Уфа : УГАТУ, 2012 Вестник УГАТУ Т. 16, № 3 (48). С. 3–10

УДК 681.5

Б. Г. Ильясов, Г. А. Саитова, А. Ш. Назаров

АЛГОРИТМ РЕКОНФИГУРАЦИИ СТРУКТУРЫ МНОГОСВЯЗНОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ИЗ УСЛОВИЯ УСТОЙЧИВОСТИ НА ОСНОВЕ ЧАСТОТНЫХ МЕТОДОВ

Предложен алгоритм реконфигурации структуры многосвязных систем автоматического управления (МСАУ) сложным динамическим объектом (СДО), позволяющий обеспечить устойчивость многосвязной системы на всех режимах работы СДО. Приводится пример, иллюстрирующий реализацию предлагаемого алгоритма. *Структурный синтез*; *многосвязная система автоматического управления*; *многосвязный регулятор*

ВВЕДЕНИЕ

Основная трудность, возникающая в процессе проектирования МСАУ сложными динамическими объектами различной физической природы (технической, социально-экономической, биологической), заключается в обеспечении на всех режимах ее работы свойств устойчивости и желаемого качества управления как многосвязной системы в целом, так и ее сепаратных подсистем. В целях улучшения динамических свойств системы, обеспечения устойчивости МСАУ на всех режимах ее функционирования, повышения ее запасов устойчивости, стабилизации на критических режимах функционирования при возможных отказах в сепаратных подсистемах, актуальным является проектирование систем управления СДО с использованием дополнительных корректирующих и стабилизирующих связей между отдельными ее каналами, образующих многомерный регулятор. В данном случае подразумевается реконфигурация структуры многомерного регулятора МСАУ.

Задача реконфигурации МСАУ на различных режимах ее функционирования путем введения в нее дополнительных связей между сепаратными подсистемами из условия устойчивости МСАУ представляет собой большой практический интерес. Вызвано это, в первую очередь, тем, что практически в любых сложных нестационарных системах необходимо парировать возможные отказы сепаратных каналов и связей между ними, приводящие к дестабилизации всей МСАУ, которые в принципе не могут быть компенсированы параметрическими изменениями управляющей части локальных регуляторов. Для компенсации подобных изменений требуются, как правило, структурные преобразования МСАУ, в том числе путем изменения связей между подсистемами через многомерный регулятор.

Задачу синтеза связей в МСАУ из условия ее устойчивой работы на том или ином режиме предлагается решать при помощи частотного критерия устойчивости, описанного в [1, 2]. Данный критерий устойчивости основан на системном описании МСАУ на уровне сепаратных подсистем и многомерных элементов связи между ними [3].

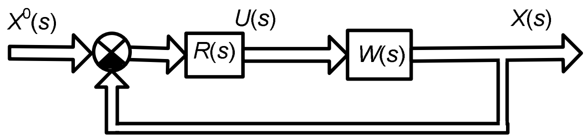

Рис. 1. Обобщенная структурная схема МСАУ СДО

В качестве индивидуальных характеристик (ИХ) $\Phi_{0i}(s)$ сепаратной подсистемы МСАУ, представленной на рис. 1, рассматривается ее индивидуальная передаточная функция в режиме управления, когда подсистема функционирует в изолированном от других подсистем состоянии:

$$\Phi_{0i}(s) = \frac{X_i(s)}{X_i^o(s)} = \frac{R_i(s)W_{ii}(s)}{1+R_i(s)W_{ii}(s)},$$

где $i = 2,\ldots,n$ – размерность МСАУ, $W_{ii}(s)$ – передаточные функции разомкнутых сепаратных подсистем многосвязного объекта управления, а $R_i(s)$ – передаточные функции регуляторов локальных подсистем. В качестве характеристик связей (ХС) сепаратных подсистем рассматриваются функции вида:

Контактная информация: 8(347) 273-78-35

$$h_{2...k}(s) = \frac{\det\left\|W_{ij}(s)\cdot\gamma_{ij}\right\|_{k\times k}}{\det\left\|W_{ij}(s)\cdot\delta_{ij}\right\|_{k\times k}},$$

где $\gamma_{ij} = \begin{cases}1, & i \neq j\\ 0, & i = j\end{cases}$; $\delta_{ij} = \begin{cases}1, & i = j\\ 0, & i \neq j\end{cases}$, $k = 2,3,...,n$.

Данные характеристики отражают реально существующие взаимоотношения между подсистемами и строятся из динамических звеньев, выражающих эти соотношения. В общем случае связь между парами, тройками, четверками и последующей размерностью подсистем может быть охарактеризована с помощью определителей матриц вида: $L_k(s) = \| W_{ij}(s)\gamma_{ij} \|_{k\times k}$. В процессе анализа и синтеза МСАУ часто бывает важно выявить не столько абсолютное действие самих перекрестных связей, сколько их действие относительно прямых связей в объекте, которые характеризуются определителями матриц вида: $M_k(s) = \| W_{ij}(s)\delta_{ij} \|_{k\times k}$. Эту относительную связь и рассматривают в качестве характеристик связи [1–4].

