

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ СХЕМЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕМЕНТОВ В ПРИРОДО-ПРОМЫШЛЕННЫХ СИСТЕМАХ

Н.С. Попов, Н.В. Лузгачева

ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов

Рецензент д-р техн. наук, профессор М.А. Промтов

Ключевые слова и фразы: математическая модель; природо-промышленная система; сопряжение элементов.

Аннотация: Представлена схема сопряжения элементов природо-промышленной системы, построенная по методике аналогичного назначения для сложных электронных систем, адаптированной для конкретной задачи. Полученная в результате математическая модель расширяет возможности анализа природо-промышленных систем как единого целого.

Природо-промышленные системы (ППС), как объекты внимания специалистов по экологической безопасности[1], состоят из огромного числа элементов (подсистем), взаимодействующих друг с другом на основе различных типов хозяйственных связей. Для прогноза экологических последствий, возникающих в случае аварий на промышленных объектах, необходимо знать схему сопряжения элементов и подсистем ППС, чтобы с ее помощью оценивать «глубину» поражения природных объектов, зоны накопления вредных веществ, вторичные изменения состояний экосистем и правильно рассчитывать компенсации в случае страхования рисков от аварийного загрязнения окружающей среды, пожара или взрыва. Математическая модель сопряжения элементов ППС нужна также и для проверки ее структурной устойчивости, связности, организации имитационных исследований и т.д.

Схема сопряжения элементов хорошо известна только для некоторой части ППС, а именно для промышленных подсистем. Построение ее для природных подсистем и для всей ППС в целом нуждается в соответствующей методике. Созданием такого рода методики для сложных электронных систем в 1970-х годах занимался Н.П. Бусленко [2, 3]. Однако использование ее в том виде, который был предложен, невозможно для

Попов Николай Сергеевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Природопользование и защита окружающей среды», e-mail: eco@nnn.tstu.ru; Лузгачева Надежда Валерьевна – аспирант кафедры «Природопользование и защита окружающей среды», ТамбГТУ, г. Тамбов.

ППС, учитывая разнообразие типов элементов и каналов связи. Поэтому представляет интерес адаптация принципов сопряжения элементов сложных электронных систем применительно к природо-промышленным.

Интересуемое в задачах экологической безопасности взаимодействие элементов ППС, в основном, осуществляется с помощью материально-энергетических и информационных потоков. Поскольку их скорости контролируются в самих элементах, а не в каналах связи между ними, существует возможность формализации механизма взаимодействия элементов подобно процессу обмена сигналами [2]. Такая идеализация не приводит к существенным ограничениям в ППС, поскольку любой канал связи, в котором имеет место задержка сигнала во времени, может быть представлен в виде элемента чистого запаздывания.

Пусть природо-промышленная система $S_{\text{ППС}}$ содержит n элементов. На вход условного элемента f_i поступают сигналы $x_{ij} \in X_{ij}$, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, m_i}$, где m_i – число входных контактов, а X_{ij} – множество входных сигналов x_{ij} . С выхода этого же элемента снимаются сигналы $y_{ij} \in Y_{ij}$, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, r_i}$, где r_i – число выходных контактов, а Y_{ij} – множество выходных сигналов y_{ij} .

Введем ряд допущений об организации системы и закономерностях ее функционирования.

1. Элементы экологической подсистемы S_e в ППС могут быть разделены на три основных класса – элементы педосферы¹, гидросферы и тропосферы². Взаимодействие между ними достигается за счет передачи сигналов по каналам связи трех видов: через тропосферу t , гидросферу h и педосферу p . Реально эти каналы представляют собой твердую, жидкую и газовую фазы носителя сигнала (концентрации, энтальпии, давления и т.д.).

На рис. 1, *a–в* представлены графические изображения элементов экологической подсистемы. Их распознавание будем производить в соответствии с обозначением t , p или h горизонтальных каналов связи. В отличие от схем *a–в*, на схеме *г* дано изображение элемента технологии промышленной подсистемы $S_{\text{п}}$ любого уровня ее организации. Для этого элемента p , h и t пусть всегда означают вертикальные входы и выходы твердых, жидких и газообразных веществ, потребляемых или получаемых в технологическом процессе, либо образуемых в нештатных ситуациях.

Поскольку каналы связей всех четырех элементов идентичны, существует принципиальная возможность построения их схемы сопряжения в ППС. Для подключения каналов связей к элементам будем использовать понятие входных и выходных контактов. Учитывая характер каналов связи, для любого i -го элемента обозначим P_{x_i} , H_{x_i} и T_{x_i} – соответственно множества входных контактов связей из педосферы, гидросферы и тропосферы. Аналогично этому P_{y_i} , H_{y_i} и T_{y_i} – множества выходных

¹ Педосфера – верхний слой литосферы.

