сложности. Ниже рассматривается влияние на динамические характеристики системы вариаций параметров объекта управления, с луча и, который часто встречается в практических задачах. Передаточная (функция компенсирующего контура определяется следующим образом

$$W_k(p) = W_M^0(p)\,W_\varepsilon(p)\,, \qquad (3)$$

где $W_\varepsilon(p)$ – оператор неидеальности выполнения условия абсолютной инвариантности.

Будем полагать, что . $W_k(p)$ **.** – стационарный детерминированный оператор. При этом функции чувствительности рассматриваемой системы определим так

$$S_i(p) = \frac{\partial}{\partial a_i}\varphi^{-1}(p,\bar{a})\Big|_{\Delta\bar{a}=0} = s^0(p)s_i^a(p), \qquad (4)$$

где $\varphi^{-1}(p,\bar{a})$ – обратная передаточная функция замкнутой системы с дифференциальной компенсирующей связью; $\Delta\bar{a} = 0$ – вектор вариации параметров объекта управления; $S^0(p) = \left.\dfrac{\partial\varphi^{-1}(p,\bar{a})}{\partial W_0(p,\bar{a})}\right|_{\Delta\bar{a}=0}$ – функция чувствительности по отношению к обратной передаточной функции объекта $W_0^{-1}(p,\bar{a})$;

$S_i^a(p) = \left.\dfrac{\partial W_0^{-1}(p,\bar{a})}{\partial a_i(p,\bar{a})}\right|_{\Delta\bar{a}=0}$ – функция чувствительности, зависящая от вида $W_0^{-1}(p,\bar{a})$.

Обратная передаточная функция системы (см. рис. 1) имеет вид

$$\phi^{-1}(p,\bar{a}) = W_1^{-1}(p)W_2^{-1}(p)\times$$
$$\times\Big[W_0^{-1}(p,\bar{a}) + W_M^{-1}(p)W_\varepsilon(p)W_A(p) -$$
$$-W_0^{-1}(p,\bar{a})W_\varepsilon(p)\Big] + W_\varepsilon(p)\ , \qquad (5)$$

а ее функция чувствительности

$$S^0(p) = W_1^{-1}(p)W_2^{-1}(p)\big[1 - W_\varepsilon(p)\big]\ . \qquad (6)$$

Из выражения (6) видно, что если выполняется условие абсолютной инвариантности (1), т.е.

$$W_k(p) = W_k^0(p)\ ,\quad W_\varepsilon(p) = 1\ ,$$

то

$$S^0(p) = S_i(p) = 0\ . \qquad (7)$$

Переходя в частотную область и полагая $p = j\omega$, находим функции чувствительности обратных амплитудной и фазовой частотных характеристик [4, 12]

$$S_j^A(\omega) = \left.\frac{\partial A^{-1}(\omega)}{\partial a_i}\right|_{\Delta\bar{a}} = |S_i(j\omega)|\cos\Big[\mathrm{Arg}S_i(j\omega) - \varphi_0^{-1}(\omega)\Big];$$

$$S_j^\varphi(\omega) = \left.\frac{\partial\varphi^{-1}(\omega)}{\partial a_i}\right|_{\Delta\bar{a}} =$$
$$= |S_i(j\omega)|A_0^{-1}\sin\Big[\mathrm{Arg}S_i(j\omega) - \varphi_0^{-1}(\omega)\Big]\ , \qquad (8)$$

где $A_0^{-1}(\omega), \phi_0^{-1}(\omega)$ – обратные амплитудная и фазовая частотные характеристики инвариантной системы при номинальных значениях параметров объекта.

По известным функциям чувствительности (8) можно найти вариации частотных характеристик замкнутой системы, определяемые вектором.

Отыщем вероятность попадания частотных характеристик системы в область заданного качества

$$p^A = p\Big\{A^{-1}(\omega) \in A_{\text{äîï}}^{-1}(\omega)\Big\} = \iint\limits_{A_{\text{äîï}}^{-1}} f\Big[A^{-1}(\omega)\Big]\alpha A^{-1}(\omega)\ ,$$

$$p^\varphi = p\Big\{\varphi^{-1}(\omega) \in \varphi_{\text{äîï}}^{-1}(\omega)\Big\} = \iint\limits_{\varphi_{\text{äîï}}^{-1}} f\Big[\varphi^{-1}(\omega)\Big]\alpha\varphi^{-1}(\omega)\ , \qquad (9)$$

