

Ю. С. РУДЬ, д-р техн. наук, проф., В. Ю. БЕЛОНОЖКО, ст. преподаватель
Криворожский национальный университет

ОБОСНОВАНИЕ КРИТЕРИЯ И РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОЦЕНКИ СЛОЖНОСТИ СТРУКТУРЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА СТАДИИ ИХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Важной проблемой, возникающей при анализе вариантов технологических систем, является оценка их сложности, так как сложность структуры разных систем, при выполнении ими одинаковых функций, связана с целым рядом технических, эксплуатационных, экономических и других важных качеств. При разработке технологических систем возникает задача выбора из нескольких возможных систем такой, которая при наименьших затратах обеспечивает получение заданного эффекта.

Целью статьи является разработка метода оценки сложности структуры технологических систем при помощи комплексного показателя. Метод должен обладать достаточной точностью и обеспечивать получение достоверной и объективной количественной оценки сложности структуры, быть интуитивно приемлемым и пригодным для практических исследований.

Научной новизной предложенного метода является то, что при оценке сложности структуры учитывается число элементов технологической системы, число связей между элементами, число связей между элементами и внешней средой, а также иерархический уровень элементов в системе.

Практическая значимость разработанного авторами метода состоит в том, что он позволяет решить задачу количественной оценки сложности структуры технологических систем различного функционального назначения, обеспечивает возможность выполнения научно обоснованного выбора оптимального варианта структуры технологической системы, позволяет вести обработку информации о системах на ЭВМ.

Предложенный в работе показатель относительной сложности структуры технологических систем характеризует совершенство структуры системы, показывает степень рациональности использования элементов в структуре. Использование показателя относительной сложности структуры обеспечивает обоснованность и корректность при сравнении технологических систем, состоящих из разного количества элементов, имеющих разное число связей между элементами и внешней средой, а также разные иерархические уровни элементов.

Проведена апробация разработанного метода на примере систем технологического оборудования агломерационных фабрик Криворожского железорудного бассейна. Показано, что в реальных технологических системах усложнение структуры происходит в основном за счет последовательных включений дополнительного оборудования, что нельзя считать обоснованным.

Ключевые слова: технологические системы, сложность структуры технологических систем, иерархический уровень элемента, агломерационные фабрики.

doi: 10.31721/2306-5435-2018-1-104-87-92

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Важнейшей народно-хозяйственной проблемой является проектирование сложных технологических систем различного функционального назначения – промышленных комплексов для добычи и переработки полезных ископаемых, для производства транспортных средств, машин и оборудования для горной и нефтегазовой промышленности и др. Стадии проектирования технологических систем регламентированы стандартами [ГОСТ 2.103-2013](#) и [ГОСТ 15.201-2000](#) [1-2]. Технологические системы современных промышленных предприятий относятся к классу сложных систем. Целью создания любой технической системы является обеспечение получения максимального результата ее функционирования, а эффективностью ее создания – степень соответствия этого результата поставленной цели проектирования [3]. При разработке технологических систем возникает задача выбора из нескольких возможных такой, которая при наименьших затратах обеспечивает получение максимального эффекта. Важной проблемой, возникающей при этом, является оценка их сложности, так как сложность разных систем, при выполнении ими одинаковых функций, связана с целым рядом технических, эксплуатационных, экономических и других важных качеств. При выборе из двух идентичных технологических систем обычно выбирают менее сложную, поэтому сложность должна иметь количественную оценку. Как отмечается в работе [4] показатель сложности является системным параметром.

Таким образом, возникает актуальная задача выбора или разработки объективного количественного критерия для оценки сложности структуры технологических систем на стадии их проектирования.

Анализ исследований и публикаций. Как отмечается в работе [5], формализация является одним из наиболее трудных задач при всех попытках математического описания сложности

структуры систем. Системам, которые используются в промышленности, присущи многие характерные свойства «сложности»: большое число элементов, из которых состоит система; многообразие возможных форм связей между собой; сложное функционирование; иерархичность структуры и т. п.