² Здесь и далее будем считать, что элементы педосферы, гидросферы и тропосферы населены биологическими объектами.

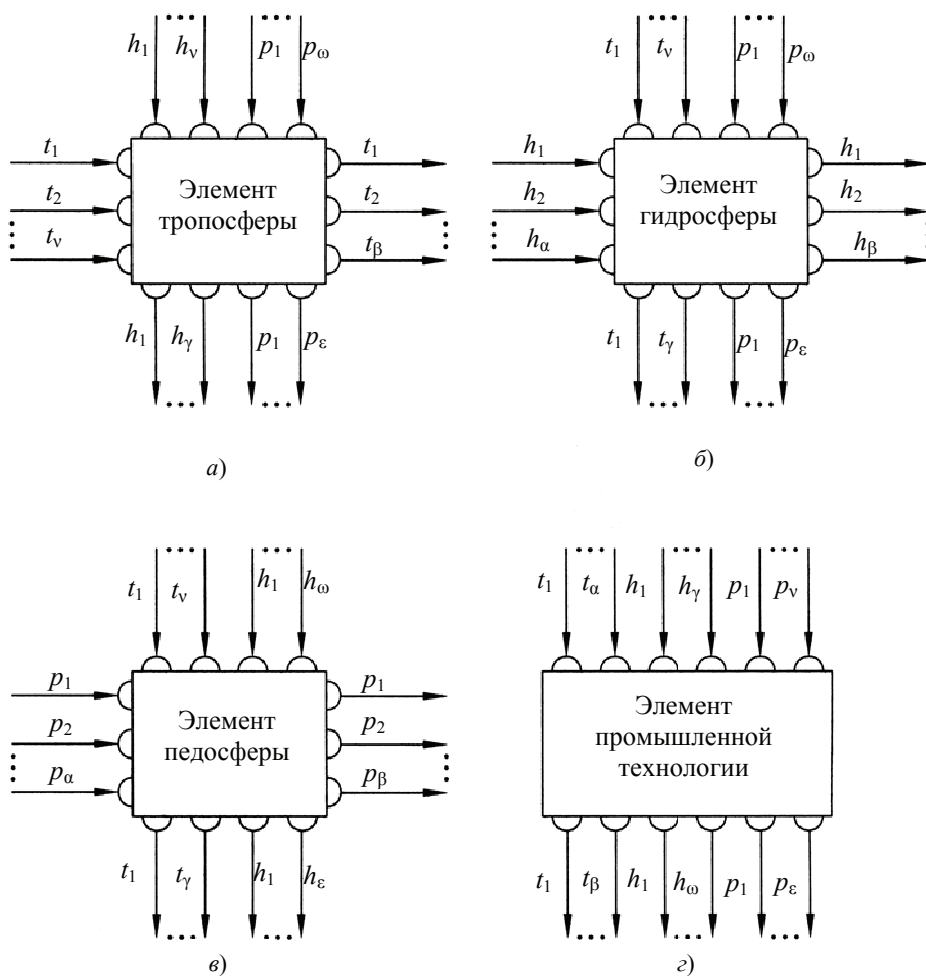


Рис. 1. Условное обозначение элементов ППС:

a – тропосферы; *б* – гидросферы; *в* – педосферы; *г* – промышленной технологии

контактов элемента f_i . Очевидно, что множества всех входных и выходных контактов этого элемента могут быть представлены как

$$K_{X_i} = P_{x_i} \cup H_{x_i} \cup T_{x_i} \text{ и } K_{Y_i} = P_{y_i} \cup H_{y_i} \cup T_{y_i}, \quad i = \overline{1, n}.$$

2. Элементарные каналы, подключенные к выходным контактам элементов педосферы, гидросферы и тропосферы могут образовывать соединение с другими элементами системы только через соответствующие им входные контакты типа p , h и t . Данное предположение необходимо для обеспечения физической однородности каналов связей.

3. Входной сигнал $x(\tau) \in X_{ij}$, поступающий на вход элемента f_i в момент времени τ будем рассматривать как совокупность «элементарных» сигналов $x_{i1}(\tau), x_{i2}(\tau), \dots, x_{im_i}(\tau)$, одновременно возникающих на всех его m_i контактах. Аналогично выходной сигнал $y(\tau) \in Y_{ij}$ представляет собой совокупность элементарных сигналов $y_{i1}(\tau), y_{i2}(\tau), \dots, y_{ir_i}(\tau)$, одновременно

возникающих на r_i выходных контактах i -го элемента. К ним, в частности, относятся концентрации примесей, мощность потоков, температуры и т.п.

