УДК 621.01

# Оценка согласованности и совместимости технических систем в составе сложных организационно-технических систем

Бочков А. П., Барановский А. М., Гильванов Р. Г.

***Постановка задачи.*** *Увеличение сложности конструктивного исполнения технических систем в составе сложных организационно-технических систем делает актуальным проведение оценки их совместимости и согласованности на ранних этапах разработки. Известные методы оценки совместимости и согласованности ориентированы на довольно обширную и подробную информационную базу исходных данных и не могут быть реализованы в условиях значительной неопределенности на ранних этапах разработки технических систем.* ***Целью работы*** *является оценка согласованности и совместимости элементной базы технической системы, а также самой системы в составе более сложной системы, например, сложной организационно-технической системы, при вариантных проработках поисковых исследований с учетом новой элементной базы. Предлагается проводить оценку согласованности и совместимости на основе системы нечетких правил, формализующих представление о месте разрабатываемого образца технической системы в общей новой схеме применения в составе организационно-технической системы.* ***Используемые методы.*** *При формализации новых условий применения технической системы используются методы оценки на основе нечетких терминов (лингвистические переменные, нечеткие числа), комплексных нечетких правил (с отношениями И или ИЛИ), формализующих взаимодействие образца в составе более сложной системы. Для построения схем взаимодействия используются методы теории графов. Все сформулированные правила синтезируются в качественной матрице, на основе которой получается качественный вектор условий, который характеризует комплексность (согласованность и совместимость) образца технической системы. Элементом* ***новизны*** *оценки согласованности и совместимости образца технической системы является формализация связей образца нечеткими правилами, на основе которых рассчитывается расширенный качественный вектор, отражающий согласованность и совместимость образца.* ***Результатом*** *исследования является то, что проведена характеристика условий и моделей оценки согласованности и совместимости для ранних этапов разработки. Разработаны алгоритмы получения расширенного качественного вектора и формирования показателя согласованности и совместимости образца технической системы нечетким термином с последующим нормированием. Приводится конкретный расчетный пример на основе нечеткой системы связей условной сложной организационно-технической системы. Для рассмотренного примера использовалось комплексное нечеткое правило с отношением И.* ***Практическая значимость*** *работы определяется тем, что результаты исследований использовались при оценке согласованности и совместимости разрабатываемого образца технической системы. Это повышает качество работ по созданию образца, а, следовательно, и его эксплуатационную эффективность в будущем. Кроме того, практическая значимость усиливается тем, что оценка согласованности и совместимости может использоваться в других приложениях, например, при оценке совместимости разрабатываемых программного обеспечения, электронно-вычислительной техники, информационных систем и др.*

***Ключевые слова:*** *разработка, техническая система, алгоритм, согласованность и совместимость, оценка, сложная организационно-техническая система.*

## Введение

Учитывая важную роль развития научно-технического прогресса в современной жизни, вопрос повышения качества создаваемых технических систем

**Библиографическая ссылка на статью:**
Бочков А. П., Барановский А. М., Гильванов Р. Г. Оценка согласованности и совместимости технических систем в составе сложных организационно-технических систем // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 1. С. 284-301. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10109.

**Reference for citation:**
Bochkov A. P., Baranovskii A. M., Gilvanov R. G. Assessment of consistency and compatibility of technical systems in complex organizational and technical systems. *Systems of Control, Communication and Security*, 2020, no. 1, pp. 284-301. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10109 (in Russian).

всегда будет актуален. Одним из путей повышения качества технических систем является совершенствование процессов их создания и разработки, в частности, совершенствование научно-методического аппарата, применяемого на этапах предпроектных исследований, при альтернативной проработке возможных вариантов облика технических систем (ТС). При этом, следуя системным представлениям, важно учитывать совместимость и согласованность функционирования технических систем с другими элементами (техническими системами) в сложных организационно-технических системах (СОТС). В свою очередь, элементы СОТС также могут находиться в разработке. Соответственно, оценка совместимости и согласованности технических систем должна учитывать неопределенность условий их применения в будущем, облика других разрабатываемых технических систем, элементов СОТС. Исходя из этого, ***целью*** данной статьи является оценка совместимости и согласованности технической системы в составе сложной организационно-технической системы на этапах предпроектных исследований в условиях значительной неопределенности исходных данных.

## Характеристика условий и моделей оценки совместимости и согласованности технической системы

*Условия оценки совместимости и согласованности ТС.* Анализ характерных особенностей развития образца ТС показывает, что его конструкция становится все более прогрессивной за счет внедрения новых эффективных технических решений. Но, вместе с тем, не всегда полностью раскрываются его потенциальные возможности при эксплуатации из-за несогласованности и несовместимости с другими образцами в составе сложной организационно-технической системы, а также между элементами, блоками и подсистемами самого образца ТС. Без учета этого факта при прогнозировании облика могут получиться варианты с эффективным высококачественным элементным составом. Однако практика разработки образца ТС свидетельствует, что хорошо себя зарекомендовавшие в эксплуатации образцы, как правило, не отличаются лучшей элементной базой. Стремясь добиться согласованной работы блоков и элементов образца ТС, его совместимости с другими образцами, разработчик вынужден постоянно разрешать технические противоречия в конструктивной схеме, что приводит к отказу от использования на первый взгляд лучших блоков, элементов [1, 2]. Учитывая это обстоятельство, при разработке ТС необходимо подвергать возможные варианты анализу на предмет комплексности (совместимости и согласованности). Комплексность – свойство образца ТС, которое отражает способность его согласованно и совместимо взаимодействовать с другими образцами в составе более сложной системы СОТС. Согласованность и совместимость могут быть энергетическими, информационными, техническими [3]. Это способствует тому, что в процессе разработки образца ТС с учетом его функционирования в составе СОТС возникает ситуация неопределенности, в которой применяются модели и методы исследования сложных систем с нечеткими параметрами, описанные, например, в [4-7].