Суть самого критерия устойчивости МСАУ заключается в нахождении корней μ_i (i = 1, 2,..., n, где n – размерность МСАУ) характеристического уравнения связи МСАУ, составленного из коэффициентов h_i, и в установлении факта неохвата их годографом АФХ $\Phi(j\omega)$ сепаратных подсистем при $\omega \in (0, +\infty)$ [2]. При этом характеристическое уравнение n-мерной САУ с однотипными ИХ $\Phi_1(s) = \Phi_2(s) = \ldots = \Phi_n(s) = \Phi(s)$ имеет вид:

$$D(\Phi(s),h(s)) = 1 + h_2(s)\Phi_2(s) + h_3(s)\Phi_3(s) + \ldots + h_n(s)\Phi_n(s) = 0. \quad (1)$$

АЛГОРИТМ СИНТЕЗА КОРРЕКТИРУЮЩИХ СВЯЗЕЙ МСАУ

Рассмотрим режим работы МСАУ, на котором происходит такое отклонение ее динамических характеристик от желаемых, при котором система становится неустойчивой, находится на границе устойчивости либо не удовлетворяет заданным требования к качеству управления.

Задачу структурного синтеза связей в многомерном регуляторе МСАУ, структурная схема которой представлена на рис. 2, из условий обеспечения желаемых динамических характеристик предлагается решить следующим образом.

Рассмотрим n-мерную МСАУ, в которой передаточная функция объекта управления и регулятора описываются в форме матричных ПФ (МПФ) размерности $n \times n$:

$$W(s) = \left\|W_{ij}(s)\right\|_{n\times n},\ R(s) = \left\|R_{ij}(s)\right\|_{n\times n}.$$

Пусть заданными являются:

- структура неизменяемой части системы: объекта управления, регуляторов сепаратных подсистем, определяемых как диагональные элементы МПФ $R(s)$:

$$\text{diag}\{R(s)\} = \{R_{11}(s), R_{22}(s),..., R_{nn}(s)\},$$

удовлетворяющая условию полной управляемости;

- структуры корректирующих звеньев;
- ограничения на способы соединения указанных структур друг с другом.

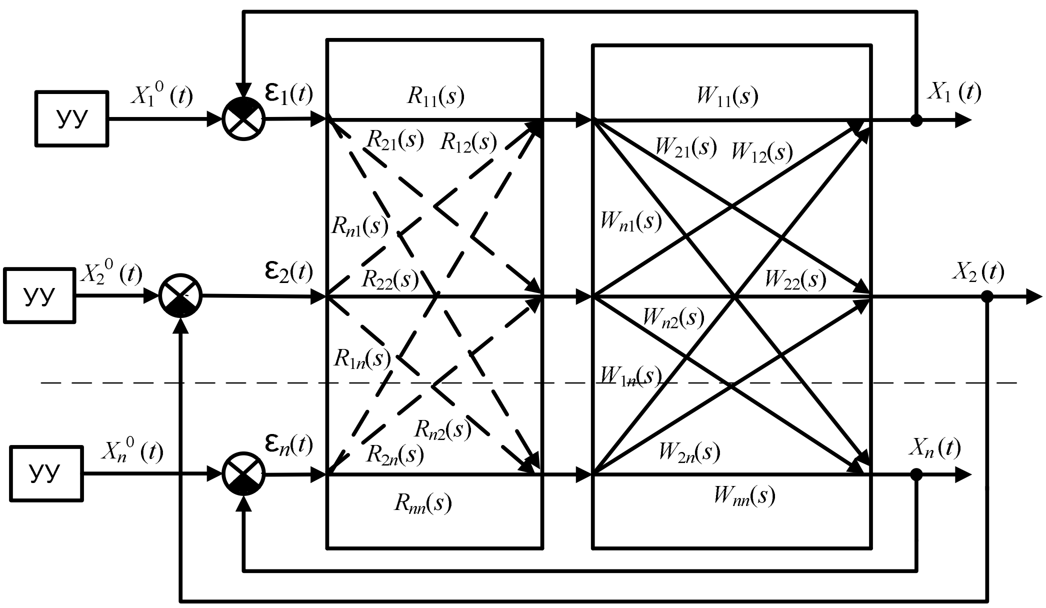

Рис. 2. Структурная схема n-мерной САУ с n-мерным регулятором

При этом предполагается, что заданная часть системы и корректирующие звенья описываются системой линейных дифференциальных уравнений и могут быть представлены соответствующими ПФ. В общем случае задача заключается в том, чтобы найти такой алгоритм формирования или изменения связей $R_{ij}(s)$ (при $i \neq j$) в многомерном регуляторе $R(s)$, т. е. алгоритм реконфигурации МСАУ, с тем, чтобы удовлетворить заданным требованиям к обеспечению желаемых динамических свойств системы, а также к запасам ее устойчивости.

Будем полагать, что исследуемая система относится к классу МСАУ с однотипными характеристиками подсистем, а требуемые динамические свойства системы обеспечиваются заданной картиной распределения на комплексной плоскости корней μ_i характеристического уравнения связи (1) системы.