4. Элементарные сигналы передаются в системе по индивидуальным каналам независимо друг от друга.

Пусть на входы f_i поступают элементарные сигналы $x_{ij}(\tau)$, $j = \overline{1, m_i}$. Тогда любой e -й контакт $k_{x_i}^{(e)} \in K_{x_i}$ на входе элемента принимает только сигнал $x_{ie}(\tau)$. Соответственно любой g -й контакт $k_{y_i}^{(g)} \in K_{y_i}$ на выходе элемента выдает только сигнал $y_{ig}(\tau)$. Передача сигнала с выхода элемента системы возможна лишь при наличии соответствующего носителя этого сигнала в канале связи, соединяющем интересующие контакты.

5. К входному контакту любого элемента ППС можно подключить не более одного элементарного канала, а к выходному контакту может быть подключено любое конечное число элементарных каналов, что необходимо для устранения неоднозначности в реакции элемента, возникающей при одновременном появлении нескольких входных сигналов на одном контакте [2].

6. Взаимодействие ППС с внешней средой будем рассматривать как обмен сигналами между элементом внешней окружающей среды и элементами системы. Согласно этому представим внешнюю окружающую среду в виде фиктивного элемента f_0 . На его входы поступают элементарные сигналы из системы: $x_{01}(\tau)$, $x_{02}(\tau)$, ..., $x_{0m_0}(\tau)$, где m_0 – количество входных контактов f_0 . Сигнал, поступающий в систему из внешней окружающей среды, является выходным сигналом f_0 и состоит из элементарных сигналов $y_{01}(\tau)$, $y_{02}(\tau)$, ..., $y_{0r_0}(\tau)$, где r_0 – количество выходных контактов f_0 .

Будем считать, что все ранее сделанные предложения для элементов ППС сохраняются и для элемента f_0 . В итоге каждый i -й элемент ППС $S_{\text{ППС}}$, в рамках принятых предположений о механизме обмена сигналами, достаточно характеризовать множествами его входных K_{x_i} и K_{y_i} контактов. Для построения схемы сопряжения элементов необходимо установить отношения порядка предшествования между всеми контактами в системе. Под отношением порядка здесь будем понимать порядок подключения выходного контакта к входному. Это можно сделать на основе допущения 5, согласно которому для любого $i = \overline{1, n}$ и $j = \overline{1, m_i}$ каждому входному контакту $k_{x_i}^{(j)} \in K_{x_i}$ соответствует не более чем один выходной контакт $k_{y_g}^{(e)} \in K_{y_g}$, $g = \overline{0, n}$, $e = \overline{1, r_g}$, с которым он связан элементарным каналом. Следовательно, можно ввести однозначный оператор сопряжений элементов

$$k_{y_g}^{(e)} = R(k_{x_i}^{(j)}), \quad (1)$$

с областью определения на множество K_{x_i} и областью значений на множестве $\bigcup_{g=0}^n K_{y_g}$, сопоставляющий j -му входному контакту i -го элемента e -й выходной контакт g -го элемента $g = \overline{0, n}$.

Упрощение структуры взаимодействия в реальной системе может привести к отсутствию некоторых каналов связи в схеме сопряжения элементов. Так, например, если к контакту $k_{x_i}^{(j)}$ не подключен элементарный канал, значит на нем не задан оператор R .

Для образования схемы сопряжения элементов в ППС вполне достаточно множеств K_{x_i} , K_{y_i} и операторов R_i , $i = \overline{0, n}$.

Зная R_i , можно определить множество всех выходных контактов элемента f_g , связанных с входными контактами элемента f_i

$$K_{y(gi)} = K_{y_g} \cap R_i(K_{x_i}). \quad (2)$$

По аналогии с этим можно найти и множество входных контактов элемента f_g , соединенных каналами с выходными контактами элемента f_i

$$K_{x(ig)} = R_g^{-1}(K_{y_i} \cap R(K_{x_g})), \quad (3)$$

где R_g^{-1} – обратный оператор, отображающий множество интересуемых соединений на K_{x_g} . Множества $K_{x(ig)}$ и $K_{y(gi)}$ могут потребоваться, например, при оценке числа степеней свободы ППС.