К настоящему времени формализация понятия сложности получено для достаточно простых классов управляющих систем [6, 8]. Авторы работы [9] пишут: "Современные сложные системы характеризуются не только большим числом элементов, но главным образом сложностью внутренней структуры - обратными связями, различного рода избыточностями и т.п. В связи с этим сложность современных систем нужно рассматривать не как чисто количественное увеличение комплектующих сложную систему элементов, а как новое качественное свойство, присущее этим сложным системам" Понятие сложности по-разному конкретизируется в различных предметных областях. В работе [10] при определении меры сложности системы выделяются инвариантные свойства системы или информационные инварианты, и вводится мера сложности систем на основе их описания. При этом мера сложности или функция $\mu(S)$ задана на некотором множестве элементов и подсистем системы S . Возможны различные способы определения сложности структуры систем. Сложность структуры, можно определять топологической энтропией — сложностью конфигурации структуры системы

$$S = k \cdot \ln(W), \quad (1)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-16}$ (эрг/град) – постоянная Больцмана; W – вероятность состояния системы.

Как отмечает сам автор, определение меры сложности для систем различной структуры при помощи данного метода не может быть однозначным, а часто даже определенным.

Автор статьи [11] считает, что сложность системы должна зависеть от ее структуры, однако количество элементов и связей прямо не влияют на сложность системы. Возможно, он прав тогда, когда рассматриваются сложные электронные системы, которые обладают некоторой неопределенностью. Предлагается сложность C системы S оценивать затратами E , временем T , сложностью методов M и степенью соответствия A по формуле

$$C = \langle T, E, M, A \rangle, \quad (2)$$

где $T [0; \infty]$, $E [0; \infty]$, $M [0; \infty]$, $A [0; 1]$.

Сложность по параметру T определяет время, необходимое для создания системы с затратами E при использовании методов M и достигаемой степени соответствия A . Сложность по параметру E определяет затраты труда, ресурсов, энергии, необходимые для создания системы за время T при использовании методов M и достигаемой степени соответствия A . Сложность по параметру M определяет сложность методов, необходимых для создания системы за время T с затратами E и достигаемой степенью соответствия A .

Авторы работы [12] предлагают оценивать сложность систем субъективно, используя однотипные элементы реальных систем N , некоторые числа S и вспомогательную величину $\alpha = M/N(N-1)$, где M — фактическое число связей в реальной системе.

Тогда сложность системы оценивается количественной величиной

$$S = (1 + v^p \alpha)^n \sum_{i=1}^p S_i k_i, \quad (3)$$

где v — коэффициент, учитывающий сложность связей по сравнению со сложностью элементов; p — число элементов одного класса; k — количество типовых классов элементов.

Преимуществом данного подхода является приоритет влияния на сложность структуры связей. Однако пользоваться приведенной формулой весьма затруднительно, так как субъективные оценки S_i , v и p не позволяют получить однозначные объективные результаты.

В работе [13] сложность систем рекомендуется оценивать степенью влияния случайных факторов, числом непересекающихся системных функций, системными параметрами: количеством элементов, числом связей и иерархических уровней. Для технологических систем последние рекомендации представляются наиболее приемлемыми, так как эта оценка имеет количественное выражение. Однако предлагаемая методика разработана недостаточно глубоко и не пригодна для практического использования в процессе проектирования систем.

Постановка задачи. Следовательно, общепризнанные критерии и методы объективной количественной оценки сложности технологических систем в настоящее время отсутствуют, и их разработка представляет существенный теоретический и практический интерес. Несмотря на важность и актуальность проблемы оценки сложности технологических систем, она не нашла

достаточно полного практического решения ни в одной из отраслей наук. Одним из первых практических решений этой проблемы могут служить результаты исследований, представленных в работе [14].