Известно, что при решении задачи синтеза такого рода, в первую очередь, выделяют ряд принципиальных требований, которым должна удовлетворять допустимая структура управляющей части. В соответствии с [1, 4] синтезированная структура управляющей части системы считается допустимой, а алгоритм ее синтеза корректным, если обеспечивается выполнение следующих условий синтеза:

- математическая корректность задачи синтеза;
- структурная устойчивость системы;
- астатизм заданного порядка;
- физическая реализуемость управляющей части.

Поэтому дальнейший синтез требуемой многосвязной структуры регулятора $R(s)$ будем вести с учетом перечисленных требований.

Исходя из вышесказанного, формализуем алгоритм синтеза корректирующих связей МСАУ и докажем его корректность.

На первом этапе запишем характеристическое уравнение МСАУ, в которой кроме естественных связей через многомерный объект управления имеются искусственные связи через многомерный регулятор, согласно выражению (1) оно будет иметь следующий вид:

$$\mathrm{D}(h_{И},\Phi) = 1 + \sum_{i,j=1}^{\binom{n}{2}} h_{И\,ij}\Phi^2 + \sum_{i,j,k=1}^{\binom{n}{3}} h_{И\,ijk}\Phi^3 + \ldots + h_{И\,\overline{2n}}\Phi^n = 0 \qquad (2)$$

где

$$h_{И\,2,3\ldots k} = \frac{\det\left\|W_{И}(s)\cdot\gamma_{ij}\right\|_{k\times k}}{\det\left\|W_{И}(s)_{ij}\cdot\delta_{ij}\right\|_{k\times k}} \qquad (3)$$

интегральная характеристика связи между подсистемами, учитывающая влияние как естественных связей через СДО, так и искусственных связей через многомерный регулятор; $W_{И}(s) = W(s)R(s)$.

Согласно [3], достаточное условие устойчивости однотипной МСАУ можно сформулировать следующим образом: устойчивость МСАУ считается обеспеченной, если все корни уравнения относительно комплексной переменной λ:

$$\mathrm{D}(a,\lambda) = a_0 + a_1\lambda + a_2\lambda^2 + \ldots + a_n\lambda^n = 0\,, \qquad (4)$$

получаемого из уравнения (2) подстановкой: $\Phi = \dfrac{r(1-\lambda)}{(1+\lambda)} + d$, где r, $d \in Q$ – параметры окружности, полностью заключающей в себе годограф $\Phi(j\omega)$, расположены в левой полуплоскости $\mathrm{Re}\,\lambda < 0$.

В соответствии с изложенным можно записать условие синтеза дополнительных стабилизирующих связей $R_{ij}(s)$ между локальными подсистемами на основе имеющейся зависимости коэффициентов a_i характеристической функции $D(a, \lambda)$ от синтезируемых связей $R_{ij}(s)$:

$$a_i = f(R_{ij}(\mathrm{s}))\,.$$

Для этого, используя критерий устойчивости Гурвица, получим следующие условия для синтеза связей $R_{ij}(s)$ в виде системы нелинейных неравенств:

$$a_{0,1}(R_{ij}) > 0\,;\ \begin{vmatrix} a_1(R_{ij}) & a_3(R_{ij}) \\ a_0(R_{ij}) & a_2(R_{ij}) \end{vmatrix} > 0\,;$$

$$\begin{vmatrix} a_1(R_{ij}) & a_3(R_{ij}) & a_5(R_{ij}) & \ldots \\ a_0(R_{ij}) & a_2(R_{ij}) & a_4(R_{ij}) & \ldots \\ 0 & a_1(R_{ij}) & a_3(R_{ij}) & \ldots \\ 0 & \ldots & \ldots & \ldots \end{vmatrix} > 0\,. \qquad (5)$$

Таким образом, на основе полученных неравенств (5) определяются области возможной вариации вводимых связей $R_{ij}(s)$, при которых система остается гарантированно устойчивой сколь угодно долгое время.

В результате решения системы неравенств (5) на этапе параметрического синтеза из условия физической реализуемости и условия удовлетворения требованиям к качеству управления по каждой координате определяются искомые ПФ перекрестных связей $R_{ij}(s)$ регулятора МСАУ. Отметим, что физически реализуемыми ПФ являются не минимально фазовые ПФ, у которых степень полинома знаменателя выше либо равна степени полинома числителя.

Для обеспечения математической корректности процедуры синтеза и структурной устойчивости системы в целом введем ограничения на способы соединения сепаратных подсистем в многомерном регуляторе $R(s)$ друг с другом, а также на вид их ПФ. Известно, что одним из критериев структурного синтеза является разрешимость неравенств (5) в базисе выбранной структуры [4]. Необходимым и достаточным условием разрешимости системы нелинейных неравенств (5) является условие:

$$\operatorname{rank} J(s) = \operatorname{rank}\left\| \frac{\partial a_{0,1,2\ldots k,m}}{\partial R_{ij,l}}(s) \right\| = n-1,$$

где $J(s)$ – матрица Якоби системы функций $a_{1,2,3\ldots k}$, входящих в состав системы неравенств (5) $m \in \overline{1,n-1}$, $l \in \overline{1,q}$. Это означает, что количество q, синтезируемых перекрестных связей не должно превышать значения $(n-1)$, т. е. $q < n$.

