



УДК 681.51

© 2022 г. С.А. Смирнова

(Амурский государственный университет, Благовещенск)

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕГУЛЯТОРА САМООРГАНИЗУЮЩЕЙСЯ СИСТЕМЫ КОМБИНИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ МНОГОРЕЖИМНЫМ СТРУКТУРНО НЕОПРЕДЕЛЕННЫМ ОБЪЕКТОМ С ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯМИ

Для синтезированной в рамках критерия гиперустойчивости и условий L -диссипативности самоорганизующейся системы децентрализованного комбинированного управления трехсвязным объектом, функционирующим в условиях структурно-параметрической неопределенности и переключений, осуществляется параметрическая оптимизация предложенного закона управления с использованием генетического алгоритма и компьютерного моделирования исследуемой системы управления в среде Matlab-Simulink. Результаты параметрической оптимизации, полученные на основе критерия обобщенной работы, сравниваются с результатами работы системы управления, в которой значения параметров закона управления были заданы из эвристических соображений.

Ключевые слова: трехсвязный (трехканальный) объект управления, децентрализованный комбинированный регулятор, генетический алгоритм оптимизации, критерий обобщенной работы.

DOI: 10.22250/18142400_2022_74_4_131

Введение

Современные технические объекты, в силу наличия многосвязности, многорежимности, нестационарности, структурно-параметрической неопределенности и т.п., требуют разработки сложных систем управления, – например, синтезируемых в рамках применения того или иного критерия устойчивости и, в частности, с помощью критерия гиперустойчивости и условий L -диссипативности [1 – 5]. Зачастую, когда построение закона управления (*структурный синтез*) системы управления успешно завершено, вопрос о выборе структуры с наилучшими значениями ее параметров (*параметрический синтез*) остается открытым. Действительно, если основная

цель проектирования работоспособной систем управления – это формирование структуры управляющего устройства, то процедуре параметрического синтеза обычно уделяется меньше внимания, поскольку выбор тех или иных значений можно выполнить путем эвристического подбора, что, конечно, не гарантирует достижения наилучшего результата.

Очевидно, что для максимально эффективной работы системы управления необходимо применять регуляторы с оптимальными параметрами. Среди подходов к решению задачи параметрической оптимизации можно выделить две большие группы [6], первая группа направлена на нахождение локального экстремума, а вторая позволяет определять глобальный экстремум. В первой группе можно выделить такие известные подходы как метод спирального координатного спуска, метод Розенброка, метод поиска по симплексу, метод Хука – Дживса с поиском по образцу, которые сталкиваются с проблемой преждевременной сходимости в случае рассмотрения мультимодальных и многомерных задач. Среди детерминированных методов нахождения глобального экстремума можно выделить методы классического математического анализа, – например, метод множителей Лагранжа, градиентные методы поиска: алгоритма Гомори или метод отсекающих плоскостей, интервальный метод ветвей и границ, но большинство детерминированных алгоритмов теряет эффективность своей работы с возрастанием размерности задачи.

Для поиска экстремума в случаях, когда вид оптимизируемой функции известен не полностью либо ее структура слишком сложна, применяются стохастические методы, в основу которых заложена итерационная процедура приближения к точке предполагаемого оптимума. В рамках этой концепции конструируются оптимальные алгоритмы, моделирующие физические, биологические процессы: алгоритм имитации отжига, метод роя частиц, а также генетические алгоритмы (ГА). Эти алгоритмы, основанные на теории Чарльза Дарвина [7, 8], опираются на современные представления о механизмах эволюции и генетики, в соответствии с которыми в ходе естественного отбора выживают наиболее приспособленные особи. ГА, способные работать со сложными структурами регуляторов, включающих большое количество оптимизируемых параметров, применимы для поиска «достаточно хорошего» решения задачи за «достаточно короткое время».

В настоящей статье для трехсвязного структурно-неопределенного объекта управления с переключениями исследуется эффективность применения генетического алгоритма оптимизации параметров регулятора системы децентрализованного комбинированного управления, осуществляемая на

основе минимизации критерия обобщенной работы, аналогично подходу, изложенному в работе [9].