где $A_{\text{äîï}}^{-1}(\omega)$, $\varphi_{\text{äîï}}^{-1}(\omega)$ – частичные характеристики областей допустимых значений $A^{-1}(\omega)$, $\varphi^{-1}(\omega)$;

$$p = \min_p \min_\omega\left(p^A, p^\phi\right)\Big|_{\omega\in\Omega}\ , \qquad (10)$$

Иногда требуется решать обратную задачу, т.е. по заданным допустимым отклонениям частотных характеристик замкнутой системы определить допустимые отклонения параметров объекта управления от номинальных значений

$$a_j^A(\omega) = \frac{A_{\text{äîï}}{}^{-1}(\omega)}{S_i{}^A}\ ;\quad a_j^\varphi(\omega) = \frac{\varphi_{\text{äîï}}{}^{-1}(\omega)}{S_i{}^\varphi}\ . \qquad (11)$$

С использованием соотношений (11) запретные области частотных характеристик перестраиваются на плоскость (a_i,ω), и затем определяются

$$\left.\begin{matrix} a_i^A = \min\limits_\omega a_i^A(\omega) \\ a_i^\varphi = \min\limits_\omega \overset{\text{ìèí}}{\underset{\omega}{}}\ a_i^\varphi(\omega) \end{matrix}\right|_{\omega\in[0,\omega_{\text{ãð}}]}\ , \qquad (12)$$

где $\omega_{\text{ãð}}$ – некоторая граничная частота, например полоса пропускания системы , и наконец,

$$a_i = \min\left(a_i^\varphi, a_i^A\right)\ ,$$

которая является предельно допустимой величиной вариации 1-го параметра объекта.

Для случая двух варьируемых параметров по уравнениям (12) строятся области с параметром ω в плоскости (a_1,a_2) и аналогично определяются предельные вариации параметров. При *V* варьируемых параметрах однозначное решение задачи невозможно. Необходимо назначить допуск на величину *N-2* параметров в найти допустимые вариации двух остальных параметров, причем целесообразно предварительно просчитать функции чувствительности и назначать допуск с учетом их веса.

По известным статистическим характеристикам параметров объекта можно найти вероятность их нахождения в поле допустимых вариаций и предъявить требования к параметрам, обеспечивающим требуемую вероятность.

Как следует из (5) и (6) чувствительность системы к вариациям параметров объекта зависит от оператора не идеальности $W_\varepsilon(p)$. Поэтому определенный интерес представляет оценка чувствительности самих функций чувствительности повторных фикций чувствительности) к параметрам $\bar{\beta}$ оператора нереальности $W_\varepsilon(p)$ компенсирующего контура [11, 12]

$$Z_{ij} = \left.\frac{\partial}{\partial\beta_j}S_i(p)\right|_{\bar{\beta}=0} = Z_i'(p)Z_j''(p)\ , \qquad (13)$$

$$Z_i'(p) = \left.\frac{\partial S_i(p)}{\partial W_\varepsilon(P)}\right|_{\bar{\beta}=0} = -S_i^a(p)W_1^{-1}(p)W_2^{-1}(p)\ ,$$

где $Z_i'(p)$ – чувствительность к изменению оператора неидеальности; $Z_i''(p) = \left.\dfrac{\partial W_\varepsilon(P,\bar{\beta})}{\partial\beta_j}\right|_{\bar{\beta}=0}$ – чувствительность оператора неидеальности к изменению его параметров.

Аналогично тому, как были найдены частотны частотные функции $S_j^{\phi}(\omega), S_j^{A}(\omega)$, отыскиваются и частотные функции $Z_{ji}^{\varphi}(\omega), Z_{ji}^{A}(\omega)$:

$$Z_{ij}^{A}(\omega)=\frac{\partial S_j^{A}(\omega)}{\partial \beta_j}\bigg|_{\overline{\beta}=0} = \left|Z_{ij}(j\omega)\right|\left[\mathrm{Arg}Z_{ij}(j\omega)-S_i^{\varphi}(\omega)\right],$$

$$Z_{ij}^{\varphi}(\omega)=\frac{\partial S_j^{\varphi}(\omega)}{\partial \beta_j}\bigg|_{\overline{\beta}=0} = \left|Z_{ij}(j\omega)\right|\frac{1}{S_i^{A}(\omega)}\left[\mathrm{Arg}Z_{ij}(j\omega)-S_i^{\varphi}(\omega)\right],$$

которые позволяют оценить чувствительность функций чувствительности к вариациям $\overline{\beta}$. Повторные функции чувствительности позволяют достаточно просто решить задачу назначения допусков на параметры компенсирующего контура управления при случайных вариациях параметров объекта, что позволяет разработать методику оценки для анализа динамических систем управления с вариацией характеристик.

