

**РЕГЕНЕРАЦИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ****Цветков Виктор Яковлевич<sup>1</sup>,***д-р техн. наук, профессор,**e-mail: cvj2@mail.ru,***Матчин Василий Тимофеевич<sup>1</sup>,***e-mail: matchin.vt@gmail.com,*<sup>1</sup>*Российский технологический университет (РТУ МИРЭА), г. Москва, Россия*

*Статья описывает и предлагает механизм модернизации сложных систем на основе технологии регенерации. Вводится новое понятие «компонентная сложная система» с целью выделения высокого уровня сложности систем и применения специальных технологий обновления. Статья дает систематику компонентных сложных систем. Показано различие между независимым обновлением компонент и регенерацией компонентных сложных систем. Описаны условия целесообразного применения механизма регенерации для компонентных сложных систем. При регенерации сложной системы основным критерием выбран критерий качества ее функционирования. В качестве основы для соблюдения данного критерия выбраны стандарты ГОСТ Р ИСО/МЭК 25010-2015 и ISO/IEC 25010:2011. В основе этих стандартов заложена модель компонентной тринитарной системы. Статья дает формальное описание информационной компонентной сложной системы и описание процедуры ее регенерации. Для сравнения дано формальное описание аддитивной системы. Результаты исследования являются альтернативой технологиям реинжиниринга. Они могут найти применение в модернизации информационных систем и информационных сервисов, реализуемых на основе современных методов и средств.*

**Ключевые слова:** сложные системы, компонентные системы, информационные системы, обновление, регенерация, эмерджентность

**REGENERATION OF COMPLEX SYSTEMS****Tsvetkov V.Ya.<sup>1</sup>,***doctor of technical sciences, professor,**e-mail: cvj2@mail.ru,***Matchin V.T.<sup>1</sup>,***e-mail: matchin.vt@gmail.com,*<sup>1</sup>*Russian Technological University (RTU MIREA), Moscow, Russia*

*The article describes and suggests a mechanism for upgrading complex systems based on regeneration technology. A new concept of “component complex system” is introduced in order to highlight the high level of complexity of systems and the use of special update technologies. The article provides a systematics of component complex systems. The difference between independent component renewal and regeneration of component complex systems is shown. The conditions for the expedient application of the regeneration mechanism for component complex systems are described. When regenerating a complex system, the main criterion is the criterion of the quality of its functioning. The standards GOST R ISO/IEC 25010-2015 and ISO/IEC 25010:2011 were chosen as the basis for compliance with this criterion. These standards are based on the model of a component trinitarian system. The article provides a formal description of the information component of a complex system and a description of the procedure for its regeneration. For comparison, a formal description of the additive system is given. The research results provide an alternative to reengineering technologies. They can find application in the modernization of information systems and information services, implemented on the basis of modern methods and tools.*

**Keywords:** complex systems, component systems, information systems, update, regeneration, emergence

DOI 10.21777/2500-2112-2024-1-88-94

## Введение

Проблема обновления сложных систем возникает по мере развития технологий и бизнес-процессов организации. Она решается по-разному для разных систем. Например, для обновления информационных систем (ИС) или бизнес-процессов организации применяют технологию реинжиниринга. В общем случае, под реинжинирингом подразумевается глубокая переработка (модернизация) системы. Она, как правило, сводится к замене одних блоков на другие или радикальной замене системы с сохранением необходимой функциональности. Модернизация сложной системы, как правило, связана с риском нарушения взаимосвязей, потери накопленного системного опыта и данных, получения планируемой эффективности на выходе. Данное обстоятельство вызывает необходимость развития существующих и создания новых подходов к обновлению сложных систем с целью повышения результативности.

Одним из новых подходов к обновлению программных комплексов является регенерация [1–3]. Термин «регенерация» близок по смыслу терминам «реинжиниринг» и «обновление», но реализуемый в этом контексте принцип имеет отличительные особенности. Близким по содержанию понятием для него является термин «модернизация».