Построение схемы сопряжения элементов рассмотрим на примере гипотетической ППС (рис. 2). В практической ситуации все возможные

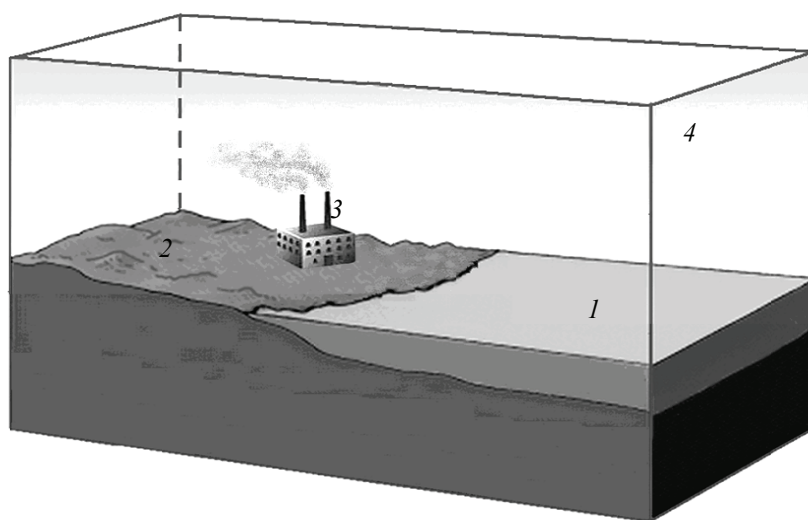


Рис. 2. Природо-промышленная система:
 1 – река; 2 – луг; 3 – химическое предприятие;
 4 – тропосфера; ——— – граница системы

каналы связи элементов ППС могут быть выявлены в результате проведения специальных экспериментов с индикаторными веществами – трассерами, а затем оценены на значимость в материально-энергетическом и информационном обмене системы [4].

Оператор R зададим в следующей матричной форме: на пересечении строк с номерами элементов системы i и столбцов с номерами контактов p_j, h_j и t_j запишем номер элемента, и номер контакта канала связи, по которому осуществляется взаимодействие. Оператор R_i представлен в табл. 1. Для рассматриваемого примера будем считать возможной схему сопряжения элементов (рис. 3, а).

Схему сопряжения элементов на рис. 3, а можно представить и направленным графом связей, в котором вершинами служат контакты, а ребрами – элементарные каналы. Отображение структуры системы малой размерности на основе теории графов имеет ощутимые преимущества при визуальном способе ее анализа.

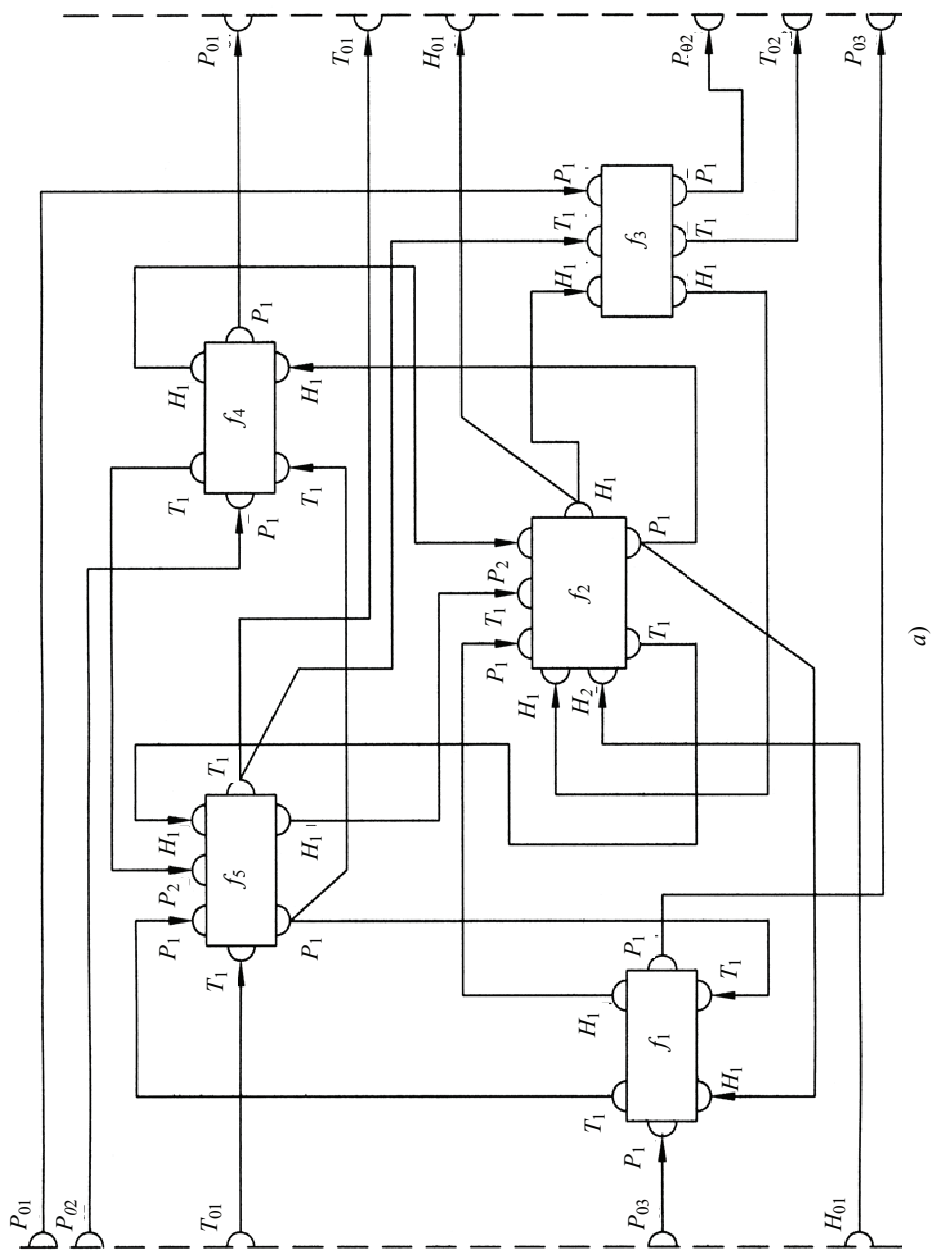
Рассмотрим теперь особенности формализованного описания взаимодействия элементов и подсистем в многоуровневой ППС. Для этого условимся считать элементы f_1 и f_4 состоящими, по меньшей мере, из двух элементов каждый: f_1^I, f_1^{II} и f_4^I, f_4^{II} . Тогда вместо f_1 и f_4 получаем подсистемы S_1 и S_4 . Реально это может означать более детальное описание лесного S_1 и лугового S_4 биоценозов (например, деление их на однолетние и многолетние растения). Можно предположить, что и другие элементы схемы (см. рис. 2) допускают декомпозицию на составляющие их части, то есть f_2, f_3 и f_5 могут являться подсистемами. Следуя этому, представим одну из возможных схем сопряжения подсистем в ППС на рис. 3, б.