Выводы

Подводя итог, можно сделать вывод, что в системах с обратной связью действие возмущений на объект ослабляется в той мере, каково усиление контура. При конечных значениях усиления обеспечивается инвариантность до определенного значения. Дополнительная априорная информация о возмущающих факторах привлекается на этапе проектирования систем управления и дает возможность синтеза оптимальных алгоритма управления, обеспечивающего селективную инвариантность – нулевую реакцию при ее устранении. А если удается измерить возмущения, т.е. получить дополнительную полную текущую информацию, то можно спроектировать компенсатор, в принципе, позволяющий добиться абсолютной инвариантности управляемой переменной к этому возмущению. Таким образом, предлагаемый подход к разработке метода для данного класса инвариантных систем дает возможность весьма полно исследовать динамическую надежность инвариантных систем управления и, очевидно, может быть распространен для других подобного класса систем с динамическими характеристиками.

Список литературы

1. *Душин С.Е. Теория автоматического управления / С.Е. Душин, Н.С. Зотов, Д.Х. Имаев [и др.]. – М.: Высшая школа, 2003. – 567 с.*
2. *Цыпкин Я.З. Основы теории автоматических систем / Я.З. Цыпкин. – М.: Наука, 1977. — 560 с.*
3. *Макаров И.М. Основы автоматизации управления производством / И.М. Макаров, Н.Д. Дмитриева, Д.П. Ким [и др.]. – М.: Высшая школа, 1983. – 504 с.*
4. *Солодовников В.В. Теория автоматического регулирования техническими системами / В.В. Солодовников, А.В. Яковлев. – М.: МГТУ, 1993. – 492 с.*
5. *Алексеев В.М. Оптимальное управление / В.М. Алексеев, В.М. Тихомиров, С.В. Фомин. – М.: Наука, 1979. – 430 с.*
6. *Воронов А.А. Основы теории автоматического управления. Автоматическое регулирование непрерывных линейных систем / А.А. Воронов. – М.: Энергия, 1986. – 309 с.*
7. *Ерофеев А.А. Теория автоматического управления / А.А. Ерофеев. – СПб: Политехника, 1998. – 294 с.*
8. *Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т.1. Линейные системы / Д.П. Ким. – М.: Физматлит, 2003. – 288 с.*
9. *Лукас В.А. Теория автоматического управления / В.А. Лукас. – М.: Недра, 1990. – 416 с.*
10. *Иванов В.А. Теория дискретных систем автоматического управления / В.А. Иванов, А.С. Ющенко. – М.: Наука, 1983. – 336 с.*
11. *Первозванский А.А. Курс теории автоматического управления. / А.А. Первозванский. – М.: Наука, 1986. – 616 с.*
12. *Гноенский Л.С. Математические основы теории управляемых систем / Л.С. Гноенский, Г.А. Каменский, Л.Э. Эльсгольц. – М.: Физматлит, 1969. – 512 с.*

Поступила в реколлегию 7.08.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Э.Т. Скорик, ГП «Центральный НИИ навигации и управления», Киев.

МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ДИНАМІЧНОЇ НАДІЙНОСТІ ІНВАРІАНТНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ

Н.В. Крівенко, С.М. Кучерук

На основі аналізу одноконтурних і багатоконтурних систем в статті запропонований один з підходів реалізації динамічної надійності інваріантних систем управління. При цьому в основу пропонується використовувати багатоконтурні систему управління, оскільки на сьогоднішній день застосовуються складні технічні системи, які динамічні в застосуванні з багатоскладовими зв'язками. Це дає можливість забезпечити динамічну надійність систем управління інваріантних до зовнішніх і внутрішніх дій.

Ключові слова: *аналіз, система управління, динамічна надійність, інваріантна система, характеристики інваріантної системи, чутливість.*

METHOD OF INCREASE OF DYNAMIC RELIABILITY OF INVARIANT CONTROL THE SYSTEM

N.B. Krivenko, S.M. Kucheruk

On the basis of analysis of the multicontour systems one of approaches of realization of dynamic reliability of invariant control the system is offered in the article. Thus in basis it is suggested to utillize multicontour control the system, because to date the difficult technical systems which are dynamic in application with polysyllabic connections are used. It enables to provide dynamic reliability of control the system invariant to external and internal influences.

Keywords: *analysis, control the system, dynamic reliability, invariant system, descriptions of the invariant system, sensitiveness.*