Математическое описание системы управления

Опираясь на результаты статьи [5], рассмотрим динамический объект управления (ОУ), состоящий из трех взаимосвязанных подсистем, описываемых уравнениями в пространстве состояний следующего вида:

$$\frac{dx_i^{(k)}(t)}{dt} = A_i^{(k)} x_i^{(k)}(t) + B_i^{(k)} \left(1 + \beta_i^{(k)}(t)\right) \left(\left(C_{0i}^{(k)}\right)^T x_i^{(k)}(t) + u_i^{(k)}(t) + f_i^{(k)}(t) + Y_i^{(k)}(t) \right), \quad (1)$$

$$y_i^{(k)}(t) = \left(C_{0i}^{(k)}\right)^T x_i^{(k)}(t), \quad x_{0i} = x_i^{(k)}(0),$$

где $k_i = 1, 2, \dots, K_i$, $i = \overline{1, 3}$ – ограниченное количество интервалов времени $T_{k_i} = (t_{k_i} - t_{k_i-1})$ i -й подсистемы; $A_i^{(k)}$ – стационарные матрицы размера $n_i \times n_i$; $B_i^{(k)}$ – векторы размерности $n_i \times 1$; $\beta_i^{(k)}(t)$ – скалярные временные функции; $C_{0i}^{(k)}$ – векторы выхода размерности $n_i \times 1$; $f_i^{(k)}(t)$ – сигналы внешних помех; $Y_i^{(k)}(t) = \sum_{j=1}^l \varphi_{ji}(y_j^{(k)}(t))$, $i \neq j$, $\varphi_{ji}(y_j^{(k)}(t)) \in R$ – сигналы перекрестных связей, действующие на i -ю подсистему со стороны i -й подсистемы; $x_i^{(k)}(t)$ – векторы переменных состояния подсистемы; $u_i^{(k)}(t)$, $y_i^{(k)}(t)$ – управляющие воздействия и выходы соответствующих подсистем ОУ.

Как следует из табл. 1, в первой подсистеме ($i=1$) третьего порядка осуществляется одно переключение в момент времени $t=100$, в результате которого изменяются не только значения ряда параметров первой подсистемы ОУ, но и ее структура (см. вид $B_1^{(1)}$ и $B_1^{(2)}$).

Таблица 1

$0 \leq t < 100$	$100 \leq t$
$A_1^{(1)} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ -1.7 & 0 & 1 \\ 2 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	$A_1^{(2)} = \begin{pmatrix} -0.7 & 1 & 0 \\ 2.5 & 0 & 1 \\ 3 & 0 & 0 \end{pmatrix}$
$(B_1^{(1)})^T = [0 \quad 4.4 \quad 1]$	$(B_1^{(2)})^T = [0 \quad 0 \quad 2]$
$\beta_1^{(1)}(t) = 2 + 1.5 \sin(2t)$	$\beta_1^{(2)}(t) = 1 - 0.5 \cos^2(2t)$
$C_{01}^{(1)} = [1 \quad 0 \quad 0]^T$	$C_{01}^{(2)} = [1 \quad 0 \quad 0]^T$
$(x_1^{(1)}(0))^T = [1 \quad 1 \quad 1]$	$x_1^{(2)}(100) = x_1^{(1)}(100)$
$f_1^{(1)}(t) = 0.6(\cos^2(0.8t) - 1)$	$f_1^{(2)}(t) = 0.6 \cos(0.1t) \sin(0.2t)$
$Y_1^{(k)}(t) = 2.3 \sin(y_2^{(k)}(t)) + 0.4 \sin(0.3 y_3^{(k)}(t))$	

Согласно данным табл. 2, во второй подсистеме ($i = 2$) второго порядка происходит одно переключение, но в уже момент времени $t = 150$, причем, наряду с изменением значений параметров во второй подсистеме ОУ, имеет место и структурное изменение (см. вид $B_2^{(1)}$ и $B_2^{(2)}$).