Изложение материала и результаты. В соответствии с положениями работы [14] для оценки сложности структуры технологических систем предлагается специальный количественный критерий $S(n)$. Критерий сложности структуры $S(n)$ определяется при следующих исходных предпосылках:

1. Элемент системы имеет один "вход" и один "выход". Под входом понимается канал, через который предшествующий элемент системы или внешняя среда воздействуют на данный элемент, изменяя его состояние. Под выходом понимается канал, через который данный элемент воздействует на последующий элемент или внешнюю среду путем изменения своего состояния. 2. Состояние выхода элемента однозначно определяется состоянием его входа. 3. Сложность структуры $S(n)$ единичного элемента равна единице, т.е. $S(1)=1$. 4. Сложность системы, состоящей из n элементов, при $n \rightarrow \infty$ стремится к бесконечности т.е.

$$\lim_{n \rightarrow \infty} S(n) = \infty \quad (4)$$

5. Сложность структуры, $S(n)$ определяется количеством элементов n , числом связей между ними n_c и внешней средой $n_{c.вн.}$, а также иерархическим уровнем I_0 системы.

Логическая реализация исходных предпосылок пп. 1-5 приводит к следующему тождеству, определяющему показатель сложности $S_j(n)$ подсистемы j -го иерархического уровня I_j , которая состоит из n_j элементов

$$S_j(n) \equiv K_1(n_j + n_c + n_{c.вн.})I_j. \quad (5)$$

Так как каждый элемент имеет два канала связи (вход и выход), то общее число связей подсистемы j -го уровня I_j равно

$$n_c + n_{c.вн.} = 2n_j, \quad (6)$$

а показатель сложности $S_j(n)$ в соответствии с выражением (5) определяется как следующее произведение

$$S_j(n) = 3K_1n_jI_j. \quad (7)$$

Так как $S(1)=1$ (см. п. 3 исходных предпосылок), то коэффициент $K_1=1/3$. Следовательно, показатель сложности подсистемы иерархического $S_j(n)$ уровня I_j , равен

$$S_j(n) = n_jI_j. \quad (8)$$

Так как система C_0 образуется из K отдельных подсистем C_j путем агрегации, то найденный показатель сложности $S_j(n)$ должен обладать свойством аддитивности, т.е. для системы должно быть справедливо следующее равенство

$$S(n) = \sum_{j=1}^K S_j(n) = \sum_{j=1}^K n_jI_j. \quad (9)$$

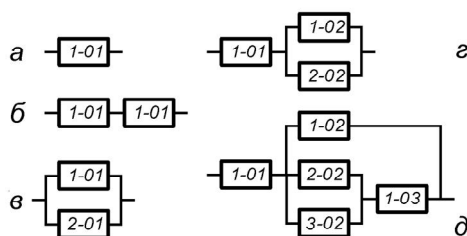


Рис.1. Варианты структуры систем, построенных из одного элемента (а), двух элементов (б, в), трех элементов (з), четырех элементов (д)

В результате анализа различных структур для систем, содержащих $n = 1, 2, \dots$ элементов (рис. 1), выявлено, что при $n = const$ показатель сложности $S(n)$ колеблется в широких пределах в зависимости от количества и характера межэлементных связей. Так, например, для системы, состоящей из трех элементов, в зависимости от структуры показатель сложности $S(n)$ изменяется от 3 до 5 (в 1,7 раза); для системы, состоящей из четырех элементов, - от 4 до 9 (в 2,3 раза) и т.д. Следовательно, при использовании одинакового количества элементов возможно образование систем со структу-

рами различной сложности, которыми можно целенаправленно управлять. Максимальное значение показателя сложности структуры системы $S_{\max}(n)$ определяется при помощи следующего выражения

$$S_{\max}(n) = 0,5n(n+1) - 1, \text{ где } n = 2, 3, \dots \quad (10)$$

По мере усложнения структуры системы за счет включения в работу дополнительных прямых и обратных связей, происходит увеличение функциональных возможностей системы: увеличивается устойчивость функционирования системы, расширяется диапазон допустимых отклонений параметров внешней среды, влияющих на систему, создаются резервные связи и элементы, что приводит к увеличению надежности и эффективности технологических систем.