Для информационных систем (ИС) термин «регенерация» связан с понятием «компоненты». Компонентами ИС являются данные, технологии и программное обеспечение. Соответственно вводят понятия базы данных, технологическое обеспечение (ТО), программное обеспечение (ПО). Новый подход к обновлению ИС состоит в совместном обновлении разных компонент системы с учетом связей между ними.

Целью исследования является систематика сложных систем, определение условий применения механизма регенерации для обновления компонентных сложных систем.

### Особенности обновления компонентных систем

Среди различных видов сложных систем можно выделить категориальные или компонентные системы. Все сложные системы относительно однородны на структурном уровне. Они могут декомпонироваться на элементы, части, подсистемы. Однако выделяются сложные системы, составленные из других сложных систем. Для них такого простого разделения недостаточно. Необходимо вводить новые градации деления сложных систем, которые komponуются из более простых сложных систем. Такой градацией могут быть компоненты системы. Сложная система, состоящая из компонентов, называется компонентной сложной системой. В данном случае можно употребить понятие «категориальная система», то есть система, которая включает категориально различные системы.

Необходимо различать аддитивные системы компонентов и сложные компонентные системы. Для компонентной сложной системы (КСС) существует градация, определяющая структуру и структурную вложенность: элементы, части, подсистемы, компоненты (системы). В силу этого компонентная сложная система описывается не планарным, не плоским, а объемным графом или мультиграфом. Компонентные сложные системы могут быть разных видов: информационные (ИКСС), технические (ТКСС), киберфизические (КФСКСС), геоинформационные (ГИСКСС), многоагентные (МАКСС) и др. Каждая из разновидностей КСС имеет свою специфику построения, функционирования и особенности обновления.

Для компонентной сложной системы существуют следующие виды связей: между элементами, частями, подсистемами, компонентами. Совокупность связей обладает целостностью. Поэтому при обновлении КСС возникают более сложные задачи, чем при обновлении сложной аддитивной системы. Сложность возникает в системах, построенных на основе тринитарных моделей, отражающих более сложные тринитарные отношения. Иерархические системы, имеющие структуру планарного графа, имеют один вид сложности – сложность обхода ветвей и листьев. Сложные системы, построенные на основе тринитарных моделей, включают обратную связь, которая может создавать заикливание или паразитные информационные потоки. Это приводит к дополнительным видам сложности, которые необходимо учитывать при обновлении КСС. Таким образом, обновление КСС влечет дополнительные виды сложности [4].

## Механизм регенерации компонентной сложной системы

Механизм регенерации рассмотрим на примере информационной компонентной сложной системы. Развитие ИКСС связано с увеличением жизненного цикла (ЖЦ). Модель ЖЦ ИКСС включает функции управления изменениями. В известном руководстве по управлению ИТ-услугами ИТIL эту функцию выполняет подсистема управления изменениями (*change management*) [5; 6]. Она является расширенной и обеспечивает управление изменениями программного обеспечения (*software change management*) [7]. Кроме методологии ИТIL, существуют другие подходы к управлению изменениями в системе. Примерами могут служить COBIT [8] или Microsoft Operational [9].

Для информационных сложных систем связь многих факторов и программного обеспечения делает неэффективным независимое обновление компонент. Для информационной компонентной сложной системы также еще более неэффективно независимое обновление компонент. Такая ситуация требует разработки новой технологии изменения или обновления. Комплексной технологией обновления системы является регенерация. В процессе регенерации не просто заменяется компонент, а заменяется с модернизацией и изменением существующей структуры связей. Поэтому обновление ИКСС является комплексным и не сводится к независимой замене ее компонент. Применение регенерации эффективно для интегрированных информационных систем.

Регенерация КСС учитывает взаимосвязи между компонентами системы, тогда как независимое обновление связано только с заменой части системы. В процессе регенерации КСС заменяются все необходимые составляющие системы: элементы, части, подсистемы, компоненты. Кроме этого, регенерация модернизирует все связи между элементами, частями, подсистемами, компонентами. Основное требование регенерации КСС – это соблюдение баланса устойчивого функционирования модернизированной системы и повышение ее эффективности. Регенерация эффективна для сложных систем, в которых компоненты обладают свойством связанности.