Таблица 2

$0 \leq t < 150$	$150 \leq t$
$A_2^{(1)} = \begin{pmatrix} -1 & 1 \\ 2 & 0 \end{pmatrix}$	$A_2^{(2)} = \begin{pmatrix} 0.5 & 1 \\ 1.5 & 0 \end{pmatrix}$
$(B_2^{(1)})^T = [1 \quad 2.2]$	$(B_2^{(2)})^T = [0 \quad 1.5]$
$\beta_2^{(1)}(t) = 1.5 + 0.5 \sin(t)$	$\beta_2^{(2)}(t) = 1.2 - 0.8 \cos^2(t)$
$C_{02}^{(1)} = [1 \quad 0]^T$	$C_{02}^{(2)} = [1 \quad 0]^T$
$(x_2^{(1)}(0))^T = [0.5 \quad 0.5]$	$x_2^{(2)}(150) = x_2^{(1)}(150)$
$f_2^{(1)}(t) = 0.4 \cos(0.3t) \sin(0.08t)$	$f_2^{(2)}(t) = 0.1 \sin(0.15t)$
$Y_2^{(k)}(t) = 1.1 \sin(y_1^{(k)}(t)) + 0.4 \sin(0.3y_3^{(k)}(t))$	

В третьей подсистеме ($i = 3$) третьего порядка в момент времени $t = 80$ (табл. 3) осуществляется переключение, а также соответствующие изменения параметров и структуры третьей подсистемы ОУ.

Таблица 3

$0 \leq t < 80$	$80 \leq t$
$A_3^{(1)} = \begin{pmatrix} 0.2 & 1 & 0 \\ -1.2 & 0 & 1 \\ 1.2 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	$A_3^{(2)} = \begin{pmatrix} 0.3 & 1 & 0 \\ -0.2 & 0 & 1 \\ 2.2 & 0 & 0 \end{pmatrix}$
$(B_3^{(1)})^T = [0.8 \quad 1 \quad 0.5]$	$(B_3^{(2)})^T = [0 \quad 1.4 \quad 2]$
$\beta_3^{(1)}(t) = 3 + 2.3 \sin(t)$	$\beta_3^{(2)}(t) = 2 - 1.2 \cos^2(2t)$
$C_{03}^{(2)} = [1 \quad 0 \quad 0]^T$	$C_{03}^{(2)} = [1 \quad 0 \quad 0]^T$
$(x_3^{(1)}(0))^T = [1 \quad 1 \quad 1]$	$x_3^{(2)}(80) = x_3^{(1)}(80)$
$f_3^{(1)}(t) = 0.8 \sin^2(0.2t)$	$f_3^{(2)}(t) = 0.8 \sin(0.3t) - \cos(0.2t)$
$Y_3^{(k)}(t) = 2.3 \sin(y_2^{(k)}(t)) + 1.1 \sin(y_1^{(k)}(t))$.	

Для управления объектом (1) воспользуемся, согласно статье [5], синтезированным на основе применения критерия гиперустойчивости, адаптивно-робастным комбинированным регулятором следующего вида:

$$\begin{aligned}
 u_i^{(k)}(t) = & h_{11i} \tilde{r}_i(t) \int_0^t \tilde{r}_i(v) v_i^{(k)}(v) dv + h_{12i} (\tilde{r}_i(t))^2 v_i^{(k)}(t) + \\
 & + h_{21i} \int_0^t v_i^{(k)}(v) dv + h_{22i} v_i^{(k)}(t) + \\
 & + h_{31i} \tilde{y}_{i\text{sat}}^{(k)}(t) \int_0^t \tilde{y}_i^{(k)}(v) v_i^{(k)}(v) dv + h_{32i} (\tilde{y}_{i\text{sat}}^{(k)}(t))^2 v_i^{(k)}(t),
 \end{aligned} \tag{2}$$

$$v_i^{(k)}(t) = \tilde{r}_i(t) - \tilde{y}_{i\text{sat}}^{(k)}(t), \tilde{y}_{i\text{sat}}^{(k)}(t) = \text{sat}\left(\tilde{y}_i^{(k)}(t)\right) = \begin{cases} -\Delta_i & \text{при } \tilde{y}_i^{(k)}(t) \leq -\Delta_i, \\ \tilde{y}_i^{(k)}(t) & \text{при } \left|\tilde{y}_i^{(k)}(t)\right| < \Delta_i, \\ \Delta_i & \text{при } \tilde{y}_i^{(k)}(t) \geq \Delta_i, \end{cases}$$

