

Система показателей результативности функционирования производственной системы с переменными параметрами элементов

System of performance indicators of the functioning of the production system with variable parameters of the elements

doi 10.26310/2071-3010.2022.281.3.010



А. Г. Сайбель,
д. т. н., доцент, профессор
научно-образовательного центра
✉ a.saybel@goz.ru

A. G. Saybel,
Doctor of Technical Sciences,
Associate Professor, Professor of the
Scientific and Educational Center



О. С. Потоцкая,
сотрудник научно-образовательного центра
✉ o.pototskaya@goz.ru

O. S. Pototskaya,
Employee of the Scientific and Educational Center

Акционерное общество «Северо-Западный региональный центр Концерна ВКО «Алмаз — Антей» — Обуховский завод»

Scientific and Educational Center, Joint-Stock Company “North-Western Regional Center of the Concern East Kazakhstan Almaz-Antey” — Obukhov Plant.

Сформулирована задача оценивания целесообразности внедрения инноваций на предприятии как поиск компромисса между элементами кортежа целей, включающих достижение максимума функциональной оптимальности и экономическую рациональность. Рассмотрена общая постановка задачи оценивания качества результатов процесса функционирования целеустремленной системы. Представлена группа частных показателей качества результатов, на основе которых предложен показатель эффективности процесса функционирования. Приведен подход к вычислению вероятностных характеристик параметров исследуемого процесса.

The task of evaluating the feasibility of introducing innovations at an enterprise is formulated as a search for a compromise between the elements of a tuple of goals, including the achievement of a maximum of functional optimality and economic rationality. The general statement of the problem of evaluating the quality of the results of the process of functioning of a purposeful system is considered. A group of partial indicators of the quality of results is presented, on the basis of which an indicator of the effectiveness of the functioning process is proposed. An approach to calculating the probabilistic characteristics of the parameters of the process under study is given.

Ключевые слова: внедрение инноваций, наукоемкое предприятие, объективированный показатель, результативность.

Keywords: introduction of innovations, knowledge-intensive enterprise, objectified indicator, effectiveness.

Введение

В рамках современной парадигмы наукоемкого предприятия превалирует точка зрения позитивного восприятия инновационной составляющей процесса его эволюции. Рациональность такого взгляда на прикладную полезность нововведений базируется на сложившемся в рамках современной научной экономической теории представлении о позитивном влиянии уровня развития организационной структуры предприятия на его финансовую успешность. При этом в рамках указанного подхода эконометрические модели процессов развития не содержат фиксированных границ области допустимых значений целевой функции. То есть в качестве исходного применяется допущение, что нет предела совершенству.

Если данное допущение исключить из исходной аксиоматики, то базовым становится положение, в основе которого лежит гипотеза о существовании некоего идеала, движение к которому обеспечивает асимптотический рост эффективности функционирования к максимальному значению совокупного показателя.

В рамках такой модели развития целесообразной становится постановка оптимизационной задачи, решение которой обеспечит получение значений управляемых параметров, при которых дальнейшее совершенствование процессов функционирования предприятия становится экономически нецелесообразным, что обуславливается принципом Парето, определяющим нелинейный характер роста затрат на достижение прироста целевого эффекта.

Сложность постановки и решения указанной оптимизационной задачи определяется низкой формализуемостью полной совокупности процессов, составляющих метапроцесс деятельностного функционирования предприятия во взаимодействии с окружением, функциональными дополнениями и окружающей средой, каждый из которых характеризуется нелинейной динамикой и высокой неопределенностью.

Для всестороннего изучения таких объектов используются современные комплексные модели, опирающиеся как на формально-эвристические подходы к их построению, так и на экспертно-интуитивные, сложность которых приближается к сложности реального мира, что, в свою очередь, требует создания новой «мультисетевой» организационно-управленческой модели для науки, экономики и управления, а также связывающей их инновационной экосистемы [1].

Стохастическая природа исследуемого объекта предъявляет специфические требования к системе показателей качества, используемых при его моделировании и прогнозировании поведения.