Предложен также критерий удельной сложности структуры $s(n)$, который представляет собой отношение показателя сложности структуры данной системы $S(n)$ к максимально возможному значению этого показателя $S_{\max}(n)$ системы, имеющей то же число элементов

$$S(n) = s(n) / S_{\max}(n). \quad (11)$$

По критерию удельной сложности структуры $s(n)$ удобно производить сравнение сложности технологических систем, состоящих из различного числа элементов n , исключив тем самым субъективность оценки.

В зависимости от изменений структуры системы, состоящей из n элементов, показатель удельной сложности $s(n)$ является переменным и изменяется в широких пределах. На пример, для системы, состоящей из четырех элементов $n = 4$, для разных структур, показатель удельной сложности $s(4)$ равен значениям 0,444; 0,667; 0,775 0,888; 1,0 при максимально возможном значении показателя сложности $S_{\max}(4) = 9$. Интересно отметить, что для систем, показанных на рисунке б, в, г, д, показатель удельной сложности $s(n) = 1$ соответствует максимально возможному значению показателя сложности $S(2) = 2$, $S(3) = 5$, $S(5) = 9$, что равно максимуму для всех случаев.

Результаты оценки сложности структуры технологических систем агломерационных фабрик [15-18], которые выполнены по предлагаемой методике, приведены в таблице, где во 2-й колонке даны абсолютные значения показателя сложности $S(n)$; в 3-й колонке — удельные значения показателя сложности $s(n) \cdot 10^{-3}$.

Таблица

Показатели сложности структуры технологических систем агломерационных фабрик

Наименование технологической системы	Показатели сложности структуры	
	абсолютные $U(n)$	удельные $u(n) \cdot 10^{-3}$
НКГОК-1	308	25,81
НКГОК-2	276	28,78
НКГОК-2Р	370	21,26
ЮГОК-1, 2	230	33,90

Сравнительный анализ показателей сложности структуры агломерационной фабрики НКГОК-2Р (одна из наиболее сложных технологических систем, $S(186) = 370$) и других систем показывает, что после реконструкции фабрики количество основных элементов системы увеличилось на 27,5% (с 136 до 186). Так как при этом число связей увеличилось незначительно, то удельный показатель сложности системы не только не увеличился, но даже уменьшился на 35,2%. По сравнению с системами НКГОК-1 и ЮГОК-1, 2, количество элементов технологических систем агломерационной фабрики НКГОК-2Р больше соответственно на 17,2%, 37,6%, 26,9%, а сложность — меньше соответственно на 21,3%, 59,3%, 37,2%. Уменьшение сложности системы с большим числом элементов объясняется тем, что сложность реальных систем растет значительно медленнее, чем число составных компонентов.

Выводы и направления дальнейших исследований. Авторами разработан метод оценки сложности структуры технологических систем при помощи комплексного показателя, который учитывает число элементов системы, число связей между элементами, число связей между элементами и внешней средой, а также иерархический уровень элементов в системе. Метод

обладают достаточной точностью, позволяет получить достоверную и объективную количественную оценку сложности структуры, интуитивно приемлем и пригоден для практических исследований. Предложен показатель относительной сложности структуры технологических систем, который характеризует совершенство структуры системы, показывает степень рациональности использования элементов в структуре. Использование показателя относительной сложности структуры обеспечивает обоснованность и корректность при сравнении технологических систем, состоящих из разного количества элементов, имеющих разное число связей между элементами и внешней средой, а также разные иерархические уровни элементов. Проведена апробация разработанного метода на примере систем технологического оборудования агломерационных фабрик Криворожского железорудного бассейна. Показано, что в реальных технологических системах усложнение структуры происходит в основном за счет последовательных включений дополнительного оборудования, что нельзя считать обоснованным. Для увеличения показателя относительной сложности структуры технологических систем рациональным является использование комбинированного последовательно-параллельного включения дополнительного технологического оборудования, при котором обеспечивается высокий иерархический уровень элементов в системе.