*Характеристика моделей оценки совместимости и согласованности.* Известны работы [8-17], в которых проводится оценка согласованности и совместимости систем в составе более сложной системы.

Оценка согласованности и совместимости может проводиться с использованием метода получения коэффициента согласованности и совместимости, суть которого состоит в назначении всем элементам системы одинакового усредненного веса, в последовательном расчете значений показателя аналитической целевой функции системы без каждого из своих элементов. В вычислении реального весового коэффициента каждого элемента по величине ущерба целевой функции, наносимого исключением этого элемента [8]. Получение целевой функции в аналитической виде весьма затруднительно из-за информационной неопределенности, возникающей при оценке совместимости и согласованности технической системы в составе СОТС на этапах предпроектных исследований.

В [9, 10] представлены некоторые положения понятийного аппарата и общей теории технической совместимости приборов, рассмотрена роль технической совместимости в обеспечении качества и эффективности создаваемых систем, оценка параметрической совместимости сложных аппаратурных комплексов с привлечением положений теории технической совместимости и методов математической статистики.

В [11] предложена формальная модель спецификации системы Интернета вещей, которая основывается на темпоральной логике действий и используется при проверке совместимости компонентов IoT-системы.

Сформулированы принципы описания сложной организационно-технической системы (СОТС). Предложена концептуальная модель сложной организационно-технической системы. Типизированы элементы и связи СОТС. Предложен способ теоретико-множественного описания СОТС. Введено понятие системное время и раскрыта его структура. Введено понятие информационное пространство СОТС. Приведена информационная модель жизненного цикла СОТС. Раскрыто содержание стадий и фаз жизненного цикла СОТС [12]. Подготовлена понятийная основа для оценки согласованности и совместимости элементов СОТС.

В [13] разработана методика построения объектной модели технических систем, имеющих сетевую и линейную структуру. Она позволяет учитывать особенности инфраструктуры функционирования ТС, взаимосвязь комплексов ТС, а также структуру того оборудования, которое используется в комплексах ТС.

В [14] представлена модель оценки совместимости, предназначенная для улучшения оценки совместимости элементов организационных систем и нескольких организационных систем на ранней стадии жизненного цикла разработки системы. Модель включает в себя метод оценки совместимости, который использует технические стандарты в качестве системных символов для получения результатов, близких к результатам тестов совместимости, которые выполняются после разработки систем. Была разработана математическая функция, основанная на существующем коэффициенте подобия для количественных

сравнений совместимости систем. Рассмотрены примеры оценки совместимости информационных систем разных организаций. Оценка совместимости системы с другими системами на ранних стадиях разработки системы позволит разработчикам и связанным с ними специалистам принимать обоснованные решения для улучшения совместимости элементов организационных систем.

В [15] рассмотрено качество систем, построенных из компонентов, которые были произведены на предприятиях в разных местах. Для повышения эффективности деятельности предприятий, занимающихся проектированием и производством таких систем, необходима определенная последовательность процессов. Эта последовательность идентифицирована. Сформулированы основные принципы, обеспечивающие качество таких систем. В частности, важна совместимость компонентов. Необходимо учитывать ограничения, связанные с эмерджентными свойствами системы, которые на ранних этапах создания сформировать весьма затруднительно из-за неопределенности процессов применения систем в будущем.

В [16] предлагается метод проектирования пользовательского интерфейса, на основе которого можно оценить согласованность в работе устройства с помощью простых преобразований. Суть метода заключаются в использовании функций подобия (метрик). Сходство вычисляется на основе проектной информации и анализируется с помощью иерархической кластеризации. В результате такой кластеризации все функции разбиваются на несколько групп. Это дает возможность судить о согласованности сформированных функций. Такой метод не требует больший затрат и дает возможность повысить эффективность проектных работ. С помощью его была проведена оценка пользовательских интерфейсов для цифровой камеры на согласованность, были определены узловые точки, подлежащие исправлению во взаимодействиях. Для ранних этапов разработки технических систем использовать такой метод затруднительно, т.к. присутствует значительная неопределенность анализируемых функций. Выделяются только основные функции, поэтому кластеризация здесь исключается.

В [17] предлагается модель количественной оценки совместимости составляющих системы (в данном случае социально-экономической), которая определяется оценкой ее устойчивого развития с применением многокритериальных методов оценки. При этом необходима информация о количественных и качественных параметрах системы. Применительно к оценке совместимости ТС на этапе предпроектных исследований количественные параметры отсутствуют, что делает использование известной модели оценки совместимости проблематичной.

Таким образом, на основе анализа ранних этапов разработки ТС, известных моделей и методов оценки совместимости систем в составе более сложных систем можно сделать вывод о значительной информационной неопределенности, которая накладывает определенные трудности на использование математического аппарата теории вероятностей и математической статистики, теории подобия, метрик и логики действий. Возникает противоречие между неопределенной исходной информацией, соответствующей ранним этапам разработки, и существующими методами оценки согласованности и совместимости, ориенти-

рованными на количественную и качественную информацию. Неопределенность информации связана с изменяющимися условиями эксплуатации ТС, неоднозначностью их конструктивного исполнения, принципов функционирования и др. Представляется, что в данном случае структуру ТС, ее взаимодействие с внешней средой, можно описать с помощью системы правил, истинность которых описывается нечеткими терминами. В этом случае количество связей будет соответствовать количеству нечетких правил.