Необходимо отметить, что данное условие вполне выполнимо, если в процессе анализа МСАУ на исследуемом режиме выяснить, какие связи (между парами h_{ij}, тройками h_{ij} и т. д. подсистем) оказывают отрицательное влияние на запасы устойчивости и качество системы в целом и дальнейший синтез структуры корректирующего устройства между подсистемами вести только для данных подсистем. Скажем, что подобный анализ весьма нетрудно провести, используя предложенную в [4] методику анализа МСАУ. Это же замечание справедливо с точки зрения еще одного условия корректности задачи синтеза, которое также предполагает, что синтезируемая структура должна соответствовать критерию минимальной сложности управляющей части системы [4].

Одним из основных критериев структурной устойчивости МСАУ согласно [4] является отсутствие в системе стимулирующих контуров с положительной обратной связью, поэтому еще одним условием введения в систему корректирующих связей является положительный знак интегральной ПФ: $\operatorname{sign}(R_{ij}(0)\ W_{ij}(0)) > 0$.

Также стоит отметить, что при способе управления системой путем введения в нее дополнительных корректирующих связей не нарушается заданный порядок астатизма подсистем, который в данном случае обеспечивается структурой регуляторов сепаратных подсистем, которая не изменяется в процессе синтеза связей.

Пример. Рассмотрим систему управления трехсвязным динамическим нестационарным объектом. Модель МСАУ исследуемого объекта представлена на рис. 2, при $n = 3$.

Рассмотрим два основных режима работы исследуемой МСАУ.

Базовый режим работы объекта управления – режим 1. Пусть матричная передаточная функция многомерного объекта на данном режиме равна:

$$W(s) = \frac{1}{0{,}6s+1}\begin{bmatrix} 0{,}5 & 0{,}6 & -0{,}15 \\ 0{,}25 & 0{,}6 & -0{,}1 \\ 0{,}8 & -0{,}6 & 0{,}15 \end{bmatrix}.$$

Пусть желаемые индивидуальные характеристики $\Phi_i(s)$ подсистем описываются дробно-рациональной функцией:

$$\Phi_i(s) = 1/\left(\tau^2 s^2 + 2\xi\tau s + 1\right),$$

где $\tau = 0{,}5$ с, $\xi = 0{,}8$. Тогда синтезированные регуляторы сепаратных подсистем, обеспечивающие желаемые АФХ, имеют следующий вид:

$$R_{ii}(s) = \frac{K_{ii}(T_0 s + 1)}{s},$$

где $K_{11} = 2$; $K_{22} = 1{,}7$; $K_{33} = 7{,}7$; $T_0 = 0{,}6$.

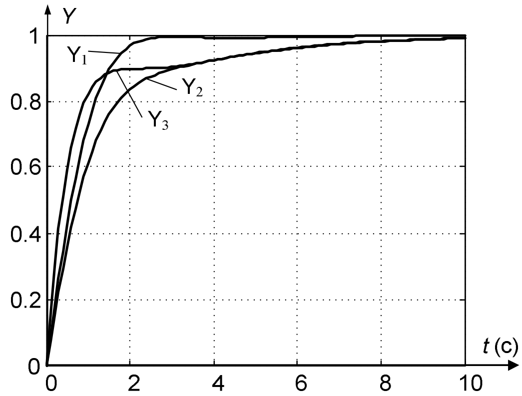

Рис. 3. Результаты моделирования переходных процессов по каждой из регулируемых координат исследуемой МСАУ на расчетном режиме 1

На рис. 3 приведен результат моделирования переходных процессов исследуемой МСАУ по каждой из регулируемых координат.

Произведем в выражении для $\Phi_i(s)$ замену $s = j\omega$, построим годограф $\Phi(j\omega)$ сепаратных подсистем МСАУ.

Затем запишем характеристическое уравнение (1) исследуемой МСАУ:

$$1 + h_2\Phi^2(s) + h_3\Phi^3(s) = 0,$$

где

$$h_2 = \sum_{i,j=1}^{\binom{n}{2}} \frac{\det\left\|W_{ij}(s)\gamma_{ij}\right\|_{2x2}}{\det\left\|W_{ij}(s)\delta_{ij}\right\|_{2x2}} = 0{,}433;$$

$$h_3 = \frac{\det\left\|W_{ij}(s)\gamma_{ij}\right\|_{3x3}}{\det\left\|W_{ij}(s)\delta_{ij}\right\|_{3x3}} = -0{,}567$$

– интегральные характеристики связи сепаратных подсистем, $\Phi(s)$ – передаточная функция сепаратных подсистем. Произведем в данном уравнении замену $x = \Phi(s)$, определим корни μ_i, решив его относительно переменной x.

На рис. 3 приведено взаимное расположение годографа сепаратных подсистем МСАУ $\Phi(j\omega)$ и корней μ_i характеристического уравнения связи системы. В соответствии с рис. 3 можно сделать вывод, что на расчетном режиме – 1 исследуемая МСАУ устойчива, так как годограф $\Phi(j\omega)$ не охватывает ни один из корней характеристического уравнения системы [2].