где $i = 1, 2, 3$ – номер подсистемы ОУ; k – режим эксплуатации подсистемы; $\tilde{r}_i(t)$ и $\tilde{y}_i^{(k)}(t)$ – скалярные задающие воздействия и выходы i -х подсистем ОУ, полученные с учетом их прохождения через дополнительные задающие и выходные быстродействующие фильтр-корректоры [10, 11].

Имитационное моделирование системы децентрализованного комбинированного управления

Для проведения вычислительного эксперимента в системе управления (1), (2), согласно ПРИЛОЖЕНИЮ, т.е. в зависимости от структуры рассматриваемого регулятора и от специфики работы алгоритма оптимизации были определены и заданы (см. перечень в табл. 4) начальные параметры ГА.

Таблица 4

Наименование параметра	Значение параметра
Количество оптимизируемых переменных	$Nk = 18$
Максимальные значения переменных регулятора	$K_{max} = \begin{bmatrix} 500; 3000; 500; 3000; \\ 2000; 500; 500; 3000; \\ 500; 3000; 2000; 500; \\ 500; 3000; 500; 3000; \\ 2000; 500 \end{bmatrix}$
Минимальные значения переменных регулятора	$K_{min} = \begin{bmatrix} 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; \\ 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1 \end{bmatrix}$
Длина переменных в битах	$Nb = 11$
Количество поколений	$Cycles = 30$
Количество лучших особей	$N = 30$
Количество скрещиваний	$Ns = 18$
Минимальное хэммингово расстояние для скрещивания	$Hs = 2$
Количество мутаций	$Nm = 5$
Вероятность мутации каждого бита особи	$Im = 0.05$
Количество новых случайных особей	$Nr = 1$
Максимальный период катаклизма	$Acm = 120$
Неоднородность ряда	$Lcm = 1.8$
Вероятность мутации каждого бита особи при катаклизме	$Pcm = 0.35$
Критерий качества для системы управления	$I = \int_0^t (u^T(\zeta)Ru(\zeta) + e^T(\zeta)Qe(\zeta))d\zeta.$

В результате вычислений на основе ГА были определены оптимальные значения параметров (см. табл. 5) регулятора (2).

Таблица 5

Оптимальные значения параметров, полученные с помощью работы ГА						
№ подсистемы	h_{11i}	h_{12i}	h_{21i}	h_{22i}	h_{31i}	h_{32i}
$i = 1$	2814.03	110.39	226.47	7.33	223.58	1.73
$i = 2$	990.9	270.72	1413.38	135.25	529.63	413.5
$i = 3$	889.87	321.4	949.74	473.93	2144.82	188.37

Параметры регулятора (2), значения которых в ходе имитационного моделирования были подобраны эвристически [5], приведены в табл. 6.

Таблица 6

Значения параметров, выбранные на основе эвристического подхода						
№ подсистемы	h_{11i}	h_{12i}	h_{21i}	h_{22i}	h_{31i}	h_{32i}
$i = 1$	1200	40	100	20	500	30
$i = 2$	900	50	300	100	500	30
$i = 3$	700	50	150	40	500	50

Характер поведения ошибок $r_i(t) - y_i^{(k)}(t)$ по выходу ОУ, возникающих в каждой из трех подсистем системы децентрализованного комбинированного управления (1), (2), с учетом значений из табл. 5 и 6, изображен на рис. 1.