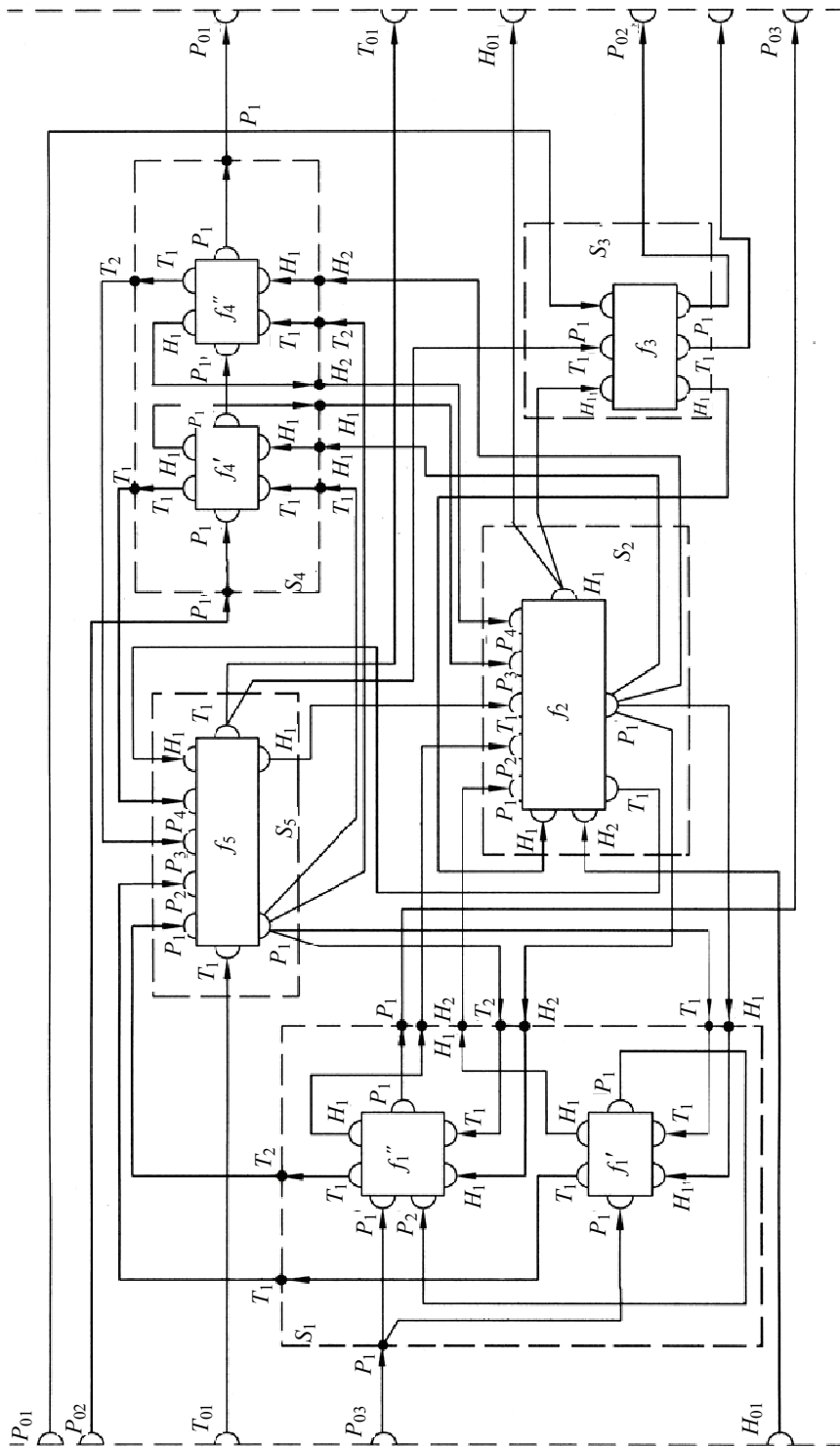
Каждая из вновь образованных подсистем $S_v, v = \overline{1, N}$ (в данном примере $N = 5$), может рассматриваться и как элемент ППС, и как самостоятельная система. Как самостоятельная система S_v имеет контакты K_{x0}^v и K_{y0}^v фиктивного элемента f_0^v , представляющего для нее внешнюю среду, а как v -й элемент ППС она содержит входные K_x^v и выходные K_y^v контакты для подключения каналов связи с другими подсистемами. В результате каждому e -му входному и выходному контакту подсистемы S_v и на ее границе соответствуют «двойные» контакты: $K_{y0}^{v(e)}, K_x^{v(e)}$ и $K_{x0}^{v(e)}, K_y^{v(e)}$.