Целью выполненного исследования является формирование взаимовязанной системы показателей качества параметрически заданной динамической стохастической системы, функционирующей в условиях внешних случайных воздействий с заданными статистическими характеристиками. Такая система показателей является необходимым элементом методики параметрического синтеза оптимальной структуры целеустремленной организационно-технической си-

стемы на основе анализа эффективности ее целенаправленного применения.

1. Модель и показатели качества функционирования структурно сложной системы

Рассмотрим состоящую из n элементов систему, предназначенную для целенаправленного преобразования доступного ресурса в заданный целевой эффект, которую можно представить как систему массового обслуживания, выполняющую удовлетворение поступающих на ее вход требований, при этом параметры элементов системы являются квазидетерминированными функциями времени, а качество результатов функционально связано с параметрами требований и взаимным расположением элементов системы в пространстве значений параметров.

Пусть результат функционирования считается удовлетворительным, если его качество (разность максимально достижимого и полученного результатов) не превышает порогового значения R_T , задаваемого исходя из практических соображений.

При фиксированных параметрах системы и единичного требования результат процесса функционирования (ПФ) системы характеризуется показателем качества R_p , имеющим метрологическую аналогию в виде отклонения полученной оценки вектора измеряемых параметров от его истинного значения, рассмотренного в качестве показателя качества измерительной системы в [2].

Если значения параметров требований равномерно распределены в ограниченной области пространства, то при оценивании качества результатов функционирования системы для заданного момента времени в роли интегрального показателя качества удобно использовать коэффициент $k(R_T)$, численно равный отношению объема области параметров требований, при которых R_p не превышает заданного значения R_T , к объему всей области параметров требований

$$k(R_T) = V(R_p < R_T) / V_\Sigma,$$

где $V_p = V(R_p < R_T)$ — объем рабочей области системы, V_Σ — объем области обслуживания.

В большинстве практических случаев аналитически получить функцию связи значения показателя качества результатов ПФ системы и влияющих на него величин не представляется возможным в силу сложной зависимости нелинейного характера. Поэтому, оценить значение $k(R_T)$ удобно на основе метода Монте-Карло, рассчитав значения R_T для множества дискретных точек области параметров требований, и разделив число точек, для которых выполняется условие критерия пригодности [3]

$$G: (R_p^{(i)} \in \{R_p^n\}) = U,$$

где $\{R_p^n\}$ — область допустимых значений качества результатов,

U — достоверное событие,

на общее число дискрет счета n в соответствии с выражением

$$\tilde{k}(R_T) = \sum_{i=1}^n I_A(R_p^{(i)}) / n,$$

где $I_A(R_p^{(i)})$ — индикатор множества $A = \{R_p^n\}$,

$$I_A(R_p^{(i)}) = \begin{cases} 1, & R_p^{(i)} \in A \\ 0, & R_p^{(i)} \notin A \end{cases}.$$

При максимальной априорной параметрической неопределенности

$$\lim_{n \rightarrow \infty} (\tilde{k}(R_T)) = k(R_T).$$

Асимптотическая состоятельность оценки позволяет выполнить обоснование практически целесообразного значения n на основе анализа формы графика зависимости точности оценки $\tilde{k}(n)$.

Показатель $k(R_T)$ позволяет оценить качество результатов ПФ при заданных параметрах системы и условии равномерного распределения параметров требований по области возможных значений и может быть интерпретирован как вероятность достижения цели ПФ при фиксированном взаимном расположении элементов системы в m -мерном пространстве значений параметров, т. е. как мгновенная результативность целенаправленного функционирования системы.

Введенные в рассмотрение частные показатели качества позволяют апостериорно оценить точность определения параметров требования (показатель R_p) и оценить вероятность обслуживания случайного требования с заданным качеством при фиксированной конфигурации элементов системы в пространстве параметров (показатель k). Однако в [3] показано, что эффективность операции целесообразно оценивать не на основе частных показателей, а по степени явной возможности выполнения той основной задачи, ради которой эта операция производится, и предложен удовлетворяющий всем перечисленным требованиям показатель эффективности $R_{\text{дл}}$, терминологически определенный как вероятность достижения цели операции.