Существующие модели и методы теории нечетких множеств развиваются в соответствии с конкретными приложениями в разных областях. Так, например, в [18] предлагается модель разработки веб-мобильного приложения с использованием нечеткой логики, но ничего не говорится о самих правилах, их типах, формализующих взаимодействие ТС с другими элементами в составе сложной системы. В [19] предлагается нестандартный подход к решению проблемы группового принятия решения с нечеткими отношениями предпочтения и мерами совместимости. Суть его заключается в задании значения совместимости и ожидаемого отношения предпочтения (ОП) для аддитивного трапециевидного нечеткого отношения. Предлагается алгоритм улучшения совместимости, чтобы помочь каждому отдельному ОП достичь приемлемой совместимости. Кроме того, исходя из минимизации индекса совместимости, получается оптимальная модель для определения весов экспертов в групповом принятии решения. Данный подход перегружен ОП в сформированных правилах, что усложняет саму процедуру получения оценок согласованности и совместимости ТС, ее элементов. К тому же, в условиях значительной информационной неопределенности ранних этапов разработки ТС нет смысла проводить процедуру минимизации индекса совместимости. Достаточно вместо отношений предпочтения в правилах учитывать условия, фиксирующие тот или иной тип составляющей ТС, что значительно упростит процесс формализации структуры ТС нечеткими правилами с целью определения ее согласованности и совместимости.

Учитывая приведенные доводы, можно в явном виде сформировать цель исследования – оценка согласованности и совместимости технической системы в составе более сложной системы с учетом информационной неопределенности характерной для ранних этапов ее разработки.

## Оценка согласованности и совместимости образца технической системы в составе сложной организационно-технической системы

Меру совместимости и согласованности образца ТС можно отразить системой правил $R = \{R_1, R_2, \ldots, R_i, \ldots, R_p\}$ вида:

$$R_i\text{: ЕСЛИ } C_j\text{, ТО } C_k \ \left(G = t_i\right), \tag{1}$$

где $C_j$ и $C_k$ – условия, описанные предположениями из необходимого объема знаний, имеющих определенную истинность, которая определяется ранговой характеристикой ($\beta(t_i)$, $\beta(t_k)$) или соответствующей ей лингвистическим термином ($t_i$, $t_k$); $t_i$ – лингвистический термин истинности $i$-го правила (таблица 1); $G$ – фактор определенности. Если какое-то условие $C_j$ состоит из многих усло-

вий ($C_{j1}$, $C_{j2}$, ..., $C_{jn}$), связанных вместе отношениями И или ИЛИ (например, $C_j = C_{j1}$ И $C_{j2}$ И ... И $C_{jn}$), то такое условие называется комплексным, а правило с этим условием – комплексным правилом.

Таблица 1 – Множество нечетких чисел и соответствующих им лингвистических терминов

| Ранговая характеристика, $\beta(t_i)$ | Лингвистический термин, $t_i = \delta(\beta(t_i))$ | Нечеткое трапецеидальное число [*A*, *B*, *a*, *b*] |
|---|---|---|
| 0 | неизвестно | (0 0 0 0) |
| 1 | очень мало | (0 0,02 0 0,05) |
| 2 | мало | (0,1 0,18 0,06 0,05) |
| 3 | средне мало | (0,22 0,36 0,05 0,06) |
| 4 | среднее | (0,41 0,58 0,09 0,07) |
| 5 | средне большое | (0,63 0,80 0,05 0,06) |
| 6 | большое | (0,78 0,92 0,06 0,05) |
| 7 | очень большое | (0,98 1,0 0,05 0) |
| 8 | абсолютно истинно | (1,0 1,0 0 0) |

В таблице 2 представлены типы комплексных правил, которые могут отражать совместимость и согласованность составляющих образца ТС и самих объектов в составе комплекса.

Таблица 2 – Основные комплексные правила

| Вид правила, знания истинности условий правила |
|---|
| 1. $R_i$: ЕСЛИ $C_{j1}$ И $C_{j2}$ И ... И $C_{jn}$, ТО $C_k$ $(G = t_i)$.<br>Если истинные значения условия $C_{j1}$, $C_{j2}$, ..., $C_{jn}$ выражены соответственно терминами $t_{j1}$, $t_{j2}$, ..., $t_{jn}$ и истинностью самого правила $t_i$, то истинность комплексного условия<br>$C_j = C_{j1}$ И $C_{j2}$ И ... И $C_{jn}$<br>$t_i = \delta\left(min\ \left(\beta(t_{j1}), \beta(t_{j2}), ..., \beta(t_{jn})\right)\right)$,<br>а истинность условия $C_k$ $t_k = \delta\left(\min\ \left(\beta(t_{j1}), \beta(t_{j2}), ..., \beta(t_{jn}), \beta(t_i)\right)\right)$. |
| 2. $R_i$: ЕСЛИ $C_j$, ТО $C_{k1}$ И $C_{k2}$ И ... И $C_{kn}$ $(G = t_i)$.<br>Правило может быть разложено на следующие правила:<br>ЕСЛИ $C_j$, ТО $C_{k1}$ $(G = t_i)$;<br>ЕСЛИ $C_j$, ТО $C_{k2}$ $(G = t_i)$;<br>.....<br>ЕСЛИ $C_j$, ТО $C_{kn}$ $(G = t_i)$.<br>Если истинность условия $C_j$ выражено термином $t_j$ и истинность самого правила - термином $t_i$, то истинности условий $C_{k1}$, $C_{k2}$, ..., $C_{kn}$<br>$t_{k1} = t_{k2} = ... = t_{kn} = \delta\left(\min\ \left(\beta(t_j), \beta(t_j)\right)\right)$. |

3. $R_i$: ЕСЛИ $C_{j1}$ ИЛИ $C_{j2}$ ИЛИ ... ИЛИ $C_{jn}$, ТО $C_k$ $(G = t_i)$.