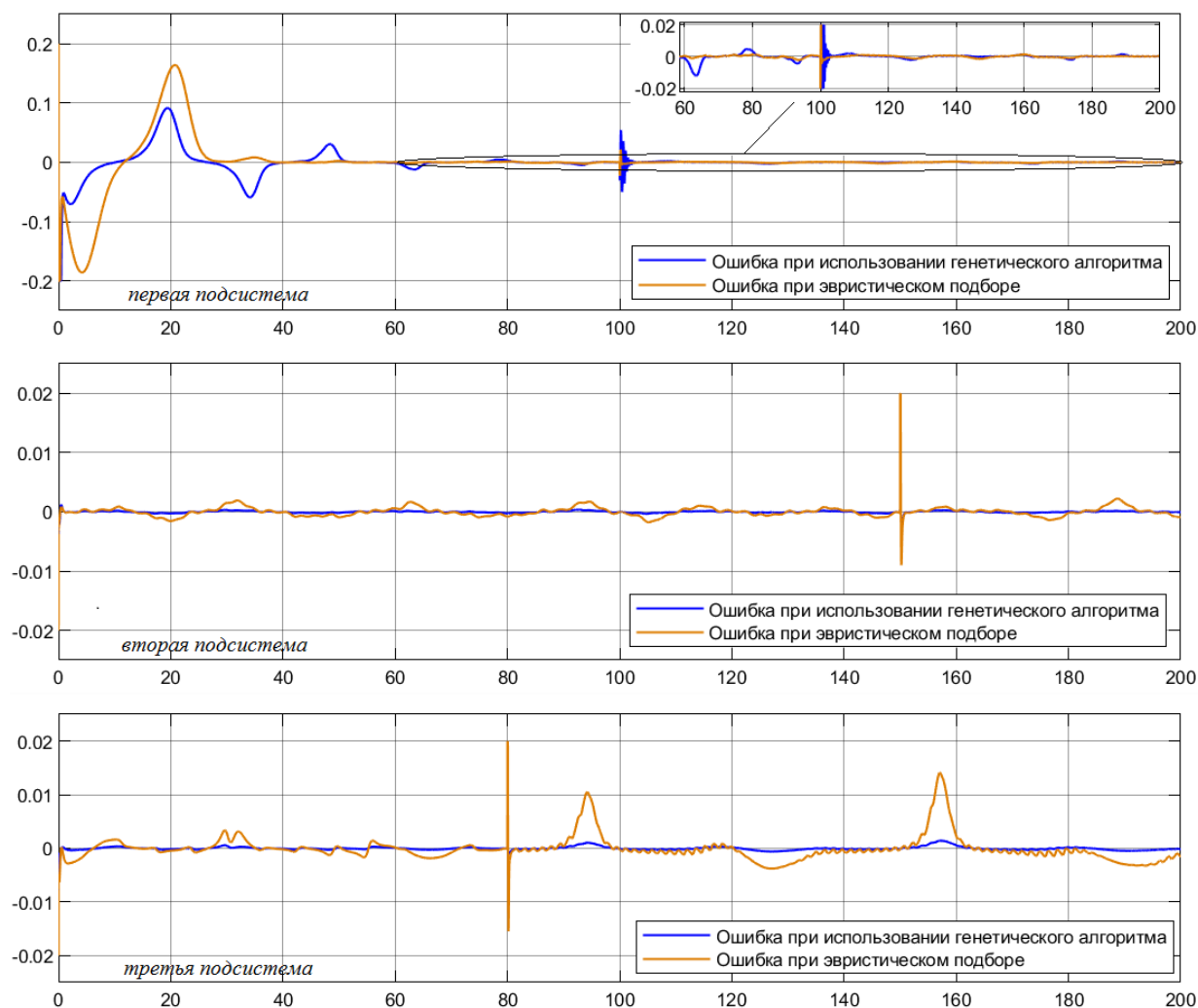


Рис. 1. Динамика ошибок рассогласования в подсистемах системы управления (1), (2) при оптимальных и эвристически подобранных значениях параметров регулятора.

На рис. 2 представлены графики управляющих воздействий $u_i^{(k)}(t)$ в каждой локальной подсистеме трехсвязного ОУ.