Таблица 1

Оператор сопряжения элементов ППС

$i \backslash K_{xi}$	P_1	P_2	P_3	T_1	T_2	H_1	H_2
0	4, P_1	3, P_1	1, P_1	5, T_1	3, T_1	2, H_1	–
1	0, P_{03}	–	–	5, P_1	–	2, P_1	–
2	1, H_1	4, H_1	–	5, H_1	–	3, H_1	0, H_{01}
3	0, P_{01}	–	–	5, T_1	–	2, H_1	–
4	0, P_{02}	–	–	5, P_1	–	2, P_1	–
5	1, T_1	4, T_1	–	0, T_{01}	–	2, T_1	–





б)
 Рис. 3. Схема сопряжения элементов ППС: а – гипотетической; б – двухуровневой

Множество выходных контактов K_y^v всех элементов $f_i \in S_v$ можно опеределить следующим образом

$$K_{yi}^v = \bigcup_{f_i \in S_v} \left(K_{y0}^v \bigcup \left(\bigcup_{f_i \notin S_v} K_{y(ij)}^v \right) \right), \quad (4)$$

где K_{y0}^v – множество выходных контактов $f_i \in S_v$, соединенных элементарными каналами с f_0 ; $K_{y(ij)}^v$ – множество выходных контактов $f_i \in S_v$, соединенных каналами связи с элементами $f_j \in S_v$.

Из допущения 5 следует, что для каждого $k_{yi}^{v(j)} \in K_{yi}^v$ достаточно иметь один двойной контакт $(k_{y0}^{v(e)}, k_x^{v(e)})$, независимо от числа подключенных к нему элементарных каналов. Тогда воспользуемся операторами L_v и M_v , которые каждому $k_{yi}^{v(j)} \in K_{yi}^v$ ставят в соответствие пару контактов:

$$k_x^{v(e)} = L_v(k_y^{v(j)}), \quad v = \overline{1, N}; \quad (5)$$

$$k_{y0}^{v(e)} = M_v(k_y^{v(j)}), \quad v = \overline{1, N}. \quad (6)$$

Операторы L_v и M_v могут быть заданы в матричной форме. Для S_4 они представлены в табл. 2. Операторы L_v и M_v описывают взаимно однозначные соответствия контактов, а поэтому для них существуют однозначные обратные операторы L_v^{-1} и M_v^{-1} .