Правило может быть разложено на следующие правила:

ЕСЛИ $C_{j1}$, ТО $C_k$ $(G = t_i)$;

ЕСЛИ $C_{j2}$, ТО $C_k$ $(G = t_i)$;

.....

ЕСЛИ $C_{jn}$, ТО $C_k$ $(G = t_i)$.

Если истинные значения условий $C_{j1}, C_{j2}, ..., C_{jn}$ выражены соответственно терминами $t_{j1}, t_{j2}, ..., t_{jn}$ и истинность самого правила термином $t_j$, то истинность условия $C_k$ $t_k = \delta\left(\min\left(\max\left(\beta(t_{j1}), \beta(t_{j2}), ..., \beta(t_{jn})\right), \beta(t_i)\right)\right)$.

Все сформулированные правила вида (1) можно синтезировать в качественной матрице размерностью $m \times m$ ($m$ – количество условий), каждый элемент которой $F(k, j)=\beta(t_i)$, где $\beta(t_i)$ – ранговая характеристика, соответствующая лингвистическому термину $t_i$, отражающему истинность правила $R_i$. Ориентировочные начальные истинности условий отражаются в качественном векторе истинности условий, любой элемент которого $T(i)= \beta(t_i)$. Если совокупность исходных правил элементной согласованности образца ТС сформирована на основе $m$ условий и $k$ комплексных условий, появляющихся в априорной части правил, то полученные качественная матрица правил и качественный вектор условий будут называться расширенными и иметь соответственно размерность $(m+k)\times(m+k)$ и $(m+k)\times 1$.

В [6] предлагается находить уточненный качественный вектор истинности условий

$$T^* = F \otimes T = \begin{vmatrix} \max\left[\min(x_{11}, y_1), \min(x_{12}, y_2), ..., \min(x_{1(m+k)}, y_{m+k})\right] \\ \max\left[\min(x_{21}, y_1), \min(x_{22}, y_2), ..., \min(x_{2(m+k)}, y_{m+k})\right] \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ \max\left[\min(x_{(m+k)1}, y_1), \min(x_{(m+k)2}, y_2), ..., \min(x_{(m+k)(m+k)}, y_{m+k})\right] \end{vmatrix}.$$

В данном выражении соответственно расширенная качественная матрица правил $F$ и расширенный качественный вектор условий, отражающий их начальные истинности, $T$ имеют вид:

$$F = \begin{vmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & \dots & x_{1(m+k)} \\ x_{21} & x_{21} & \dots & \dots & x_{2(m+k)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{(m+k)1} & x_{(m+k)2} & \dots & \dots & x_{(m+k)(m+k)} \end{vmatrix}, \; T = \begin{vmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ \dots \\ y_{m+k} \end{vmatrix}.$$

№1. 2020
ISSN 2410-9916

За счет неоднократного повторения преобразования $\otimes$ можно добиться выполнения равенства $T^* = T$. В этом случае окончательный расширенный качественный вектор условий будет полностью отражать нечеткость сформированных правил. Если правила отражают согласующие связи между составляющими образца ТС (или между объектами в составе СОТС), то логично считать окончательный расширенный качественный вектор условий величиной, характеризующей его комплексность.

На рис. 1 представлен алгоритм нечетких рассуждений, с помощью которого рассчитывается окончательный расширенный качественный вектор.

