

УДК 51-74

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ РЕСУРСОВ В КИБЕРФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Львович Я.Е., Аветисян Т.В., Преображенский А.П.

АНОО ВО «Воронежский институт высоких технологий», Воронеж, e-mail: app@vivt.tu

В настоящее время киберфизические системы активным образом применяются внутри различных организаций. Внутри организаций могут быть реализованы различные изменения. Это определяет необходимость в новых подходах с точки зрения организации управления. Деятельность организаций можно представить в виде многоканальной системы ресурсного обеспечения. В работе даются предложения по формированию структурной модели многоканальной системы ресурсного обеспечения. Обсуждается, как уровень показателей будет оказывать влияние на интегральные показатели эффективности киберфизической системы. Ресурсная обеспеченность соотносится соответствующим образом с некоторыми показателями. Показатели будут устанавливаться на соответствующих наборах вследствие использования выбранных функций. На базе многоканального подхода необходимо формировать соответствующий модуль в ходе анализа ресурсного обеспечения киберфизической системы. В виде группировки могут быть представлены несколько типовых структур, когда он реализуется. Показатели элементов модуля будут описываться на основе случайных величин. Продемонстрировано, каким образом ресурсы могут быть оптимизированы внутри киберфизических систем. Приведены результаты, которые демонстрируют применение регрессионных моделей. Они дают возможности для того, чтобы описывать взаимосвязь показателей, которые характеризуют состояние киберфизических систем относительно показателей работы организации.

Ключевые слова: киберфизические системы, моделирование, оптимизация, ресурс, управление

MODELING AND OPTIMIZATION OF RESOURCES IN CYBER-PHYSICAL SYSTEMS

Lvovich Ya.E., Avetisyan T.V., Preobrazhenskiy A.P.

Voronezh institute of high technologies, Voronezh, e-mail: app@vivt.tu

Currently, cyber-physical systems are actively used within various organizations. Various changes can be implemented within organizations. This determines the need for new approaches in terms of management organization. The activities of organizations can be represented as a multi-channel resource system. The paper makes proposals for the formation of a structural model of a multi-channel system of resource provision. Discusses how the level of indicators will affect the integral performance indicators of the cyberphysical system. Resource assurance is correlated accordingly with certain indicators. The indicators will be set on appropriate sets due to the use of selected functions. Based on the multi-channel approach, an appropriate module should be formed during the analysis of the resource provisioning of the cyber-physical system. Several typical structures can be presented in the form of a grouping, when it is implemented. Indicators of the elements of the module will be described on the basis of random variables. It is demonstrated how resources can be optimized within cyber-physical systems. Results are presented that demonstrate the application of regression models. They provide opportunities to describe the relationship of indicators that characterize the state of cyber-physical systems relative to organizational performance.

Keywords: cyber-physical systems, modeling, optimization, resource, control

Киберфизические системы в настоящее время могут быть использованы для решения различных практических проблем. Их можно внедрять в любой организации. Соответствующий набор ресурсов должен быть сформирован для того, чтобы поддерживать их функционирование. Можем использовать понятие многоканальной системы при описании ресурсного обеспечения. Персонал, программное обеспечение, оборудование позволяют сформировать ключевые ресурсы [1, 2]. Достаточность обеспечения ресурсами ведет к требуемому уровню обслуживания внутри киберфизических систем. Многоканальная система дает возможности для того, чтобы осуществлять накопление относительно всех ресурсов. Также многоканальные подходы при анализе услуг и структур управления позволяют прийти к эффективному распределению ресурсов [3].

Материалы и методы исследования

В киберфизической системе по ресурсному обеспечению осуществим формализацию с точки зрения структуры модуля. Тогда управление в нем будет рационализироваться (рисунок).

Определить предлагаемый модуль по компонентам ресурсов и управления можно на основе отношений по непустым множествам

$$a = S \subset R \times H. \quad (1)$$

В ходе моделирования S рассматривается как набор возможных вариантов модуля распределения ресурсов. Учитывается, что R будет множеством компонентов ресурсов [4]. Компоненты управления описываются на основе множества H .