Список литературы

1. [ГОСТ 2.103-2013. Единая система конструкторской документации. Стадии разработки.](#)
2. [ГОСТ 15.201-2000. Система разработки и постановки продукции на производство. Продукция производственно-технического назначения. Порядок разработки и постановки продукции на производство.](#)
3. **Кохановский В. А.** Оценка сложности системы [Текст] / В. А. Кохановский, М. Х. Сергеева, М. Г. Комахидзе. - www.donstu.ru/structure/cadre/komakhidze-manana-givievna/.
4. **Мамчур Е. А.,** Овчинников Н. Ф., Уемов А. И. Принцип простоты и мера сложности [Текст] / Е. А. Мамчур, Н. Ф. Овчинников, А. И. Уемов. – М.: Наука, 1989. – 304 с.
5. dic.academic.ru...nsf/enc_mathematics/5132/СЛОЖНАЯ [Электронный ресурс].
6. **Ляпунов А. А.** Теоретические проблемы кибернетики [Текст] / А. А. Ляпунов, С. В. Яблонский // Проблемы кибернетики: сборник статей. - М.: Физматгиз, 1963. - Вып.9. - С.5-22.
7. **Бусленко Н. П.** Лекции по теории сложных систем [Текст] / Н. П. Бусленко, В. В. Калашников, И. Н. Коваленко. – Ленинград: Советское радио, 1973. – 440 с.
8. Энциклопедия кибернетики, т. 2, К., 1975, с. 373-75. **Н. Н. Кузюрин.**
9. **Шишонов Н. А.** Основы теории надежности и эксплуатации радиоэлектронной техники [Текст] / Н. А. Шишонов, В. Ф. Репкин, Л. П. Барвинский. – М.: Советское радио, 1964. – 550 с.
10. «[Введение в системный анализ и моделирование](#)» www.victor-safronov.ru/systems-analysis/lectures/kaziev/04.html [Электронный ресурс].
11. www.ait.org.ua/p/pub_podhod.html [Электронный ресурс].
12. **Бусленко Н. П.** Лекции по теории сложных систем [Текст] / Н. П. Бусленко, В. В. Калашников, И. Н. Коваленко. – Ленинград: Советское радио, 1973. – 440 с.
13. **Сетров М. И.** Принцип системности и его основные понятия [Текст] М. И. Сетров // Проблемы методологии системного исследования. – М.: Мысль, 1970. – С. 49-53.
14. **Рудь Ю. С.** Повышение надежности и производительности систем оборудования для окускования железных руд [Текст] / Ю. С. Рудь. - Диссертация доктора техн. наук. – М.: МГИ, 1986. – 329 с.
15. **Рудь Ю. С.** Надежность и эффективность оборудования фабрик окускования [Текст] / Ю. С. Рудь. – М.: Недра, 1977. – 200 с.
16. **Рудь Ю. С.** Эксплуатационная надежность оборудования обжиговой машины ОК-306 [Текст] / Ю. С. Рудь, Н. В. Кияновский, Н. М. Флак, В. И. Бессараб, В. П. Шевченко, А. С. Якименко. - М.: Институт «Черметинформация», 1975 (Экспресс-информ. Сер. 17. Служба и ремонт механического оборудования на металлургических заводах. - Вып. 7). - 14 с.
17. **Рудь Ю. С.** Оборудование для окомкования и обжига железорудных окатышей [Текст] / Ю. С. Рудь, В. И. Бессараб, В. М. Палагута, Г. Х. Бойко, М. Е. Фастовский. - М.: ЦНИИТЯЖМАШ, 1982. (Обзорн. информ. Сер. Металлургическое оборудование. - Вып. 36). -33 с.].
18. **Рудь Ю. С.** Современное оборудование для обогащения железных руд [Текст] / Ю. С. Рудь, В. И. Бессараб, Л. З. Ортенберг. - ЦНИИТЭИТЯЖМАШ. - М., 1982. - Обзор информ. Сер. Горное оборудование. - Вып. 33). - 36 с.

Рукопись поступила в редакцию 06.04.2018