Технология регенерации возникла как ответ на требование реальности. В настоящее время для сложных систем важным фактором является качество функционирования. Информационная КСС характеризуется следующими компонентами: система данных, система технологий или технологическая система, система программ или программная система. Для информационных систем необходимо применять методы стандартизации программного обеспечения и соответствующие ГОСТы. Перечисленные компоненты характеризуют качество функционирования системы. Основой оценки качества информационных систем в настоящее время являются два стандарта [10]:

1) отечественный стандарт ГОСТ Р ИСО/МЭК 25010-2015 «Информационные технологии (ИТ). Системная и программная инженерия. Требования и оценка качества систем и программного обеспечения (SQuaRE). Модели качества систем и программных продуктов»;

2) зарубежный стандарт ISO/IEC 25010:2011 «Системная и программная инженерия. Требования и оценка качества систем и программного обеспечения (SQuaRE). Модели качества систем и программного обеспечения».

Стандарты отражают современную концепцию развития программного обеспечения на основе системной и программной инженерии<sup>1</sup>. В соответствии со стандартом ГОСТ Р ИСО/МЭК 25010-2015 в системах выделяют три модели качества: модель качества алгоритма, модель качества технологии применения алгоритма, модель качества данных. Для ИКСС это трансформируется в три системные модели качества компонентов: качество технологической системы (технологический компонент); качество системы данных (компонент данных); качество системы программ (программный компонент). Разработка любой системы связана с разработкой модели ее качества.

Появление и применение этих стандартов зафиксировало важный факт. Программное обеспечение (программный компонент, ПК), технологическое обеспечение (технологический компонент, ТК) и система данных (компонент данных, КД) взаимосвязаны (рисунок 1). Их независимое обновление нарушает комплементарность [11] между ними. При независимом обновлении компонент может измениться качество функционирования системы. Регенерация ИКСС – это процесс взаимосвязанного об-

<sup>1</sup> Батоврин В.К. Системная и программная инженерия: словарь-справочник. – М.: Литрес, 2016. – 282 с.

новления ПК, ТК, КД для сохранения и повышения качества интегрированной системы. Особенность схемы на рисунке 1 то, что она является обобщенной тринитарной моделью, которая может содержать внутри компонент локальные тринитарные модели.

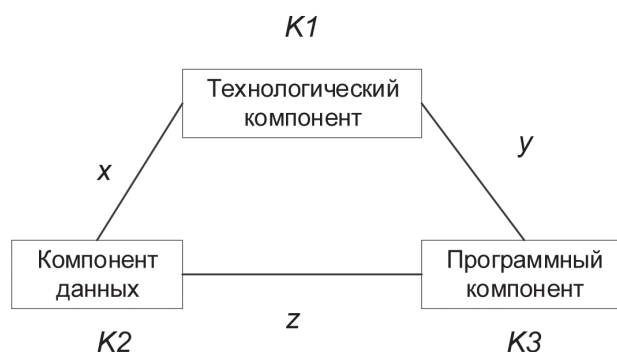


Рисунок 1 – Тринитарная модель ИКСС

Для описания прикладной системы AS можно использовать модель аддитивной системы как совокупность независимых компонент  $Q$

$$AS = f1(p1) + f2(p2) + f3(p3). \quad (1)$$

В выражении (1) приняты следующие обозначения:  $f1(p1)$  – функция, которая описывает систему аддитивных технологий;  $f2(p2)$  – функция, которая описывает систему программных компонент;  $f3(p3)$  – функция, которая описывает системы данных. Совокупность параметров  $(p1, p2, p3)$  представляет собой независимые параметры, не связанные друг с другом. В выражении (1) нет связей между компонентами

Для описания ИКСС можно использовать модель системы как совокупности компонент  $K$  (рисунок 1).

$$ИКСС = K1(p1) + K2(p2) + K3(p3) + C1(x) + C2(y) + C3(z). \quad (2)$$

В выражении (2):  $K1(p1)$  – технологический компонент;  $K2(p2)$  компонент данных;  $K3(p3)$  – программный компонент;  $C1(x)$  – связь  $K1$ - $K2$ ;  $C2(y)$  – связь  $K1$ - $K3$ ;  $C3(z)$  – связь  $K2$ - $K3$ .