Содержательно цель операции заключается в получении требуемых результатов, соответствующих цели операции, что формально означает выполнение условия

$$G_{\text{цп}}: (Y_{(t)} \in \{Y_{(t)}^o\}) \approx U,$$

где $Y_{(t)}$ — вектор, описывающий качество результатов операции,

$Y_{(t)}^o$ — вектор допустимых значений результатов операции.

Показатель $Y_{(t)}$ качества результатов целенаправленного процесса должен определяться в канонической форме и включать в себя три группы компонент — три аспекта, характеризующих соответственно виртуальные целевые эффекты операции, затраты ресурсов и затраты времени.

Пусть качество результатов исследуемого процесса описывается вектором $Y_{(3)} = \langle y_1, y_2, y_3 \rangle$, каждая из компонент которого зависит от характеристик системы и процесса ее функционирования (от их параметров и эксплуатационно-технических характеристик (ЭТХ)), условий функционирования системы, а также от организации процесса ее функционирования.

Для сложных технических систем типичной является ситуация, когда на их ЭТХ и параметры, на условия их функционирования и применения, а также

на параметры и ЭТХ процесса функционирования воздействует целый ряд априори неизвестных, а потому случайных факторов. Поэтому до проведения операции вектор $Y_{(3)}$ оказывается случайным.

В условиях априорной ситуационной неопределенности рассматриваемого процесса моменты поступления требований и их параметры оказываются случайными, в результате чего успешность целенаправленного ПФ системы есть случайное событие. Поэтому мерой степени достижения его цели, т.е. показателем его эффективности, может служить вероятность достижения цели, определяемая соотношением

$$P_{\text{дц}} = P[(\hat{y}_1 \geq y_1^o) \cap (\hat{y}_2 \leq y_2^o) \cap (\hat{y}_3 \leq y_3^o)], \quad (1)$$

где \hat{y}_1 и y_1^o – возможный и требуемый целевой эффект;

\hat{y}_2 и y_2^o – возможные и предельно допустимые затраты активных ресурсов на достижение эффекта \hat{y}_1 ;

\hat{y}_3 и y_3^o – возможные и директивные затраты времени на достижение эффекта \hat{y}_1 .

В рационально устроенных системах выделяются две закономерности:

– на операцию расходуются все отпущенные активные ресурсы $(\hat{y}_2 \geq y_2^o) \approx (\hat{y}_2 = y_2^o) \approx U$,

– время выполнения операции достаточно жестко определяется технической реализацией осуществляющих ее элементов системы $(\hat{y}_3 \geq y_3^o) \approx (\hat{y}_3 = y_3^o) \approx U$, и, следовательно, выражение (1) можно записать в виде

$$P_{\text{дц}} \approx P(\hat{y}_1 \geq y_1^o).$$

Будем полагать, что условия применения системы корректно описываются стационарным случайным процессом, характер которого учтен показателем качества k , интерпретируемым как мгновенная эффективность целенаправленного функционирования системы. Однако параметры элементов системы являются функциями времени, а момент времени поступления требования на обслуживание априорно неизвестен. Следовательно, взаимное расположение элементов системы в пространстве параметров является случайным и определяется J векторами параметров элементов

$$\hat{X}_{(m)}^{(i)} = X_{(m)}^{(i)}(\hat{t}), \quad i=1..J.$$

При отсутствии особых требований, эффективность процесса функционирования системы целесообразно характеризовать средним значением вероятности достижения цели с заданным качеством на интервале функционирования

$$P_{\text{дц}} = M[k(R_T)] = M[k(R_T, \hat{t})] = M[k(R_T, (\hat{X}_{(3)}^{(i)})_{(n)})], \quad (2)$$

Проиллюстрируем методику вычисления принятого показателя на упрощенном частном примере.