Базовое множество мы представляем следующим образом

$$R \subset \times \{r_j : j \in J\}. \quad (2)$$

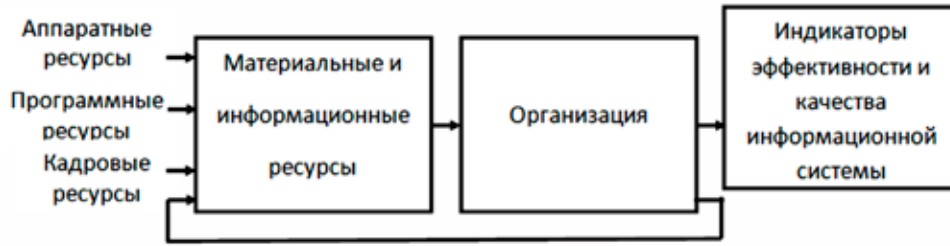


Рис. 1. Иллюстрация структурных особенностей ресурсного обеспечения киберфизической системы на основе многоканального подхода

Ресурс, относящийся к j -му типу, в ходе моделирования рассматривается в виде совокупности вариантов $r_j = \overline{1, R_j}$; ссылка на имена компонентов ресурсов осуществляется на основе набора индексов j ; декартово произведение обозначается как \times . В таких случаях можно говорить о справедливости соотношения

$$H \subset \times \{h_t \div t \in T\}. \quad (3)$$

Управленческий компонент t -типа рассматривается в виде вариантов $h_t = \overline{1, H_t}$. Множество T будет связано с индексами, соотносимыми с названиями компонентов управления [5]. Элементы множества (1) могут быть сформированы на основе пары векторов

$$S_1 = (r, h), S_1 \in S, l = \overline{1, L}. \quad (4)$$

В ходе моделирования $r = (r_1, \dots, r_j, \dots, r_J)$, $j = \overline{1, J}$, $r_j = \overline{1, R_j}$, $h = (h_1, \dots, h_t, \dots, h_T)$, $t = \overline{1, T}$, $h_t = \overline{1, H_t}$. Совместная пара элементов будет обозначаться $(r_j, h_t) = U_g, g = \overline{1, G}$. После этого представляем

$$S_l = (U_1, \dots, U_g, \dots, U_G), l = \overline{1, L}. \quad (5)$$

При рассмотрении $U_g = \overline{1, U_g}, g = \overline{1, G}$ являются элементами в модуле поддержки ресурсообеспечения. В ходе реализации модуля общее количество вариантов рассматривается как L . В модуле можно дать характеристику элементов U_g при помощи метрического вектора f_{ug} . Уровень показателей f_{ug} будет оказывать влияние на интегральные показатели эффективности киберфизической системы $F_i, i = \overline{1, I}$. Справедлива следующая зависимость

$$F_i = Y(f_{ug}). \quad (6)$$

Значения заданного показателя по всем элементам модуля будут оказывать влияние на соответствующие типы неисправностей внутри киберфизической системы. Ресурс-

ная обеспеченность связана заметным образом с некоторыми показателями F_i . Например, должно быть достаточное количество аппаратного или программного обеспечения. Может быть сформировано подмножество $I_R \in I$ на основе таких показателей. Другие показатели могут оказывать влияние на управленческую составляющую [6, 7]. Например, специалисты проводят периодическую проверку оборудования. Будет выполняться свойство принадлежности для подмножества $I_H \in I$ благодаря указанным показателям. В ходе решения задач [8] по модульному управлению можно увидеть связь среди подмножеств I_R и I_H .