Рассмотрим нерасчетный (для данного режима регуляторы локальных подсистем не синтезировались) режим работы объекта управления.

Запишем передаточную функцию многомерного объекта для данного режима – 2:

$$W(s) = \frac{1}{0{,}6s+1}\begin{bmatrix} 0{,}5 & 0{,}6 & -0{,}15 \\ 3{,}25 & 0{,}6 & -0{,}1 \\ 0{,}8 & -0{,}6 & 0{,}15 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

На первом этапе решения задачи проведем анализ устойчивости МСАУ аналогично проведенному выше анализу для базового режима работы 1.

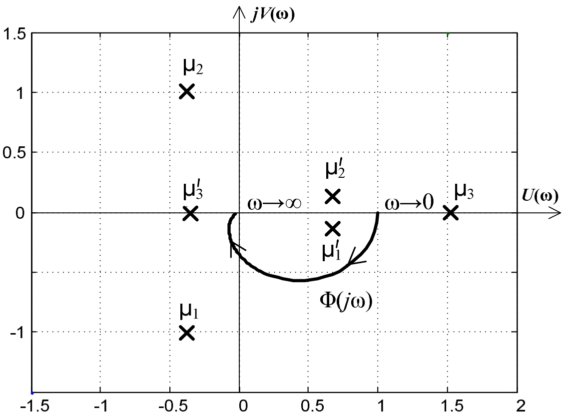

Рис. 4. Взаимное расположение годографа сепаратных подсистем МСАУ $\Phi(j\omega)$ и корней μ_i на режиме 1, μ_i' на режиме 2

Анализ взаимного расположения годографа сепаратных подсистем МСАУ $\Phi(j\omega)$ и корней μ_i' характеристического уравнения связи системы для режима работы 2, представленного на рис. 4, позволяет сделать вывод, что исследуемая система неустойчива, так как годограф $\Phi(j\omega)$ охватывает корни характеристического уравнения связи системы.

Анализ влияния связей между подсистемами на устойчивость МСАУ показал, что отрицательное влияние на запасы устойчивости системы в целом оказывает характеристика связи h_{12}, поэтому дальнейший синтез стабилизирующих ХС между подсистемами будем вести только для 1, 2 подсистем. С учетом вышесказанного, синтезируем искусственную стабилизирующую связь $R_{12}(s)$ между соответствующими локальными подсистемами исследуемой МСАУ.

Расчет характеристик системы заметно упрощается, если организовывать стабилизирующий многомерный регулятор не между локальными регуляторами подсистем, а перед ними, при этом коэффициенты усиления прямых регуляторов $R_{ii}(s)$ многомерного регулятора $R(s)$ выбираются равными единице $KR_{ii} = 1$. Соответствующая структура МСАУ, представленная на рис. 5, несколько отличается от ранее рассмотренной структуры, представленной на рис. 4.

В данной структуре локальные регуляторы сепаратных подсистем $\mathrm{diag}\{R(s)\} = \{R_{11}(s), R_{22}(s),\ldots, R_{nn}(s)\}$ (синтезированные для базового режима работы и обеспечивающие желаемый вид индивидуальных характеристик подсистем) вынесены за пределы многомерного регулятора.

Сделано это для упрощения процедуры синтеза корректирующих связей, поскольку в данном случае параметры локальных регуляторов $\{R_{11}(s), R_{22}(s),\ldots, R_{nn}(s)\}$, не будут оказывать влияния на значения интегральных характеристик связи, образуемых МОУ и многомерным регулятором.

С учетом вышеизложенного выражение для характеристики связи $h_{И3}$ между подсистемами исследуемой МСАУ запишется следующим образом:

$$h_{И3} = \frac{\det\left\|W_И(s)_{ij}\gamma_{ij}\right\|_{3\times3}}{\det\left\|W_И(s)_{ij}\delta_{ij}\right\|_{3\times3}} =$$

$$= \frac{\det\begin{Vmatrix} 0 & W_{11}R_{12}(\mathrm{s})+W_{12}(\mathrm{s}) & W_{13}(\mathrm{s}) \\ W_{21}(\mathrm{s}) & 0 & W_{23}(\mathrm{s}) \\ W_{31}(\mathrm{s}) & W_{31}(\mathrm{s})R_{12}(\mathrm{s})+W_{32}(\mathrm{s}) & 0 \end{Vmatrix}_{3\times3}}{\det\begin{Vmatrix} W_{11}(\mathrm{s}) & 0 & 0 \\ 0 & W_{21}(\mathrm{s})R_{12}(\mathrm{s})+W_{22}(\mathrm{s}) & 0 \\ 0 & 0 & W_{33}(\mathrm{s}) \end{Vmatrix}_{3\times3}}. \quad (7)$$

При этом МПФ многомерного регулятора $R(s)$ имеет следующий вид:

$$R(s) = \begin{bmatrix} 1 & R_{12}(s) & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