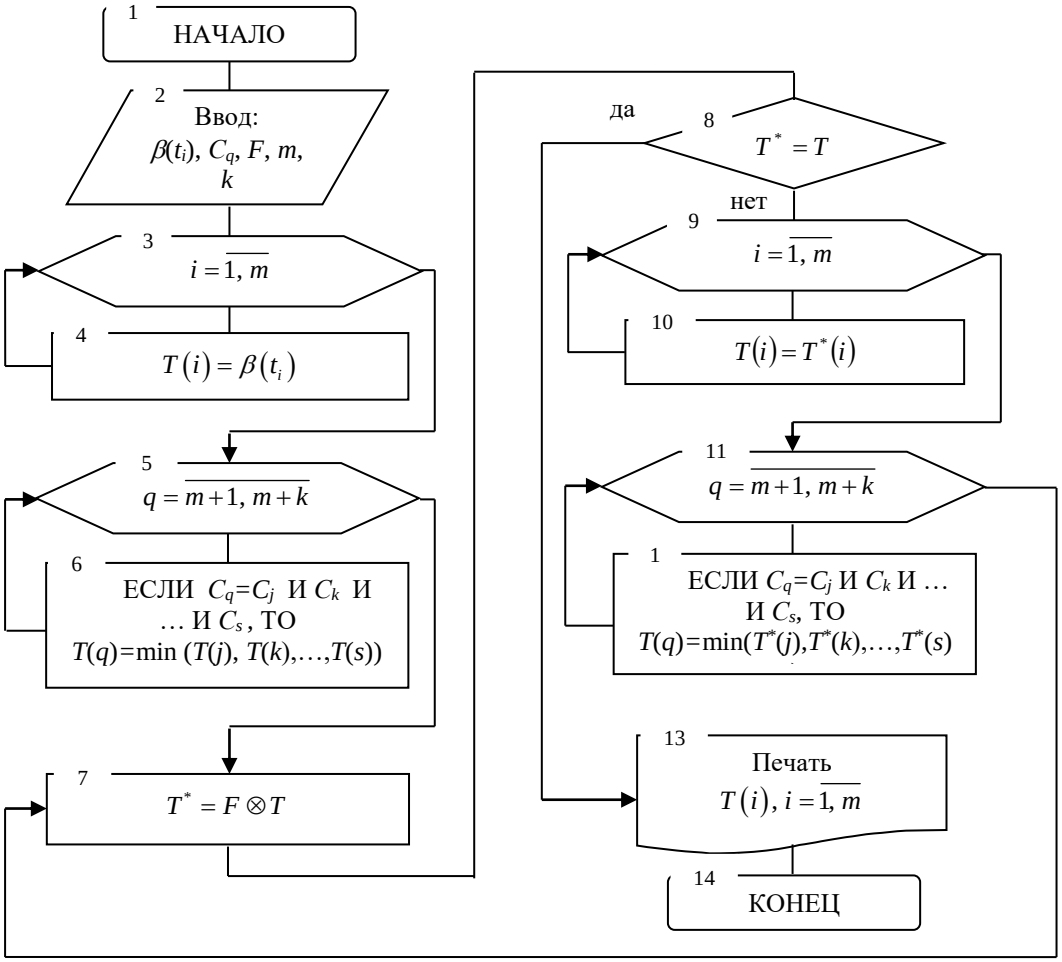


Рис. 1. Алгоритм расчета окончательного расширенного качественного вектора

Работа алгоритма включает ряд этапов:

1) ввод начальных приближений истинности условий, комплексных условий (на рис. 1 они показаны с отношением И) и расширенной качественной матрицы $F$;
2) формирование начального расширенного вектора условий $T$;
3) расчет уточненного вектора условий $T^* = F \otimes T$, если $T^* \neq T$, то переход к этапу 4, если $T^* = T$ – к этапу 5;

DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10109
URL: https://sccs.intelgr.com/archive/2020-01/09-Bochkov.pdf

4) значению $T$ присваивается значение $T^*$ ($T = T^*$) и осуществляется переход этапу 3;
5) получение окончательной истинности условий, $T(i)$, $i = \overline{1, m}$.

Таким образом, если считать, что условия отражают составляющие образца ТС, а их истинности комплексность этих составляющих, то комплексность его ζ-го варианта

$$\beta\left(t_\zeta\right) = \min\left(T(1), T(2), ..., T(m)\right), \ \zeta = \overline{1, N}, \qquad (2)$$

где $N$ – количество анализируемых на комплексность вариантов.

В соответствии с таблицей 1 комплексность приводится к лингвистическому термину или нечеткому числу и учитывается при прогнозировании облика образца ТС в составе СОТС.

Порядок формирования показателя комплексности образца ТС нечетким термином заключается в следующем:

- уяснение системы связей образца ТС в составе более сложной системы – СОТС и отражение её в нечетких категориях, соответствующих условиям ранних этапов разработки;
- формирование системы исходных нечетких правил, формализующих начальные представления о месте образца ТС в общей схеме применения системы (СОТС) в конкретных ситуациях, и соответственно качественной матрицы правил $F$ и начального качественного вектора условий $T$;
- реализация алгоритма нечетких рассуждений (рис. 1) и получение окончательного расширенного качественного вектора $T$, отражающего совместимость и согласованность составляющих образца ТС с учетом факторов, действующих на него в составе СОТС;
- расчет показателя комплексности ζ-го образца ТС по выражению (2), функционирующего в составе СОТС.

Предлагаемый научно-методический аппарат оценки комплексности образца ТС может быть использован при анализе его вариантов, характерной чертой которых является расплывчатость облика. Алгоритм нечетких суждений существенно повысит быстроту принятия решений и повысит достоверность формирования вариантов облика образца ТС.

## Численные расчеты по оценке согласованности и совместимости технической системы

В соответствии с предложенным алгоритмом формирования показателя комплексности предпочтительного варианта образца ТС, рассмотрим конкретный пример на перспективной условной СОТС (рис. 2, таблица 3). В данном случае на рис. 2 представлены нечеткие согласующие связи одного из вариантов облика СОТС. Нечеткость связей выражена игнорированием множества конкретных связей из-за их расплывчатости и выделением характерной, наиболее важной и согласующей именно для рассматриваемого варианта облика. При изменении типов составляющих эти характерные связи уже будут другими.

Оценка представленных согласующих связей проводилась нечеткими правилами:

$R_1$ : ЕСЛИ $C_3$, ТО $C_4$ ($G$ – «большое»), $\beta(t_1)$ =6;

$R_2$ : ЕСЛИ $C_1$ И $C_2$, ТО $C_4$ ($G$ – «очень большое»), $\beta(t_2)$ =7;

$R_3$ : ЕСЛИ $C_4$, ТО $C_5$ ($G$ – «среднее»), $\beta(t_3)$ =4;

$R_4$ : ЕСЛИ $C_5$, ТО $C_6$ ($G$ – «большое»), $\beta(t_4)$ =6;

$R_5$ : ЕСЛИ $C_{11}$, ТО $C_5$ ($G$ – «средне малое»), $\beta(t_5)$ =3;

$R_6$ : ЕСЛИ $C_{12}$, ТО $C_6$ ($G$ – «очень большое»), $\beta(t_6)$ =7;

Комплексное условие $C_7 = C_1$ И $C_2$, тогда правило $R_2$ имеет вид

$R_2$ : ЕСЛИ $C_7$, ТО $C_4$ ($G$ – «очень большое»), $\beta(t_2)$ =7.