$$I_R \cup I_H = I, I_R \cap I_H \neq \emptyset. \quad (7)$$

Перечисленные показатели будут устанавливаться на наборах U_g вследствие использования функций

$$f_{ug} \in \{U_g \times f\}, \Psi_i \in \{s \times F_i; i \in I\}. \quad (8)$$

По зависимости (8) имеются возможности для вычисления значений функций с привлечением соответствующей комбинации с элементов U_g . В таком случае это можно представлять таким образом: $F_i(s(U_g), f_{ug})$. Формируются зависимости (8), по работе киберфизической системы происходит реализация статистической обработки информации. Показатели элементов модуля будут описываться на основе случайных величин F_{ug} . Стохастическим образом будут описываться показатели $F_i = \Psi_i(F_{ug})$. Вероятностные меры могут быть по ним заданы соответствующим образом:

$$P\{\Psi_i \subset (r, V) \times F_i \leq F_i^0; i \in I\}. \quad (9)$$

В ходе моделирования $P\{\}$ рассматривается в виде вероятности. Искомое значение по показателю F_i будет F_i^0 . Когда происходит процесс управления киберфизической системой, тогда будет жестким образом определено ресурсное обеспечение $r_g^0 \in U_g, g = \overline{1, G}$. Относительно h_g^0 проведение выбора будет при условии

$$P(\Psi_i C(r^0, h) \times F_i \geq F_i^0 : i \in I_H) \rightarrow \max. \quad (10)$$

Следующее выражение может быть использовано для выбора элементов r_g^0, h_g^0 , если реализуется управление модулем:

$$P(\Psi_i C(r, h) * F_i \geq F_i^0 : i \in I_R \cup I_V) \rightarrow \max. \quad (11)$$

Вероятность выбора по показателям F_i ($i \in I_R$), когда используется система соотношений (8), рассматривается таким образом

$$P(R) = \max P\{\Psi_i \in (r, h) \times F_i \geq F_i^0 : i \in I_R$$

$$P(H) = \max P\{\Psi_i \in (r, h) \times F_i \geq F_i^0 : i \in I_H.$$

При учете правила (10) в виде вероятности выбора анализируется такая величина p^R . При учете правила (11) как вероятность выбора анализируется величина P^C . Можно сделать такую запись условий при учете формирования подмножеств I_R, I_H :

$$p^{mp} = \frac{P(R, H)}{P(R)}; P^C = P(R) + P(H) - P(R, H),$$

$$P(R, H) = \max P\{\Psi_i \in (r, h) \times F_i \geq F_i^0 : i \in I_R;$$

$$\Psi_i \in (r, h) \times F_i \geq F_i^0 : i \in I_H.$$

В таком случае

$$P^C - p^{mp} =$$

$$= P(R)(1 - p(H * R)) + (P(H) - P(H * R)). \quad (12)$$

Значение первого члена в выражении (12) всегда будет положительным. Значение вероятности будет больше того, которое соответствует выбранным ранее значениям r_g^0 в случае, когда рассматриваются показатели F_i ($i \in I_R \cap I_H$), при учете оптимальных значений h_g^0 , и будут любые значения r_g . Тогда мы сможем убедиться, что $P(H) > P(H/R)$. Будет положительной в таком случае оценка (12). Что может иллюстрировать получаемый результат? Большая эффективность в работе киберфизических систем получается вследствие применения современных подходов в управлении. На базе многоканального подхода необходимо формировать соответствующий модуль в ходе анализа ресурсного обеспечения киберфизической системы. В виде группировки могут быть представлены несколько типовых структур, когда он реализуется [9]. Они будут следующие: сходящиеся, расходящиеся и с учетом обратного. Для конвергентной структуры мы придем к следующему выражению при рассмотрении комбинации ресурсной и управленческой составляющих [10]:

$$U_{conv} = (r_1^{inp}, \dots, r_j^{inp}, \dots, r_7^{inp}, h_{con}).$$

Придем к такому выражению, когда структура будет расходящейся:

$$U_{div} = (r, h_{div}, r_1^{inp}, \dots, r_j^{inp}, \dots, r_7^{inp}).$$

Мы придем к такому выражению, если структура будет перевернута:

$$U_{rev} = (r, h_{div}, r_R^{out}, r_R^{in}).$$

Выбор относительно наилучшего сочетания U_{conv} , U_{div} и U_{rev} необходимо сделать на основе показателей F_i ($i = 1, I$). Это будет соответствовать оптимизации рассматриваемой системы.