Множество входных контактов K_{xi}^v всех элементов $f_i \in S_v$ определим по формуле, сходной с (4)

$$K_{xi}^v = \bigcup_{f_i \in S_v} \left\{ K_{x0}^v \bigcup \left(\bigcup_{f_i \notin S_v} K_{x(ig)}^v \right) \right\}, \quad (7)$$

где K_{x0}^v – множество входных контактов $f_i \in S_v$, соединенных элементарными каналами с f_0 ; $K_{x(ig)}^v$ – множество входных контактов $f_i \in S_v$, соединенных каналами связи с элементами $f_g \notin S_v$.

Очевидно, что каждый $k_{xi}^v \in K_{xi}^v$ будет иметь двойной контакт. Это соответствует случаю, когда некоторые контакты имеют одинаковый оператор R (см. схему рис. 3, б подсистема S_1 , входной контакт p_1).

Таблица 2

Операторы соответствия L_4 и M_4

$i \backslash j$	4(1), T_1	4(1), H_1	4(2), T_1	4(2), H_1	4(2), P_1	
e	T_1	H_1	T_2	H_2	P_1	L_4
e_0	T_1	H_1	T_2	H_2	P_1	M_4

Подобно операторам L_v и M_v введем операторы N_v и Q_v , которые каждому $k_x^{v(i)} \in K_x^v$ ставят в соответствие пару контактов

$$k_y^{v(e)} = N_v(k_{xi}^{v(j)}), \quad v = \overline{1, N}; \quad (8)$$

$$k_{x0}^{v(e)} = Q_v(k_{xi}^{v(j)}), \quad v = \overline{1, N}. \quad (9)$$

Задание N_v и Q_v возможно отобразить и в матричном виде. Для S_4 операторы N_v и Q_v представлены в табл. 3. Соответствия, описываемые операторами N_v и Q_v в общем случае не являются однозначными, а поэтому однозначных N_v^{-1} Q_v^{-1} не существует.

Таким образом построение схемы взаимодействий элементов и подсистем в M -урневой ППС может выполняться последовательно, начинаясь с формирования схемы сопряжения в каждой из подсистем 1-го уровня и заканчиваясь построением схемы сопряжения всех подсистем M -го уровня. Отсюда, схема взаимодействия для рассматриваемого примера двухурневой ППС реализуется в 2 этапа. Первый этап – построение схемы сопряжения элементов $f_i \in S_v$, $v = \overline{1, N}$ предполагает рассмотрение каждой подсистемы как самостоятельной системы, подобно схеме (см. рис. 3, а). Для построения интересующей схемы необходимо иметь множества входных K_{xi}^v и выходных K_{yi}^v контактов элементов $f_i \in S_v$, аналогичные множества контактов элемента внешней среды f_0^v , а также оператор сопряжения первого уровня R_v^0 .

Множества входных и выходных контактов элемента f^v определим с помощью операторов M_v и Q_v :

$$K_{x0}^v = Q_v(K_{yi}^v), \quad v = \overline{1, N}; \quad (10)$$

$$K_{y0}^v = M_v(K_{xi}^v), \quad v = \overline{1, N}, \quad (11)$$

где K_{yi}^v и K_{xi}^v определяются по формулам (4) и (7).

Оператор сопряжения первого уровня R_v^1

$$K_{yg}^{v(e)} = R_v^1(K_x^{v(j)}), \quad (12)$$

с областью определения на множестве $\left\{ K_{x0}^v \cup \left(\bigcup_{f_i \in S_v} K_{xi}^v \right) \right\}$ и областью

Таблица 3

Операторы соответствия N_4 и Q_4

$i \backslash j$	4(1), P_1	4(1), T_1	4(1), H_1	4(2), T_1	4(2), H_1	
e	P_1	T_1	H_1	T_2	H_2	N_4
e_0	P_1	T_1	H_1	T_2	H_2	Q_4

значений на множестве $\{K_{y0}^v \cup (\bigcup_{g \times} K_{yg}^v)\}$ сопоставляет j -му контакту i -го элемента v -й подсистемы e -й контакт g -го элемента в S_v .

Форма представления R_v^1 тождественна форме задания оператора R в табл. 3. Для подсистемы S_1 , в частности, она имеет вид табл. 4.