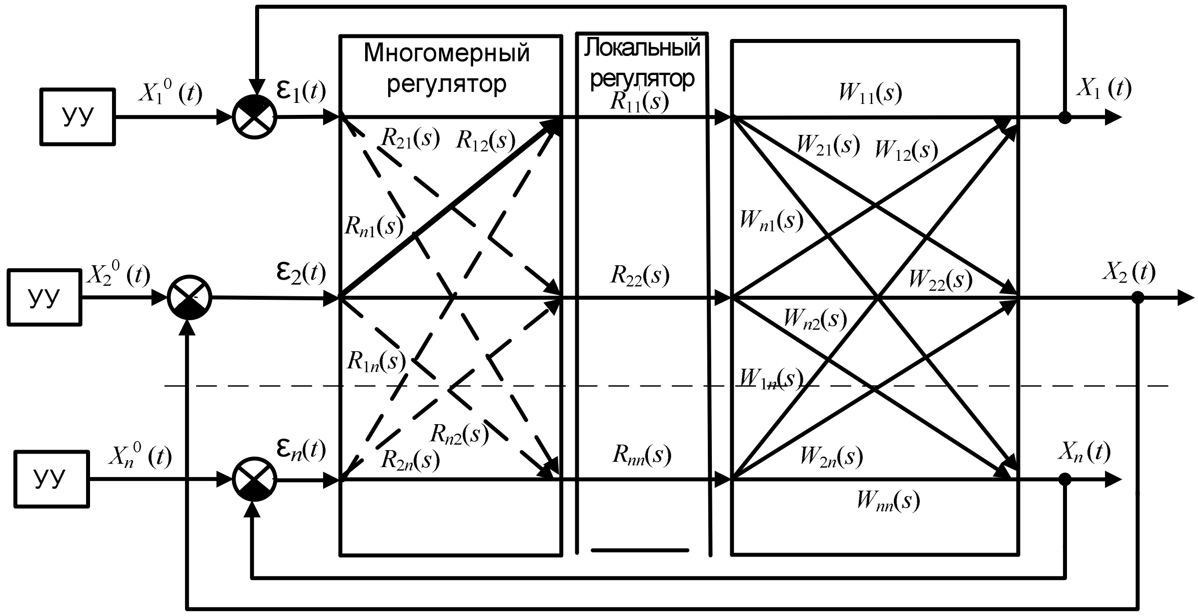

Рис. 5. Преобразованная структурная схема n-мерной САУ с n-мерным регулятором

Покажем, как для МСАУ на режиме работы 2 определить допустимую область изменения коэффициента усиления корректирующей связи $R_{12}(s)$ из условия обеспечения устойчивости МСАУ на данном режиме.

Запишем для исследуемой МСАУ уравнение (4):

$$D(a,\lambda) = a_0(R_{12}) + a_1(R_{12})\lambda + a_2(R_{12})\lambda^2 + $$
$$+ a_3(R_{12})\lambda^3 = 0.$$

В качестве подстановки используем выражение: $\Phi = \frac{0{,}8(1-\lambda)}{(1+\lambda)} + 0{,}2$, то есть для годографа $\Phi(j\omega)$ исследуемой МСАУ выбраны следующие параметры, описывающей его окружности: r = = 0,8, d = 0,2 рис. 6. Таким образом, целью введения в систему корректирующей связи $R_{12}(s)$ является обеспечение расположения корней μ_i за пределами выбранной окружности.

Учитывая полученное ранее выражение (7) для расчета $h_{\text{И } 2,3\ldots k}$, запишем коэффициенты a_i для данного уравнения при введении в систему компенсирующей связи $R_{12}(s)$:

$$a_0 = 0{,}27R^2_{12} + 25{,}4R_{12} + 4{,}81;$$
$$a_1 = 991R^2_{12} + 12{,}2R_{12} - 31{,}8;$$
$$a_2 = 74{,}9R^2_{12} + 425R_{12} + 76{,}1;$$
$$a_3 = 273R^2_{12} - 15{,}8R_{12} - 12{,}2.$$

Применим к полученному уравнению критерий устойчивости Гурвица, найдем область варьирования коэффициента R_{12}.

Запишем условие (5) для исследуемой системы и определим условия его выполнения относительно параметра R_{12}:

1. $a_0(R_{12}) > 0 \Leftrightarrow$
$\Leftrightarrow R_{12} \in (-\infty;\text{-}93{,}8843) \cup (\text{-}0{,}1898;+\infty)$

2. $a_1(R_{12}) > 0 \Leftrightarrow$
$\Leftrightarrow R_{12} \in (-\infty;\text{-}0{,}1854) \cup (0{,}1731;+\infty);$

3. $\begin{vmatrix} a_1(R_{12}) & a_3(R_{12}) \\ a_0(R_{12}) & a_2(R_{12}) \end{vmatrix} > 0 \Leftrightarrow$
$\Leftrightarrow a_1(R_{12})a_2(R_{12}) - a_0(R_{12})a_3(R_{12}) > 0 \Leftrightarrow$
$\Leftrightarrow R_{12} \in (-\infty;\text{-}5{,}4) \cup (0{,}1719;+\infty);$