Изменение только технологического компонента  $dИКСС_T$  описывается выражением (3)

$$dИКСС_T = K1' dp1 + C1' dx + C2' dy. \quad (3)$$

В выражении (3) и последующих выражениях апостроф (') обозначает производную. Изменение только программной компоненты  $dИКСС_P$  имеет вид

$$dИКСС_P = K3' dp3 + C3' dz + C2' dy. \quad (4)$$

Изменение только компоненты данных  $dИКСС_D$  имеет вид

$$dИКСС_D = K2' dp2 + C3' dz + C1' dx. \quad (5)$$

Выражения (3–5) описывают ситуации, когда обновляется только одна компонента в силу каких-то особых причин. В реальности для сохранения или повышения качества необходимо использовать требования стандартов [10]. В этом случае регенерация может быть представлена в виде

$$\Delta ИКСС = dИКСС_T + dИКСС_P + dИКСС_D + Qc. \quad (6)$$

В выражении (6) включена новая функция  $Qc$  балансировки или функция комплементарности [3]. Эта функция устанавливает баланс в системе в случае ее рассогласования. Если величины  $dИКСС_T$ ,  $dИКСС_P$ ,  $dИКСС_D$  при обновлении не нарушают общее качество, то величина  $Qc \approx 0$ .

Взаимосвязь компонент в уравнении (2) мотивирует введение величины поправки, связанной с функцией  $Qc$ , которую назовем «добалансировкой». В этом случае выражения (4–6) принимают вид

$$dИКСС_T = K1' dp1 + C1' dx + C2' dy. + \delta Qc1. \quad (7)$$

$$dИКСС_P = K3' dp3 + C3' dz + C2' dy. + \delta Qc2. \quad (8)$$

$$dИКСС_D = K2' dp2 + C3' dz + C1' dx + \delta Qc3. \quad (9)$$

В выражениях (7–9) величины  $\delta Qc1$ ,  $\delta Qc2$ ,  $\delta Qc3$  означают поправки добалансировки или регенерации компонент. Учет величин  $\delta Qc1$ ,  $\delta Qc2$ ,  $\delta Qc3$  обеспечивает регенерацию системы даже при обновлении одной из ее компонент. Эти величины являются характеристикой регенерации информационной системы.

Функция  $Q_c$  является характеристикой и признаком эмерджентности сложной системы. Аддитивная система в выражении (1) таким свойством не обладает. На практике возникает проблема нахождения и формализации функции  $Q_c$  и  $\delta Q_c$ . Одним из решений этой проблемы является применение метамоделирования [12].

### Обсуждение результатов

Регенерация компонентной сложной системы или информационной компонентной сложной системы есть новый тип модернизации систем, который качественно отличается от независимого обновления компонент [13]. Она сохраняет качество функционирования КСС и ИКСС.

Опыт исследования сложных систем дает основание ввести понятие «компонентные сложные системы». Наряду с системным анализом они требуют применения теории категорий. Независимое обновление компонент сложной системы влечет дополнительные виды сложности и часто упрощает ее свойства. Регенерация компонентной сложной системы учитывает эти сложности и сохраняет свойство эмерджентности за счет взаимосвязанного изменения компонент. Регенерация является современной технологией модернизации сложных систем.