Второй этап построения схемы взаимодействия S_v предполагает рассмотрение каждой подсистемы как элемента ППС. Для этого необходимо иметь множества K_x^v входных и K_y^v выходных контактов, определяемых по формулам:

$$K_x^v = L_v(K_{xi}^v), \quad i = \overline{1, N}; \quad (13)$$

$$K_y^v = M_v(K_{yi}^v), \quad i = \overline{1, N}. \quad (14)$$

Внешнюю среду системы S будем представлять как подсистему S_0 с входными K_{x0} и K_{y0} контактами. Схему сопряжения S_v , $v = \overline{0, N}$ реализуем с помощью оператора второго уровня R_v^2

$$K_y^{\mu(e)} = R_v^2(K_x^{v(j)}), \quad (15)$$

отображающего множество $\bigcup_{v \in \overline{0, N}} K_x^v$ на множество $\bigcup_{\mu \in \overline{0, N}} K_y^\mu$, где

$K_x^v = \{k_x^{v(j)}, j \in J_x^v\}$; $K_y^\mu = \{k_y^{\mu(j)}, j \in J_y^\mu\}$, а J_x^v и J_y^μ – соответственно множества всех номеров входных и выходных контактов S_v , $v = \overline{1, N}$.

Оператор R_v^2 каждому j -му контакту v -й подсистемы ставит в соответствие e -й контакт подсистемы S_μ . Его задание возможно в матричной форме. Значение оператора R_v^2 для схемы (см. рис. 3, б) приведены в табл. 5.

Совокупность схем сопряжения подсистем S_v в системе S и элементов f_i в подсистемах S_v , $v = \overline{1, N}$ будем называть двухуровневой схемой сопряжения ППС. Она содержит множества контактов K_x^v , K_y^v , $v = \overline{0, N}$ оператор R_v^2 множества контактов K_{xi}^v , K_{yi}^v и K_{x0}^v , K_{y0}^v , а также операторы R_v , $v = \overline{1, N}$, $i = \overline{1, n}$.

Таблица 4

Оператор сопряжения i -го уровня

$i \backslash j$	T_1	T_2	P_1	P_2	H_1	H_2
0	1(1), T_1	1(2), T_1	1(2), P_1	–	1(1), H_1	1(2), H_1
$e(1)$	0, T_1	–	0, P_{03}	–	0, H_1	–
$e(2)$	0, T_2	–	0, P_{03}	1(1), P_1	0, H_2	–

Таблица 5

Оператор сопряжения второго уровня

$i \backslash v$	P_1	P_2	P_3	P_4	H_1	H_2	T_1	T_2
0	3, P_1	4, P_1	1, P_1	–	2, H_2	–	–	–
1	0, P_{03}	–	–	–	2, P_1	2, P_1	5, P_1	5, P_1
2	1, H_1	1, H_2	4, H_1	4, H_2	3, H_1	0, H_{01}	5, H_1	–
3	0, P_{01}	–	–	–	2, H_1	–	5, T_1	–
4	0, P_{02}	–	–	–	2, P_1	2, P_1	5, P_1	5, P_1
5	1, T_2	1, T_1	4, T_2	4, T_1	2, T_1	–	0, T_{01}	–

Принципы построения M -уровневой схемы сопряжения ППС аналогичны принципам, положенным в основу двухуровневой системы.

Зная схему сопряжения ППС, можно приступить к анализу воздействия различных аварийных факторов на внутренние свойства элементов.

Список литературы

1. Попов, Н.С. Методологические основы теории безопасности / Н.С. Попов, Н.В. Лузгачева, А. Хайри // *Вопр. совр. науки и практики*. Ун-т им. В.И. Вернадского. – 2010. – № 10-12(31). – С. 10–28.
2. Бусленко, Н.П. Моделирование сложных систем / Н.П. Бусленко. – М. : Наука, 1968. – 356 с.
3. Бусленко, Н.П. Математическая модель сопряжения элементов в сложной системе / Н.П. Бусленко // *Электрон. техника. Сер. 9. Автоматизир. системы управления*. – 1972. – Вып. 1(1). – С. 10–22.
4. Шульц, В. Радиоэкологические методы : пер. с англ. / В. Шульц, Ф. Уикер ; под ред. Р.М. Алексахина. – М. : Мир, 1985. – 312 с.

Method of Constructing Patterns of Interaction among the Elements of Biological Industrial Systems

N.S. Popov, N.V. Luzgacheva

Tambov State Technical University, Tambov

Key words and phrases: biological industrial system; coupling of elements; mathematical model.

Abstract: The paper presents the patterns of interaction among the elements in biological industrial systems based on a similar method for the complex electronic systems adapted for the specific task. The resulting mathematical model extends the analysis of biological industrial systems as a whole.

© Н.С. Попов, Н.В. Лузгачева, 2011