2. Частные примеры реализации методики

Пусть система состоит из двух элементов Э₁ и Э₂, модели динамики которых подчиняются гармоническим законам:

$$X_{(3)}^{(i)}(t) = h_i(t) M_{[3]}^{(i)}(t) N_{[3]}^{(i)} I_{(3)}, \quad i=1,2,$$

где h_i – модуль вектора положения i -го элемента $X_{(3)}^{(i)}$,

$$M_{[3]}^{(i)}(t) = \begin{vmatrix} \cos(\omega_i(t) \cdot t) & 0 & 0 \\ 0 & \sin(\omega_i(t) \cdot t) & 0 \\ 0 & 0 & \sin(\omega_i(t) \cdot t) \end{vmatrix}$$

– матрица движения,

$$N_{[3]}^{(i)} = \begin{vmatrix} \cos(\mu_i) & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\mu_i) & 0 \\ 0 & 0 & \sin(\mu_i) \end{vmatrix} \text{ – матрица положения,}$$

$I_{(3)}$ – единичный вектор,

а параметры поступающих на обслуживание требований удовлетворяют условиям:

$$\begin{cases} |X_{(3)}| = R \\ \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} \leq \sqrt{h_i^2(t) - R^2}, \quad i=1,2. \end{cases} \quad (3)$$

Выбор гармонического вида закона, описывающего динамику объекта, с одной стороны, позволяет в наглядной и достаточно простой форме проиллюстрировать разрабатываемую методику, а с другой – показать потенциал предлагаемого подхода, основываясь на возможности определить произвольный вид функции движения как суммы гармонических компонент на основе представления в базисе Фурье.

Тогда взаимное расположение элементов системы на момент выполнения операции однозначно характеризуется модулями h_i векторов $X_{(3)}^{(i)} \equiv \langle x_i, y_i, z_i \rangle$, $i=1,2$ и нормированным значением арккосинуса α их скалярного произведения. Поэтому выражение (2) можно переписать в виде

$$P_{\text{дц}} = M[k(R_T, \hat{X}_{(m)}^{(1)}, \hat{X}_{(m)}^{(2)})] = M[k(R_T, \hat{h}_1, \hat{h}_2, \hat{\alpha})],$$

где $\hat{h}_i = h_i(\hat{t})$, $i=1,2$.

Рассмотрим последовательно два случая.

1) При заданных $h_i = const$, $i=1,2$ взаимное расположение элементов однозначно характеризуется величиной угла α между векторами их положения $\alpha(t) = \arccos(\cos(\omega_1 t) \cos(\omega_2 t) + \sin(\omega_1 t) \sin(\omega_2 t) \cos(\Delta\mu))$, где ω_1, ω_2 – угловые скорости Э1 и Э2,

$\Delta\mu$ – угол между плоскостями движения Э1 и Э2.

Закон распределения плотности вероятности значения угла $\hat{\alpha} = \alpha(\hat{t})$ при $h_1 \neq h_2$ имеет симметричный бимодальный характер [2] (см. рисунок 1) и характеристики:

$$Mo_1[\hat{\alpha}] = \Delta\mu, \quad Mo_2[\hat{\alpha}] = \pi - \Delta\mu.$$

Поскольку при $\alpha > \alpha_{\max}$ условие (3) не выполняется, то целесообразно использовать усеченный закон распределения вероятности значения угла $\hat{\alpha} \in [0, \alpha_{\max}]$.

Поскольку в случайный момент времени значение α есть случайная величина, то

$$P_{\text{дц}} = M[k(R_T, \hat{\alpha})].$$

Для вычисления значения показателя эффективности удобно использовать обладающий большой наглядностью способ определение функции распределения (ФР) немонотонной функции случайного