Регенерация информационных компонентных сложных систем применима не во всех случаях, а при условии тринитарной связи подсистем программного обеспечения, технологического обеспечения и системы данных, а также при условии, что совокупность указанных компонент образует связанную целостную систему. Регенерацию целесообразно применять только при наличии сложных связей между компонентами или частями системы. Если структура сложной системы описана в виде планарного графа, то регенерация не требуется. Если структура системы описывается мультиграфом или объемным графом, то для ее обновления необходима регенерация.

В отличие от разрозненного обновления данных, программ и технологий, технология регенерации позволяет учитывать взаимосвязь параметров информационной системы. Эта взаимосвязь требует учитывать условие комплементарности и решения задачи локальной оптимизации для нахождения комплементарного решения. Принципиальным отличием регенерации от независимого обновления систем является соблюдение отношений комплементарности и сохранения эмерджентности системы.

### Заключение

Вводится новое понятие «компонентная сложная система» с целью выделения высокого уровня их сложности и применения специальных технологий обновления. Компонентные сложные системы построены на основе тринитарных моделей, отражающих более сложные тринитарные отношения. Приводится обоснование применения технологии регенерации для их обновления. Регенерация рассматривается как процесс взаимосвязанного обновления компонент системы и модернизации всех связей между элементами, частями, подсистемами, компонентами. Показано отличие обновления компонентной сложной системы и аддитивной системы, для которой применяется независимое обновление компонент. Выделены условия целесообразности применения технологии регенерации для обновления сложных систем. Регенерация информационных компонентных сложных систем применима не во всех случаях, а при условии тринитарной связи подсистем программного обеспечения, технологического обеспечения и системы данных, а также при условии, что совокупность указанных компонент образует связанную целостную систему. Представлено формализованное описание процесса регенерации компонентной сложной системы на примере информационной системы. Оно позволяет выделить характеристики регенерации и выполнить системные условия процесса.

Применение результатов данного исследования направлено на повышение эффективности проектных решений в сфере модернизации информационных систем и информационных сервисов организации.



## Список литературы

1. *Господинов С.Г.* Регенерация данных систем искусственного интеллекта // Славянский форум. – 2020. – № 2 (28). – С. 24–33.
2. *Матчин В.Т.* Регенерация программных компонент вычислительных комплексов. – Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 2020. – 125 с.
3. *Матчин В.Т.* Применение эволюционного моделирования для регенерации программного обеспечения // Образовательные ресурсы и технологии. – 2019. – № 4 (29). – С. 42–52.
4. *Цветков В.Я.* Основы теории сложности: монография. – Москва: ИНФРА-М, 2024. – 145 с.
5. *Marrone M., Gacenga F., Cater-Steel A. & Kolbe L.* IT Service Management: A Cross-national Study of ITIL Adoption // Communications of the Association for Information Systems. – 2014. – Vol. 34. – P. 865–892. – DOI 10.17705/1CAIS.03449.
6. *Albulescu M.* Implementing Itil Methodology within a Company. A Survey on 10 Organizations about the Pre-Implementation, during and after-Implementation Period // Proceedings of the International Management Conference, Faculty of Management, Academy of Economic Studies. – Bucharest. – 2020. – Vol. 14 (1). – P. 43–52.
7. *Ghosh S.M., Sharma H.R., Mohabay V.* A study of software change management problem // International Journal of Database Theory and Application. – 2011. – Vol. 4, No. 3. – P. 39–48.
8. *Amorim A.C. et al.* Using Agile Methodologies for Adopting COBIT // Information Systems. – 2021. – Vol. 101. – P. 101496. – DOI 10.1016/j.is.2020.101496.
9. *Dhiaf M.M. et al.* Thirteen Years of Operations Management Research (OMR) // Journal: a Bibliometric Analysis and Future Research Directions Operations Management Research. – 2021. – Vol. 14. – P. 235–255.
10. *Зайцев К.А., Изотов С.А., Миньков С.Л.* Сравнительный анализ характеристик качества программного обеспечения по стандартам ISO/IEC 9126 (2001) и ISO/IEC 25010 (2015) // Инноватика-2019: сборник материалов XV Международной школы-конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 25–27 апреля 2019 г. – Томск, 2019. – С. 383–387. – URL: <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Repository/vtls:000672555> (дата обращения: 12.01.2024). – Текст: электронный.
11. *Щенников А.Н.* Комплементарное управление транспортными потоками мегаполиса // Наука и технологии железных дорог. – 2019. – № 3 (11). – С. 17–25.
12. *Цветков В.Я., Булгаков С.В., Тутов Е.К., Рогов И.Е.* Метамоделирование в геоинформатике // Информатика и космос. – 2020. – № 1. – С. 112–119.
13. *Матчин В.Т.* Регенерация бортовых баз данных // Наука и технологии железных дорог. – 2019. – № 4 (12). – С. 20–29.