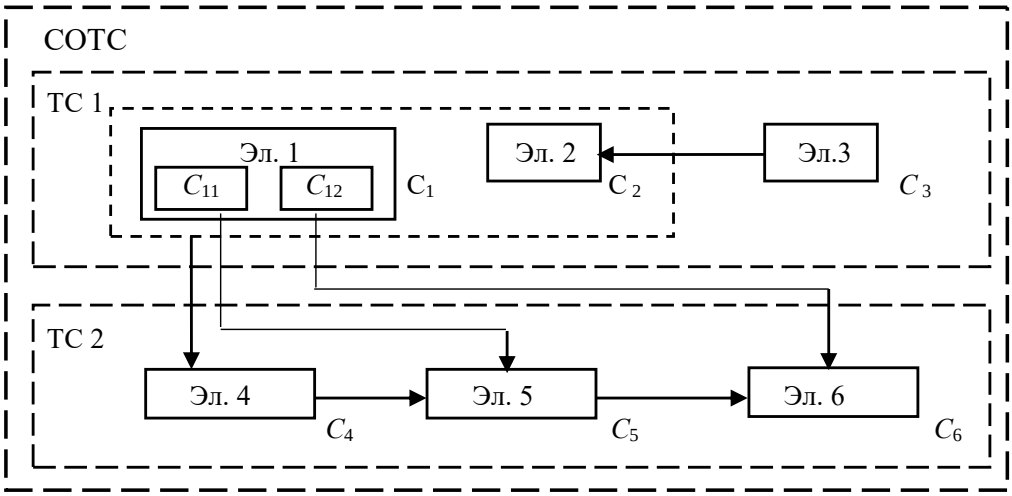


Рис. 2. Нечеткая система связей СОТС

Таблица 3 – Характеристика составляющих СОТС

| Обозначение составляющей (условие) | Характеристика составляющей |
|---|---|
| Эл. 1 ($C_1$) | Элемент ТС 1, который имеет специфические связи с остальными элементами ТС 2 (состоит из двух частей, если они соединены, то выполняется условие $C_{11}$, если нет условие $C_{12}$) |
| Эл. 2 ($C_2$) | Элемент ТС 1, который по своему назначению аналогичен элементу Эл. 1. Это делает возможным условно рассматривать Эл. 1 и Эл. 2 как единое целое |
| Эл. 3 ($C_3$) | Элемент ТС 1, который по своим габаритам и характеру взаимодействия с Эл. 4 идентичен Эл. 2 |
| Эл. 4 ($C_4$) | Элемент ТС 2, который координирует функционирование остальных элементов СОТС |
| Эл. 5 ($C_5$) | Элемент ТС 2, который на основе данных с Эл. 4 вырабатывает управляющие сигналы на Эл. 6 |
| Эл. 6 ($C_6$) | Элемент ТС 2, который на основе управляющих сигналов с Эл. 5 выполняет определенные функции |

Очевидно, что требуется пояснить сформированные правила. Для условной СОТС истинность условия, что она будет при функционировании использовать элемент 3 (Эл. 3), очень велика, и этому условию присваивается макси-

мальный лингвистический термин «абсолютно истинно», соответствующий ранговой характеристике 8. Истинности условий приведения в действие СОТС элементов 1 и 2 (Эл. 1 и Эл. 2) будут соответственно 7 и 3, которые находятся в прямой зависимости от ее условий применения. Правило $R_1$, отражающее связь элемента 3 (Эл. 3) с элементом 2 (Эл. 2), подчеркивает, что по своим габаритам они идентичны и при их функционировании алгоритмы действия одинаковы. Этого нельзя сказать об элементе 1 (Эл. 1), т.к. он имеет сложное устройство и по своим размерам достаточно большой. Это создает трудности по его использованию (отражается правилом $R_5$). Правило $R_6$ учитывает особенность взаимодействия между элементами 1 и 6 (Эл. 1 и Эл. 6). Совокупность правил $R_2$, $R_3$, $R_4$ отражают определенный принцип действия всей СОТС при использовании Эл. 1, что накладывает на конструкцию элементов 4, 5 и 6 (Эл. 4, Эл. 5 и Эл. 6) определенные изменения (таблица 3).

Таким образом, нечеткие ранговые характеристики учитывают неопределенность применения элементов ТС 1, а также их влияние на ТС 2. Применяя заданные истинности для элементов ТС 1, можно использовать рассмотренный алгоритм нечеткого рассуждения, который трансформирует выделенные истинности нечетких правил в истинности условий, отражающих конструкцию элементов 4, 5 и 6 (Эл. 4, Эл. 5 и Эл. 6). Он позволяет по нечетким рассуждениям получать оценки истинности всех условий при неполных или неопределенных (нечетких) исходных данных. В данном случае будут получены оценки истинности для условий $C_4$, $C_5$, $C_6$. Расширенные качественная матрица правил и начальный качественный вектор имеют вид:

$$F = \begin{vmatrix} 8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 8 & 6 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 8 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 8 & 0 & 0 & 7 \\ 3 & 0 & 0 & 4 & 8 & 0 & 0 \\ 7 & 0 & 0 & 0 & 6 & 8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8 \end{vmatrix}, \; T = \begin{vmatrix} 7 \\ 3 \\ 8 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}.$$