Оптимизация ресурсов киберфизической системы. То, как работает сходящаяся и расходящаяся структура, определяет, как работает модуль в многоканальном подходе. Расходящаяся структура будет иметь большее влияние. Что является причиной этого? Между конкретными видами деятельности информационной системы осуществляется процесс распределения программно-аппаратных ресурсов. Первичные источники в ресурсах связаны с особенностями конвергентной структуры. Виды деятельности в информационных системах разнообразны [11]. Количество ресурсов x_j ($j = 1, J$) должно быть рационально распределено. Для этого в структуре информационной системы необходимо определить степень приоритетности каждого из j -го вида деятельности. Анализ показывает, что перспективным является подход, основанный на экспертной оценке с использованием априорного ранжирования. Целесообразно перевести полученные абсолютные приоритеты a_j ($j = 1, J$) в относительный вид

$$c_j = 1 - \frac{a_j}{\sum_{i=1}^J a_i}, \quad j = \overline{1, J}.$$

Будет показывать целевая функция, насколько оптимальным будет распределение

$$\sum_{j=1}^J c_j x_j \rightarrow \max. \quad (13)$$

Также существуют ограничения:

а) по значениям мощности компонентов информационной системы в подразделениях организации

$$\sum_{j=1}^J d_{kj} x_j \leq D_k, \quad k = \overline{1, K}. \quad (14)$$

В указанном выражении d_{kj} показывает значение средней загрузки информационной системы в k -м отделе; D_k – величина гарантированного временного объема работы в k -м отделе;

б) компонентами ресурсного обеспечения, которые носят многоканальный характер

$$\sum_{j=1}^J b_{gj}x_j \leq B_g, g = \overline{1, G}. \quad (15)$$

В этом выражении b_{gj} рассматривается для j -го вида деятельности организации как значение коэффициента использования g -го ресурса; B_g рассматривается как величина суммы залога, которая ожидается по g -му ресурсу. При ресурсном обеспечении $B_g, g = \overline{1, G}$, которое является многоканальным, а также при загрузке киберфизической системы $D_k, k = \overline{1, K}$ в подразделениях поведение носит стохастический характер. В связи с этим для ограничений (14), (15) учитывается вероятностный характер:

$$P\left(\sum_{j=1}^J d_{kj}x_j \leq \tilde{D}_k\right) \geq P_k^*, k = \overline{1, K},$$

$$P\left(\sum_{j=1}^J b_{gj}x_j \leq \tilde{B}_g\right) \geq P_g^*, g = \overline{1, G}. \quad (16)$$

В указанном выражении при выполнении ограничения P^* задано значение вероятности. Можно использовать детерминированные ограничения (14), (15) вместо (16) при наличии закона распределения случайных величин. Также необходимо составить план распределения ресурсов между видами деятельности в киберфизической системе организации $x_j^{nn}, j = \overline{1, J}$. Есть альтернативные варианты для тех ресурсов, которые планируются:

$$x_{jm}^{nn}, m = \overline{1, M}, j = \overline{1, J}, x_j \geq x_{jm}^{nn}, j = \overline{1, J}. \quad (17)$$

В этом выражении m рассматривается как количество таких альтернатив, которые будут возможны. Укажем альтернативную переменную z_m ($m = \overline{1, M}$), которая будет соответствовать m -му варианту в тех ресурсах, которые будут планироваться

$$z_m = \begin{cases} 1, & \text{if we choose the } m\text{-th option of plan;} \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases} \quad m = \overline{1, M}.$$