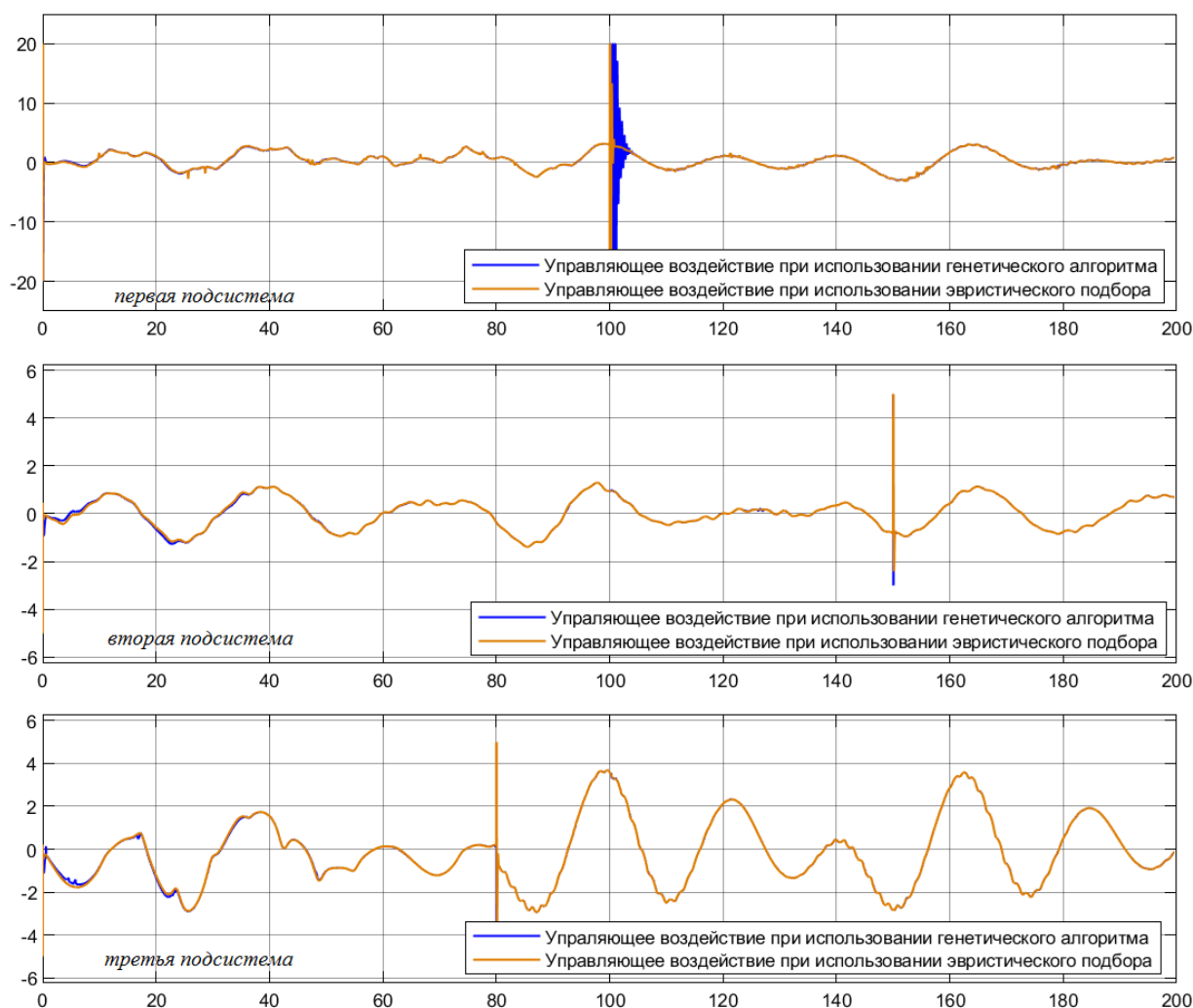


Рис. 2. Графики управляющих воздействий в подсистемах системы (1), (2) при оптимальных и эвристически подобранных значениях параметров регулятора.

Как показал вычислительный эксперимент, при работе системы управления (1), (2) в интервале времени $t = 200$ сек. значения критерия качества (П.1) при выборе параметров регулятора (на основе как эвристики, так и генетики) составили соответственно $I_{\mathcal{G}} = 1.57555 \cdot 10^8$ и $I_{\Gamma} = 1.27575 \cdot 10^6$, т.е. в силу $\min I = I_{\Gamma} \ll I_{\mathcal{G}}$ система (1), (2) с оптимальным регулятором (на основе генетики) показала более высокую эффективность функционирования.