В соответствии с изложенным алгоритмом нечетких рассуждений выполним преобразования:

$$T = \begin{vmatrix} 7 \\ 3 \\ 8 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \min(7,3) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 7 \\ 3 \\ 8 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 3 \end{vmatrix}; \quad T^* = F \otimes T = \begin{vmatrix} 7 \\ 6 \\ 8 \\ 3 \\ 3 \\ 7 \\ 3 \end{vmatrix}, \; T^* \neq T; \quad T = \begin{vmatrix} 7 \\ 3 \\ 8 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \min(7,3) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 7 \\ 3 \\ 8 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 3 \end{vmatrix};$$

$$T^* = F \otimes T = \begin{vmatrix} 7 \\ 6 \\ 8 \\ 6 \\ 3 \\ 7 \\ 6 \end{vmatrix}, T^* \neq T; \quad T = \begin{vmatrix} 7 \\ 6 \\ 8 \\ 6 \\ 3 \\ 7 \\ \min(7,6) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 7 \\ 6 \\ 8 \\ 6 \\ 3 \\ 7 \\ 6 \end{vmatrix}; \quad T^* = F \otimes T = \begin{vmatrix} 7 \\ 6 \\ 8 \\ 6 \\ 4 \\ 7 \\ 6 \end{vmatrix}, \quad T^* \neq T;$$

$$T = \begin{vmatrix} 7 \\ 6 \\ 8 \\ 6 \\ 4 \\ 7 \\ \min(7,6) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 7 \\ 6 \\ 8 \\ 6 \\ 4 \\ 7 \\ 6 \end{vmatrix}; \; T^* = F \otimes T = \begin{vmatrix} 7 \\ 6 \\ 8 \\ 6 \\ 4 \\ 7 \\ 6 \end{vmatrix}, \quad T^* = T; \quad T = \begin{vmatrix} 7 \\ 6 \\ 8 \\ 6 \\ 4 \\ 7 \\ 6 \end{vmatrix}.$$

В результате проведенных преобразований получен окончательный расширенный качественный вектор, отражающий окончательную истинность условий $C_1 - C_6$. В свою очередь, эта истинность показывает степень согласованности (комплексности) условий. В соответствии с вектором $T$ СОТС в максимальной степени согласована с элементами Эл. 3 $T(3)=8$ ($C_3$), Эл. 1 $T(1)=7$ ($C_1$) и Эл. 2 $T(2)=6$ ($C_2$). Падение комплексности для этих составляющих системы незначительно.

Необходимо отметить изменение истинности условия $C_2$ с 3 (начальное приближение) до 6, которое отражает связность функционирования составляющих СОТС в соответствии со сформированными нечеткими правилами $R_1 - R_6$. Аналогично определяются значения истинностей условий $C_1 - C_6$, которые в начальном приближении вообще не оценивались. Они отражают согласованность работы соответственно элементов 4, 5 и 6 (Эл. 4, Эл. 5 и Эл. 6). По выражению (2) комплексность исходного варианта СОТС соответствует лингвистическому термину «среднее», $\beta$(«среднее»)=4. Тогда в соответствии с таблицей 1 при $\alpha$–срезе $\alpha$=1 нормированное значение комплексности $r_{ком}$=(0,41+0,58)/2=0,495.

## Заключение

Представленный алгоритм оценки согласованности и совместимости образца ТС в составе СОТС позволяет рассчитывать показатель согласованности и совместимости при вариантной проработке конкретного образца ТС на этапе предпроектных исследований. Это будет способствовать значительному повышению эффективности функционирования всей СОТС.

Элементом новизны представленной оценки согласованности и совместимости технической системы является то, что учитывается неопределенность информационных, энергетических, механических и других видов связей систе-

мы в составе СОТС путем использования системы нечетких правил. Причем, при этом могут применяться комплексные нечеткие правила, что в наибольшей мере соответствует информационным условиям предпроектных исследований.

Следует отметить, что необходимо рассматривать схемы взаимодействия элементов СОТС для типичных ситуаций эксплуатации организационной системы, выявлять виды взаимодействия элементов для каждой ситуации эксплуатации, в соответствии с этими ситуациями взаимодействия формировать системы нечетких правил и получать оценку согласованности и совместимости как отдельных элементов СОТС, так и всей организационной системы. Кроме того, в этом случае можно выходить на согласованность и совместимость СОТС в системах более высокого порядка. При построении схем взаимодействия можно использовать методы теории графов.

Несомненным достоинством представленного алгоритма оценки является то, что можно оценивать согласованности и совместимость разрабатываемых информационных систем отдельного предприятия (фирмы) или информационных систем нескольких предприятий. Отдельно можно говорить об оценке согласованности и совместимости разрабатываемого программного обеспечения. Все это указывает на практическую значимость представленного подхода к оценке согласованности и совместимости систем.

## Литература

1. Амиров Ю. Д. Основы конструирования: творчество – стандартизация – экономика: Справочное пособие. – М.: Издательство стандартов, 1991. – 392 с.

2. Бочков А. П., Гасюк Д. П., Филюстин А. Е. Модели и методы управления развитием технических систем. – СПб.: Издательство «Союз», 2003. – 273 с.

3. Бочков А. П. Свойства промышленного образца на ранних этапах его создания // Достижения науки и техники: VIII Международная научно-практическая конференция: сборник статей, Часть 1 (Москва, 30 апреля 2017 г.). – М.: Актуальность. РФ, 2017. С. 71-79.

4. Парамонов И. Ю., Смагин В. А., Косых Н. Е., Хомоненко А. Д. Модели и методы исследования сложных систем и обработки больших данных. – СПб.: Лань, 2020. – 236 с.

5. Дюбуа Д., Прад А. Теория возможностей. Приложения к представлению знаний в информатике. – М.: Радио и связь, 1990. – 288 с.