4. $\begin{vmatrix} a_1(R_{12}) & a_3(R_{ij}) & 0 \\ a_0(R_{12}) & a_2(R_{12}) & 0 \\ 0 & a_1(R_{12}) & a_3(R_{12}) \end{vmatrix} > 0 \Leftrightarrow$
$\Leftrightarrow \begin{cases} a_3(R_{12}) > 0 \\ a_1(R_{12})a_2(R_{12}) - a_0(R_{12})a_3(R_{12}) > 0 \end{cases} \Leftrightarrow$
$\Leftrightarrow \begin{cases} R_{12} \in (-\infty;\text{-}0{,}1844) \cup (0{,}2423;+\infty) \\ R_{12} \in (-\infty;\text{-}5{,}4) \cup (0{,}1719;+\infty) \end{cases}$

Общее условие, полученное объединением условий 1–4, равно:

$$R_{12} \in (-\infty;-93{,}9) \cup (0{,}25+\infty).$$

Учитывая ограничение на положительность знака вводимой связи: $\mathrm{sign}(R_{12}(0)\ W_{21}(0)) > 0$, общий допустимый диапазон изменения коэффициента усиления стабилизирующей связи R_{12}, при которой система остается устойчивой, равен: $R_{12} \in (0{,}25\ +\infty)$.

Результаты моделирования переходных процессов МСАУ при введении в нее связей $R_{12} = 0{,}5;\ 0{,}75;\ 1$ приведены на рис. 7. Оценим эффективность введения R_{12} с точки зрения качества МСАУ.

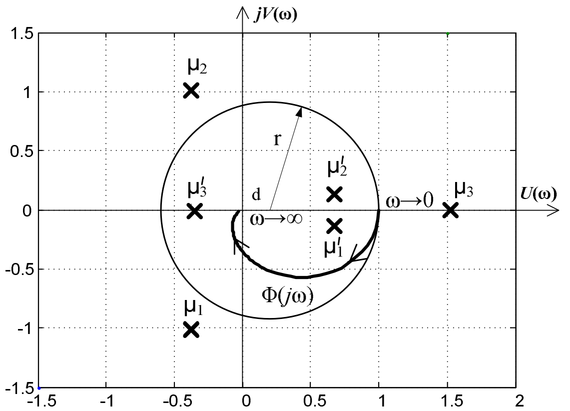

Рис. 6. Взаимное расположение годографа сепаратных подсистем МСАУ $\Phi(j\omega)$ и корней μ_i на режим1, μ'_i на режиме 2 и выбранная окружность, полностью заключающая в себе годограф $\Phi(j\omega)$

Результаты моделирования взаимного расположения годографа сепаратных подсистем МСАУ $\Phi(j\omega)$ и корней μ_i на данном режиме показали, что при введении в систему связи $R_{12} \in$ $\in (0{,}25)$ МСАУ становится устойчивой.

Согласно рис. 7 наиболее предпочтительным, с точки зрения качества управления (быстродействия), является введение связи $R_{12} =$ $= 0{,}75$. На рис. 8 представлены системные частотные характеристики МСАУ с введенной в нее связью $R_{12} = 0{,}75$, из которого видно, что требуемый характер многомерной связи качественно соответствует желаемой картине расположения корней характеристического уравнения системы на комплексной плоскости.

Дальнейшее повышение качества управления может быть также достигнуто за счет введения дополнительных корректирующих связей, синтезированных предложенным методом, однако, это может серьезно усложнить процедуру синтеза.

Поэтому дальнейшие манипуляции с многомерным регулятором целесообразно производить путем изменения коэффициентов и структуры регуляторов локальных подсистем.