Заключение

Для децентрализованной комбинированной системы управления трехсвязным неопределенным объектом с переключениями показано, что, осуществляя оптимизацию значений параметров используемого регулятора, в частности, синтезированного на основе критерия гиперустойчивости и усло-

вий L -диссипативности, можно с помощью генетического алгоритма и критерия обобщенной работы обеспечить существенное повышение эффективности рассматриваемой системы управления в условиях ее исходной и текущей структурно-параметрической неопределенности.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Основываясь на результатах работ [9, 12], можно выделить несколько основных этапов, реализующих генетический алгоритм оптимизации параметров.

1. Задание общих параметров алгоритма.
2. Создание начальной популяции. Представление каждой особи популяции в виде набора битов.
3. Селекция начальной популяции.
4. Выполнение основных этапов эволюции видов:
 - 4.1. Катаклизм – проводит проверку популяции на неоднородность, по результатам которой осуществляет случайные замены в битовой последовательности особей.
 - 4.2. Кроссовер – процесс образования новых особей-потомков за счет смешения генов особей-родителей.
 - 4.3. Мутация – формирование новой особи за счет замены битовой последовательности случайно выбранной из популяции особи.
 - 4.4. Селекция – отбор наиболее приспособленных особей на основе вычисления функций приспособленностей.
5. Отбор наилучшей особи среди результирующей популяции. Завершение работы алгоритма связано с достижением заданного количества поколений или нахождением наиболее приспособленной особи с наименьшим значением функции приспособленности.

Функция приспособленности определяет, каким особям следует дать возможность скрещиваться и давать потомство, а кого следует исключить из популяции.

Оценка работы генетического алгоритма будет осуществляться по критерию обобщенной работы САУ [13, 14] (рис. П.1), имеющего вид:

$$I = \int_0^t (u^T(\zeta)Ru(\zeta) + e^T(\zeta)Qe(\zeta))d\zeta, \quad (П.1)$$

$$(u^{(k)}(t))^T = (u_1^{(k)}(t), u_2^{(k)}(t), u_3^{(k)}(t)), \quad e^{(k)}(t) = r(t) - y^{(k)}(t),$$

$$Q = \begin{pmatrix} 300 & 20 & 30 \\ 20 & 50 & 10 \\ 30 & 10 & 50 \end{pmatrix}, \quad R = \begin{pmatrix} 10 & 0 & 0 \\ 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 10 \end{pmatrix},$$

где $u^{(k)}(t)$ – вектор управления; $e^{(k)}(t)$ – вектор ошибки по выходу ОУ; $r(t)$, $y^{(k)}(t)$ – векторы задающих воздействий и выхода ОУ; $Q = Q^T > 0$, $R = R^T > 0$ – положительно определенные матрицы.

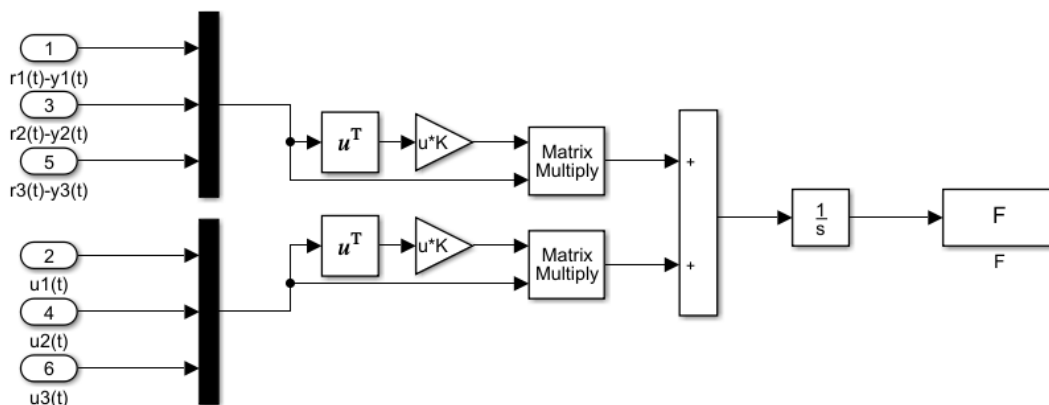


Рис. П.1. – Структурная схема задания функции приспособленности.