Если учесть целевую функцию (13), а также ограничения (14), (15), (16), то оптимизационная модель при задании m -го варианта будет представлена следующим образом

$$\sum_{j=1}^J c_j x_j \rightarrow \max, \sum_{j=1}^J d_{kj} x_j \leq D_k, k = \overline{1, K},$$

$$\sum_{j=1}^J b_{gj} x_j \leq B_g,$$

$$g = \overline{1, G}, x_j \geq x_{jm}^{nn}, j = \overline{1, J}. \quad (18)$$

Задача оптимизации (18) рассматривается с точки зрения подхода, использующего линейное программирование. Выполним процесс замены переменных

$$x'_j = x_j - x_{jm}^{nn}, j = \overline{1, J}.$$

Затем перейдем от обозначения (18) к такому представлению:

$$\sum_{j=1}^J c_j x'_j \rightarrow \max, \sum_{j=1}^J d_{kj} x'_j \leq D'_k, k = \overline{1, K},$$

$$\sum_{j=1}^J b_{gj} x'_j \leq B'_g, g = \overline{1, G}, x'_j \geq 0, j = \overline{1, J}. \quad (19)$$

В указанном выражении есть определенные ограничения:

$$D'_k = D_k - \sum_{j=1}^J d_{kj} x_{jm}^{nn}, k = \overline{1, K},$$

$$B'_g = B_g - \sum_{j=1}^J b_{gj} x_{jm}^{nn}, g = \overline{1, G}. \quad (20)$$

В них замечено, что правые части будут зависеть от x_{jm}^{nn} . Мы можем переписать, используя альтернативную переменную z_m :

$$D'_k = f_k(z_m), B'_g = f_g(z_m). \quad (21)$$

Будем считать, что в (20) $D'_k \geq 0, B'_g \geq 0$. Затем мы рассмотрим двойственную задачу линейного программирования:

$$\sum_{k=1}^K D'_k y_k + \sum_{g=1}^G B'_g y_g \rightarrow \min, \quad k_j \leq y_k \leq g_j, \quad k = \overline{1, K}, g = \overline{1, G}.$$

$$\sum_{k=1}^K d_{kj}y_k + \sum_{g=1}^G b_{gj}y_g \geq c_j, j = \overline{1, J},$$

$$y_k \geq 0, k = \overline{1, K}, y_g \geq 0, g = \overline{1, G}. \quad (22)$$

В этой задаче y_k показывает, насколько избыточна мощность информационной системы, y_g показывает, насколько избыточно предоставление ресурсов. В этом случае требуется осуществить запланированный вариант $x_{jm}, j = \overline{1, J}$. Можно говорить об избыточности соответствующего ресурса по сравнению с другими ресурсами, когда в двойственных переменных их оптимальное значение близко к нулю. В этой связи максимальное значение в целевой функции, относящейся к задаче (22) по набору переменных $z_m, m = \overline{1, M}$, приводит к рациональному балансу возможностей информационной системы организации и ресурсов

$$\sum_{k=1}^K f_k(z_m)y_k^* + \sum_{g=1}^G f_g(z_m)y_g^* \rightarrow \max_{z_m},$$

$$z_m = \begin{cases} 1, & m = \overline{1, M}. \end{cases} \quad (23)$$

Метод вариационного моделирования позволяет осуществить по распределению ресурсов рациональный выбор варианта на основе многоканального подхода на основе (23). В этом случае задача решается

со значением Z_m для каждого из шагов, на которых осуществляется поиск в задачах (19), (22). Для осуществления процесса окончательного распределения ресурсов может использоваться экспертная информация, в которой учитывается мнение руководства организации.

Результаты исследования и их обсуждение

Были построены регрессионные модели для того, чтобы проводить математическое описание того, какими будут статистические зависимости по каждой из пар показателей. Описать существующие отношения можно на их основе. Было проведено построение моделей. В ходе рассмотрения они были разных типов: логистические, S-кривые, линейные, дважды обратные, экспоненциальные, обратные по X (Y), логарифмические по X , мультипликативные, квадратные по X (Y). В качестве оптимальной считалась такая модель, для которой получался максимальный коэффициент детерминации (R^2), а также минимальная средняя ошибка. В таблице мы привели полученные модели.