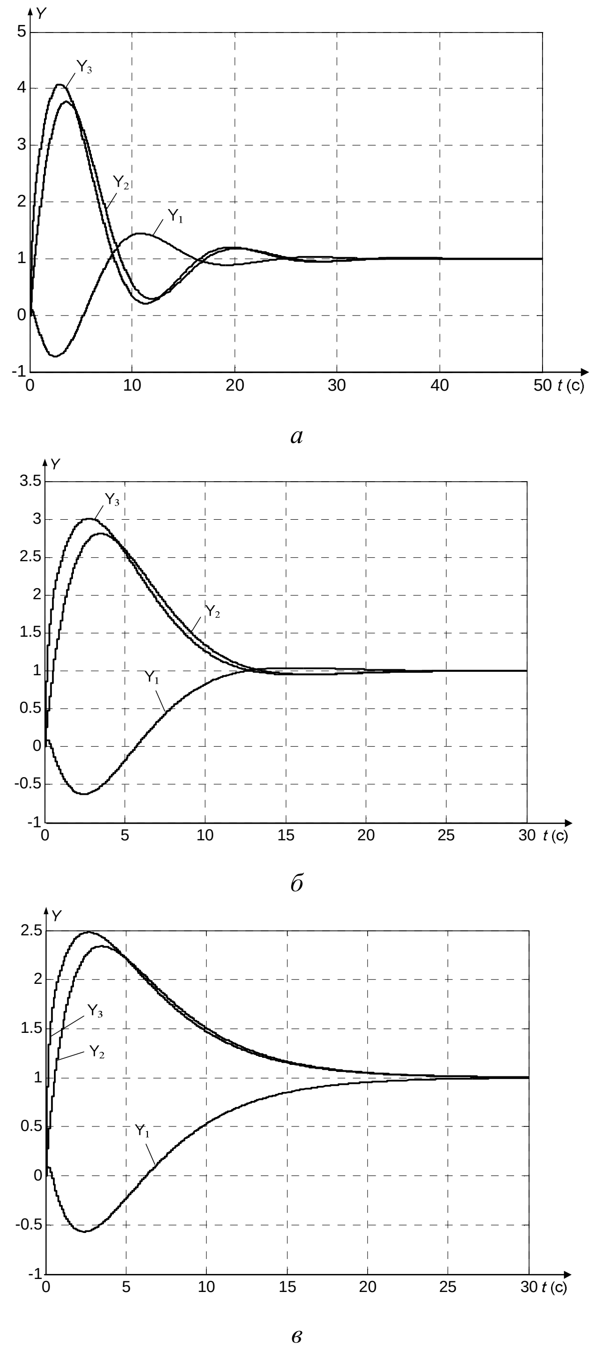

Рис. 7. Результаты моделирования переходных процессов по регулируемым координатам исследуемой МСАУ на режиме 2 после введении в нее стабилизирующей связи: *а* – $R_{12} = 0{,}5$; *б* – $R_{12} = 0{,}75$; *в* – $R_{12} = 1$

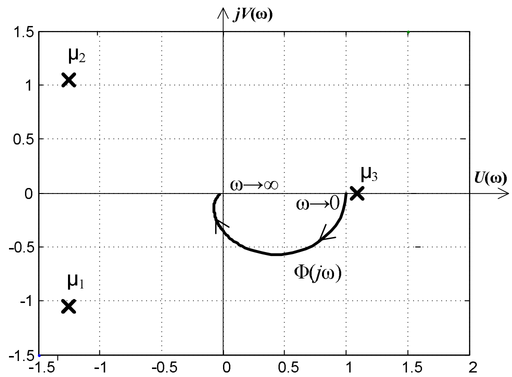

Рис. 8. Взаимное расположение годографа сепаратных подсистем МСАУ $\Phi(j\omega)$ и корней μ_i на режиме 2 после введения в нее стабилизирующей связи $R_{12} = 0{,}75$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный алгоритм реконфигурации структуры МСАУ позволяет сформировать такие связи между подсистемами, которые обеспечивают требуемые запасы устойчивости на всех режимах функционирования МСАУ.

Данный алгоритм, во-первых, имеет относительно небольшую вычислительную сложность при большом числе варьируемых параметров объекта управления, во-вторых, позволяет обеспечить работоспособность системы для относительно большого диапазона изменения параметров ПФ связей СДО. В-третьих, применение предложенного алгоритма синтеза многомерного регулятора МСАУ позволит осуществлять параметрическую коррекцию алгоритмов управления на интервале, определенном в результате решения задачи синтеза связей, с целью обеспечения требуемого качества управления по каждой из регулируемых координат. Кроме того, алгоритм в полной мере учитывает структурные особенности проектируемой МСАУ, благодаря чему данный алгоритм в первую очередь предполагает свое дальнейшее использование для проектирования сложных многофункциональных (с изменяемой компоновкой) систем управления многорежимными объектами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ильясов Б. Г., Кабальнов Ю. С.** Исследование устойчивости однотипных многосвязных систем автоматического управления с голономными связями между подсистемами // Автоматика и телемеханика. 1993. № 8. С. 81–90.

2. **Ильясов Б. Г., Кабальнов Ю. С., Колушов В. В.** К построению областей устойчивости МСАУ в плоскости АФХ ее сепаратных подсистем // Техническая кибернетика. 1990. № 1. С. 18–25.

3. Частотный метод анализа и синтеза многомерных систем автоматического регулирования / Б. Н. Петров [и др.] // Докл. АН СССР. 1979. Т. 247, № 2. С. 304–307.

4. Оптимизация многомерных систем управления газотурбинных двигателей летательных аппаратов / А. А. Шевяков [и др.]; Под общей ред. А. А. Шевякова, Т. С. Мартьяновой М.: Машиностроение, 1989. 256 с.

ОБ АВТОРАХ

Ильясов Барый Галеевич, чл.-корр. АН РБ, проф., зав. каф. техническ. кибернетики. Дипл. инженер-электромеханик по авиац. электрооборудованию летательн. аппаратов (МАИ, 1962). Д-р техн. наук по системн. анализу и авт. упр. (ЦИАМ, 1984). Иссл. в обл. сист. анализа, упр-я в техн. и соц.-экон. системах.

Саитова Гузель Асхатовна, доц. той же каф. Дипл. инженер по автоматизации процессов обработки и выдачи информации (УАИ, 1986). Канд. техн. наук по системн. анализу, управлению и обработки информации (УГАТУ, 2003). Иссл. в обл. многосв. систем управления.

Назаров Анвар Шамильевич, инженер-констр. УНПП «Молния». Дипл. магистр техники и технологий по приборостроению (УГАТУ, 2007). Канд. техн. наук по системн. анализу, управлению и обработки информации (УГАТУ, 2011). Иссл. в обл. упр-я в техн. и соц.-экон. системах.