## References

1. *Gospodinov S.G.* Regeneraciya dannyh sistem iskusstvennogo intellekta // Slavyanskij forum. – 2020. – № 2 (28). – S. 24–33.
2. *Matchin V.T.* Regeneraciya programmyh komponent vychislitel'nyh kompleksov. – Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 2020. – 125 s.
3. *Matchin V.T.* Primenenie evolyucionnogo modelirovaniya dlya regeneracii programmnoo obespecheniya // Obrazovatel'nye resursy i tekhnologii. – 2019. – № 4 (29). – S. 42–52.
4. *Cvetkov V.Ya.* Osnovy teorii slozhnosti: monografiya. – Moskva: INFRA-M, 2024. – 145 s.
5. *Marrone M., Gacenga F., Cater-Steel A. & Kolbe L.* IT Service Management: A Cross-national Study of ITIL Adoption // Communications of the Association for Information Systems. – 2014. – Vol. 34. – P. 865–892. – DOI 10.17705/1CAIS.03449.
6. *Albulescu M.* Implementing Itil Methodology within a Company. A Survey on 10 Organizations about the Pre-Implementation, during and after-Implementation Period // Proceedings of the International Management Conference, Faculty of Management, Academy of Economic Studies. – Bucharest. – 2020. – Vol. 14 (1). – P. 43–52.
7. *Ghosh S.M., Sharma H.R., Mohabay V.* A study of software change management problem // International Journal of Database Theory and Application. – 2011. – Vol. 4, No. 3. – P. 39–48.

8. *Amorim A.C.* et al. Using Agile Methodologies for Adopting COBIT // Information Systems. – 2021. – Vol. 101. – P. 101496. – DOI 10.1016/j.is.2020.101496.
9. *Dhiaf M.M.* et al. Thirteen Years of Operations Management Research (OMR) // Journal: a Bibliometric Analysis and Future Research Directions Operations Management Research. – 2021. – Vol. 14. – P. 235–255.
10. *Zajcev K.A., Izotov S.A., Min'kov S.L.* Sravnitel'nyj analiz harakteristik kachestva programmogo obe-specheniya po standartam ISO/IEC 9126 (2001) I ISO/IEC 25010 (2015) // Innovatika-2019: sbornik ma-terialov XV Mezhdunarodnoj shkoly-konferencii studentov, aspirantov i molodyh uchenyh, Tomsk, 25–27 aprelya 2019 g. – Tomsk, 2019. – S. 383–387. – URL: <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Repository/vtls:000672555> (data obrashcheniya: 12.01.2024). – Tekst: elektronnyj.
11. *Shchennikov A.N.* Komplementarnoe upravlenie transportnymi potokami megapolisa // Nauka i tekhnologii zheleznyh dorog. – 2019. – № 3 (11). – С. 17–25.
12. *Cvetkov V.Ya., Bulgakov S.V., Titov E.K., Rogov I.E.* Metamodelirovanie v geoinformatike // Informaciya i kosmos. – 2020. – № 1. – С. 112–119.
13. *Matchin V.T.* Regeneraciya bortovyh baz dannyh // Nauka i tekhnologii zheleznyh dorog. – 2019. – № 4 (12). – С. 20–29.