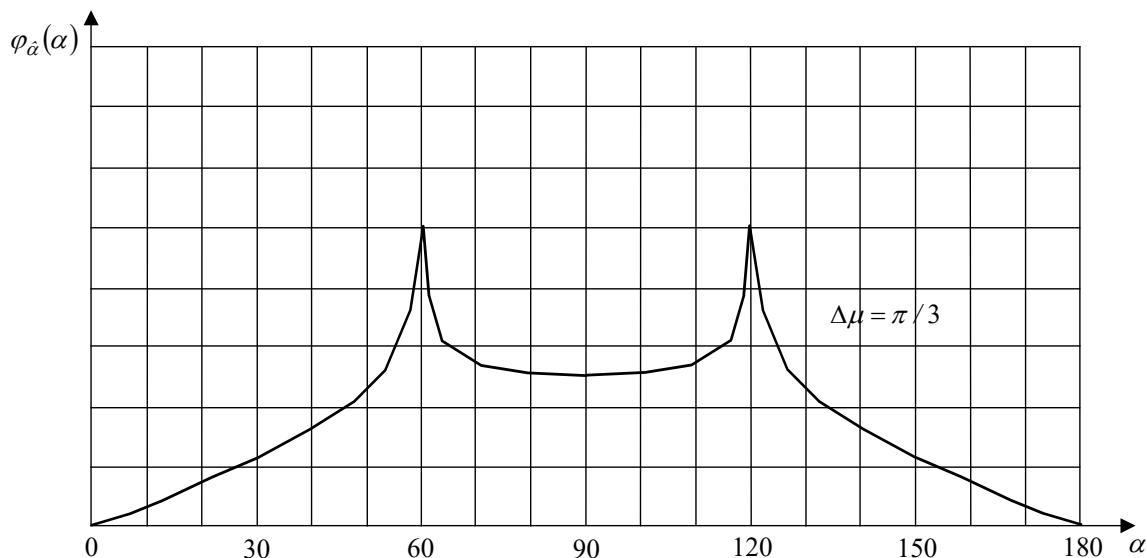


Рисунок 1. Закон распределения угла между векторами положения подвижных элементов динамической системы

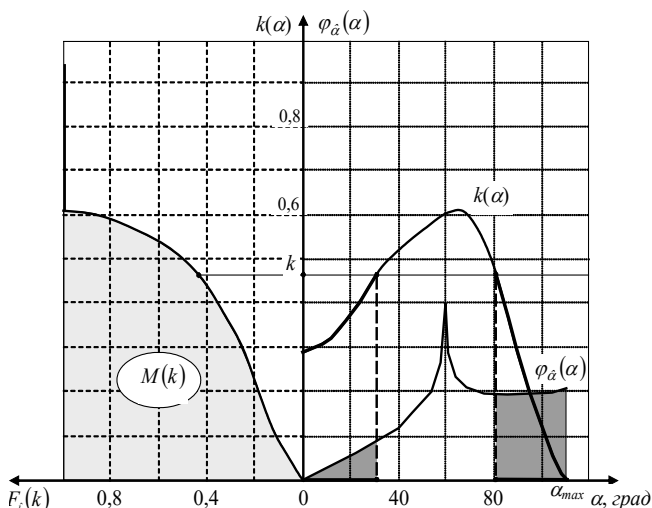


Рисунок 2. Иллюстрация к способу определению ФР немонотонной функции случайного аргумента

аргумента [4]: для определения ФР $F_k(k)$ на уровне k фиксируется прямая, параллельная оси $O\alpha$, и отмечаются участки кривой $\hat{k} = k(\hat{\alpha})$, для которых выполняется условие $\hat{k} < k$. На рисунке 2 эти участки выделены жирной линией. Им соответствуют отрезки оси абсцисс $\Delta_1(\alpha), \Delta_2(\alpha)$ также выделенные жирной линией. Событие $\hat{k} < k$ происходит при попадании случайной величины $\hat{\alpha}$ на любой из непересекающихся отрезков $\Delta_1(\alpha), \Delta_2(\alpha), \dots$. Поэтому

$$F_k(k) = P(\hat{k} < k) = \sum_{j \in J_k} P(\hat{\alpha} \in \Delta_j(k)),$$

где J_k — множество отрезков, на которых выполняется условие $\hat{k} < k$.

Таким образом ФР случайной величины \hat{k} определяется по формуле

$$F_k(\gamma) = \sum_{j \in J_\gamma} \int_{\Delta_j(\gamma)} \varphi_{\hat{\alpha}}(\alpha) d\alpha.$$

2) При условии

$$\begin{cases} h_1 = const \\ h_2 = var \end{cases}$$

взаимное расположение Э1 и Э2 в произвольный момент времени является случайным не только из-за неопределенности величины угла $\hat{\alpha} = \alpha(\hat{t})$, но и из-за неопределенности значения $\hat{h}_2 = h_2(\hat{t})$, т.е. $\hat{k} = k(\hat{\alpha}, \hat{h}_2)$ и, следовательно,

$$P_{дц} = M \left[k(R_T, \hat{\xi}_{(2)}) \right],$$

где $\hat{\xi}_{(2)} = (\hat{\alpha}, \hat{h}_2)$.