Заключение

В работе рассмотрены возможности работы киберфизических систем, которые могут функционировать в различных организациях. Даны предложения по оптимизации многоканальной системы ресурсного обеспечения организации. Показано, каким образом могут распределяться ресурсы. Приведены результаты моделирования.

Регрессионные модели, позволяющие описать взаимосвязь показателей, характеризующих состояние киберфизической системы, с результатами деятельности организации

Независимые переменные (X)	Зависимые переменные (Y)	
	Число переданных сообщений	Объемы информации, требующие повторной обработки
Общая нагрузка оборудования	$Y = 1/(0,001153 + 0,000013 * X)$	$Y = 1/(0,0498 - 0,0035 * X)$
Деятельность по обслуживанию оборудования	$Y = 259,851 + 46956,5/X$	$Y = 1/(-0,0238 + 0,000484 * X)$
Занятость рабочего места в течение года	$Y = 219,853 + 144657/X$	$Y = 572,151 - 93,5932 * \ln X$

Независимые переменные (X)	Зависимые переменные (Y)	
	Объемы новой информации	Потери информации
Общая нагрузка оборудования	$Y = -0,6803 + 77,6279/X$	$Y = 1/(0,2930 - 1,3119/X)$
Деятельность по обслуживанию оборудования	$Y = -11,7182 + 0,227449 * X$	$Y = -17,2573 + 2356,28/X$
Занятость рабочего места в течение года	$Y = 1/(-0,0095 + 33,6416/X)$	$Y = -16,0162 + 6445,45/X$

Список литературы

1. Preobrazhenskiy Yu.P., Azer K.M.V., Dzhumageldiev D. Some characteristics of computer networks // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2022. № 1 (40). С. 86–88.
2. Львович Я.Е., Преображенский А.П., Преображенский Ю.П. Киберфизические системы – основные направления развития // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2022. № 2 (41). С. 90–92.
3. Кудж С.А., Цветков В.Я. Сетевое управление и киберфизические процессы // Образовательные ресурсы и технологии. 2017. № 2. С. 86–92.
4. Гузаиров М.Б., Гвоздев В.Е., Бежаева О.Я., Курунова Р.Р., Насырова Р.А. Информационная поддержка проактивного управления функциональной безопасностью компонентов киберфизических систем // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2020. Т. 8. № 2 (29).
5. Смирнов А.В., Кашевник А.М., Михайлов С.А., Миронов М.Д. Многоуровневая самоорганизация ресурсов киберфизической системы: контекстно-ориентированный подход и реализация // Искусственный интеллект и принятие решений. 2015. № 4. С. 3–11.
6. Preobrazhenskiy Yu.P., Chuprinskaya Yu.L., Ruzhicky E. The problems of process control in computer systems // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2022. № 1 (40). С. 92–94.
7. Митряева О.Е., Печейкина М.А., Раков Д.Л. Математическое моделирование комплексных киберфизических систем // Journal of Advanced Research in Technical Science. 2021. № 26. С. 66–69.
8. Мельникова Т.В., Питолин М.В., Преображенский Ю.П. Моделирование обработки больших массивов данных в распределенных информационно-телекоммуникационных системах // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2022. Т. 10. № 1 (36).
9. Pitolin M.V., Preobrazhenskiy Yu.P. Management of distributed energy systems on the basis of optimization methods and expert approaches. Modeling, Optimization and Information Technology. 2020. Т. 8. № 1 (28).
10. Львович К.И., Преображенский Ю.П. Алгоритмизация принятия решений при управлении образовательной системой дуального обучения персонала инфокоммуникационных комплексов // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2020. Т. 8. № 2 (29).
11. Вагаманюк И.В., Яковлев Р.Н. Алгоритмическая модель распределенной системы корпоративного информирования в рамках киберфизической системы организации // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2019. Т. 7. № 4 (27). С. 32–33.
12. Зайцева И.В., Малафеев О.А., Казначеева О.Х., Шлаев Д.В., Демчук А.А. Управление процессом оптимизации распределения ресурсов методами математического моделирования // Перспективы науки. 2020. № 12 (135). С. 84–88.