Для осуществления работы генетического алгоритма в соответствии с работой [11], помимо задания функции приспособленности, необходимо определить перечень начальных параметров, одни из которых задаются в соответствии со структурой рассматриваемой системы:

количество переменных N_k ;

максимальные значения переменных K_{max} ;

минимальные значения переменных K_{min} ;

длина переменных в битах N_b ,

а другие непосредственно связаны со спецификой работы алгоритма:

количество поколений $Cycles$;

количество лучших выживающих особей N ;

количество скрещиваний N_s ;

минимальное хэммингово расстояние для скрещивания H_s ;

количество мутаций N_m ;

вероятность мутации каждого бита особи I_m ;

количество новых случайных особей N_r ;

максимальный период катаклизма A_{cm} ;

неоднородность ряда, ниже которой произойдет катаклизм L_{cm} ;

вероятность мутации каждого бита особи при катаклизме P_{cm} .

ЛИТЕРАТУРА

1. *Еремин Е.Л., Цыкунов А.М.* Синтез адаптивных систем управления на основе критерия гиперустойчивости. – Бишкек: Изд-во «Илим», 1992.
2. *Еремин Е.Л., Никифорова Л.В., Шеленок Е.А.* Комбинированная нелинейная система управления с неявным эталоном для априорно неопределенного неаффинного двухканального объекта с запаздываниями по выходу // Информатика и системы управления. – 2020. – № 1(63). – С. 95-108.
3. *Еремин Е.Л., Годяев А.И., Шеленок Е.А.* Система децентрализованного нелинейно-периодического управления для одного класса неаффинных многосвязных объектов // Информатика и системы управления. – 2018. – № 4(58). – С. 129-140.
4. *Еремин Е.Л.* Адаптивная система управления с неявным эталоном и блоком быстродействующей коррекции // Информатика и системы управления. – 2012. – № 1(31). – С. 183-194.
5. *Смирнова С.А.* Децентрализованное комбинированное управление многосвязным структурно и параметрически неопределенным объектом // Информатика и системы управления. – 2022. – №2(72). – С. 89-102.
6. *Захарова Е.М., Минашина И.К.* Обзор методов многомерной оптимизации // Информационные процессы. – 2014. – №3. – С. 256-274.
7. *Дарвин Ч.* О происхождении видов путем естественного отбора или сохранении благоприятствуемых пород в борьбе за жизнь. – М.: АН СССР, 1939.
8. *Holland J.H.* Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence. – The MIT Press, Cambridge, 1992.
9. *Шеленок Е.А.* Периодические системы нелинейного управления в условиях неопределенности: дис. ... д-ра техн. наук. – Хабаровск: ТОГУ, 2022.
10. *Еремин Е.Л.* Метод большого коэффициента усиления в задаче самоорганизации систем управления структурно неопределенными линейными объектами с переключениями. I // Информатика и системы управления. – 2021. – № 4(70). – С. 95-109.
11. *Еремин Е.Л.* Метод большого коэффициента усиления в задаче самоорганизации си-

- стем управления структурно неопределенными линейными объектами с переключениями. II // Информатика и системы управления. – 2022. – № 2(72). – С. 60-73.
12. Бураков М.В. Генетический алгоритм: теория и практика: учеб. пособие. – СПб.: ГУАП, 2008.
 13. Красовский А.А., Буков В.Н., Шендрик В.С. Универсальные алгоритмы оптимального управления непрерывными процессами. – М.: Наука, 1977
 14. Справочник по теории автоматического управления / под ред. А.А. Красовского. – М.: Наука, 1987.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Е.А. Ереминым.

E-mail:

Смирнова Софья Александровна – sofya-books-1999@mail.ru.