Полученные на основе статистического моделирования закон распределения $\varphi_{\hat{\xi}_{(2)}}(\xi_{<2>})$ и зависимость $k(\alpha, h_2)$ являются исходными данными для формирования ФР $F_k(k)$.

Расчитанные ФР позволяют вычислить математическое ожидание случайной величины \hat{k} , и, следовательно, значение показателя эффективности исследуемого процесса

$$P_{дц} = M[\hat{k}] = \int_0^1 (1 - F_k(k)) dk.$$

Показатель $P_{дц}$ может быть использован при анализе эффективности процесса целенаправленного функционирования произвольной системы, реализующей заданную последовательность операций, а также при сравнении различных вариантов в рамках методик структурного и параметрического синтеза систем. Дальнейшее усложнение модели функционирования повышает размерность решаемой задачи и затрудняет поиск наглядных форм иллюстрации промежуточных результатов вычислений, положительно влияющих на понимание содержательной части моделируемых процессов, но не исключает возможность применения предложенной системы показателей.

Заклучение

Сформулированная задача оценивания целесообразности внедрения инноваций на предприятии как поиск компромисса между элементами кортежа целей, включающих достижение максимума функциональной оптимальности и экономическую рациональность, имеет прикладное значение в условиях жестких ограничений на доступные ресурсы.

Рассмотренная общая постановка задачи оценивания качества результатов процесса функционирования целеустремленной системы призвана внести вклад в теорию моделирования, развиваемую в рамках исследований в области организации производства применительно к наукоемким предприятиям.

Представленная группа частных показателей качества результатов, на основе которых предложен показатель эффективности процесса функциониро-

вания, в своей основе имеет значительный потенциал развития по причине опоры на характеристики, представленные в виде индикаторов и супериндикаторов. Такой подход обеспечивает универсальность применимости при решении прикладных задач выбора наилучших решений в ситуации, когда информация, получаемая от экспертов или лиц, принимающих решение, и используемая в процессе принятия решений, часто носит субъективный, а значит, нечеткий характер. Обычно подобные модели основаны на теории нечетких множеств и отношений. Так, в [5] был предложен вариант принципа Эджворта-Парето для случая, когда отношение предпочтения является нечетким.

Приведенные примеры вычислительных алгоритмов вероятностных характеристик параметров исследуемого процесса позволяют верифицировать применимость выбранного методического подхода к решаемой задаче.

Список использованных источников

1. Ворожихин В. В. О становлении новой парадигмы инновационных систем//Инновации. — № 12. — 2021. — С. 34–46.
2. Атакищев О. А. и др. Основные показатели результативности процесса функционирования измерительной системы с переменными параметрами элементов//Телекоммуникации. — 2004. — № 7. — С. 2–5.
3. Петухов Г. Б. Основы теории эффективности целенаправленных процессов. Часть 1. — МО СССР, 1989. — 660 с.
4. Иоффе А. Я. и др. Вероятностные методы в прикладной кибернетике/Под ред. Р. М. Юсупова — Л.: ВИКИ, 1976. — 424 с.
5. Ногин В. Д. Принцип Эджворта-Парето в терминах нечеткой функции выбора//Журнал вычислительной математики и математической физики. — 2006. — Том 46, № 4. — С. 583–592.

References

1. Vorozhikhin V. V. On the formation of a new paradigm of innovative systems//Innovations. — No. 12. — 2021. — P.34–46.
2. Atakishev O. A. et al. The main indicators of the effectiveness of the process of functioning of the measuring system with variable parameters of elements//Telecommunications. — 2004. — No. 7. — P.2–5.
3. Petukhov G. B. Fundamentals of the theory of efficiency of purposeful processes. Part 1. — USSR Ministry of Defense, 1989. — 660 p.
4. Ioffe A. Ya. Probabilistic Methods in Applied Cybernetics/Ed. R. M. Yusupova — L.: VIKI, 1976. — 424 p.
5. Nogin V. D. The Edgeworth-Pareto Principle in Terms of a Fuzzy Choice Function//Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics. — 2006. — Volume 46, No. 4. — P.583–592.