6. Shyi-Ming Chen. A new approach to inexact reasoning for rule-based systems // Cybernetics and systems. 1992. № 23. С. 561-582.

7. Didier Duboid and Henri Prade. Non-standard theories of uncertainty in knowledge representation and reasoning // The Knowledge Engineering Review. 1994. Т. 9. № 4. С. 399-416.

8. Бойко А. А., Дегтярев И. С. Метод оценки весовых коэффициентов элементов организационно-технических систем // Системы управления, связи и безопасности. 2018. № 2. С. 245-266.

9. Носенков А. А., Медведев В. И., Сухарев Е. Н. Техническая совместимость приборов как основа эффективности и качества систем // Известия вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51. № 8. С. 33-37.

10. Медведев В. И. Оценка параметрической совместимости сложных аппаратурных комплексов // Решетневские чтения: материалы XIV Международной научной конференции (Красноярск, 10–12 ноября 2010 г.). – Красноярск: Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М.Ф. Решетнева, 2010. С. 230-231.

11. Тименко А. В., Шкарупило В. В., Олейник А. А., Грушко С. С. Формальная модель проверки совместимости компонентов IoT-системы // Проблемы региональной энергетики. 2019. № 1-1(40). С. 69-78. doi: 10.5281/zenodo.3239196.

12. Соловьёв И. В. Проблемы исследования сложной организационно-технической системы // Вестник МГТУ МИРЭА. 2013. № 1 (1). С. 20-40.

13. Запорожцев А. В. Моделирование технических систем // Фундаментальные исследования. 2014. № 8-6. С. 1288-1294.

14. Choi D., Sage A. P. A framework for interoperability assessments in Systems of Systems and Families of Systems // Information, Knowledge, Systems Management. 2012. Т. 11. № 3-4. С. 275-295.

15. Vasin S. A., Malikov A. A., Plakhotnikova E. V. Compatibility of Components in Complex Systems // Russian Engineering Research. 2018. Т. 38. С. 872-875. doi: 10.3103/S1068798X18110199.

16. Teppei Okamoto. A User Interface Design Method based on Quantitative Evaluation of Consistency in Device Operation // Electronics and Communications in Japan. 2018. Т. 101. № 2. С. 32-44. doi: 10.1002/ecj.12036.

17. Ginevicius R. Quantitative assessment of the compatibility of the development of socioeconomic systems // Journal of Competitiveness. 2019. Т. 11. № 2. P. 36-50. doi: 10.7441/joc.2019.02.03.

18. Stefani Agusta, Suharjito Suharjito, Abba Suganda Girsang. Effort Estimation Development Model for Web-based Mobile Application Using Fuzzy Logic // Telkomnika. 2018. Т. 16. № 5. С. 2082-2090.

19. Yuanyuan Zhou, Jiaming Zhu, Ligang Zhou, Huayou Chen, Tong Zheng. A new approach to fuzzy group decision making with trapezoidal fuzzy preference relations by using compatibility measure // Neural Comput & Applic. 2018. Т. 29. С. 1187-1203. doi: 10.1007/s00521-016-2627-7.

## References

1. Amirov YU. D. *Osnovy konstruirovaniya: tvorchestvo – standartizaciya – ekonomika* [Design basics: creativity-standardization-Economics]. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1991. 392 p. (in Russian).

2. Bochkov A. P., Gasyuk D. P., Filyustin A. E. *Modeli i metody upravleniya razvitiem tekhnicheskih system* [Models and methods for managing the development of technical systems]. Saint Petersburg, "Soyuz" Publ., 2003. 288 p. (in Russian).

3. Bochkov A. P. Svojstva promyshlennogo obrazca na rannih etapah ego sozdaniya [Properties of an industrial design at the early stages of its creation]. *Dostizheniya nauki i tekhniki: VIII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya: sbornik statej, CHast' 1 (Moskva, 30 aprelya 2017 g.)* [*Advances in Science and Technology: VIII international scientific and practical conference: collection of articles, Part 1 (Moscow, April 30, 2017)*]. Moscow, Nauchno-izdatel'skij centr «Aktualnost. RF». 2017. pp. 71-79 (in Russian).

4. Paramonov I. YU., Smagin V. A., Kosyh N. E., Homonenko A. D. *Modeli i metody issledovaniya slozhnyh sistem i obrabotki bol'shih dannyh* [Models and methods for research of complex systems and big data processing]. Saint Petersburg, Izdatel'stvo "Lan" Publ., 2020. 236 p. (in Russian).

5. Dubois D., Prad H. *Théorie des possibilités. Applications à la présentation des connaissances en informatique*. Masson. Paris. Milan. Barcalone. Mexico. 1988.

6. Shyi-Ming Chen. A new approach to inexact reasoning for rule-based systems. *Cybernetics and systems*, 1992, no. 23, pp. 561-582.

7. Didier Duboid, Henri Prade. Non-standard theories of uncertainty in knowledge representation and reasoning. *The Knowledge Engineering Review*, 1994, vol. 9, no. 4, pp. 399-416.

8. Boyko A. A., Degtyarev I. S. The Weight Coefficient Estimation Method of Elements in Organizational and Technical Systems. *Systems of Control, Communication and Security*, 2018, no. 2, pp. 245-266. Available at: http://sccs.intelgr.com/archive/2018-02/12-Boyko.pdf (in Russian).

9. Nosenkov A. A., Medvedev V. I., Suharev E. N. *Tekhnicheskaya sovmestimost' priborov kak osnova effektivnosti i kachestva sistem* [Technical compatibility of devices as a basis for efficiency and quality of systems]. *Journal of Instrument Engineering*, 2008, vol. 51, no. 8, pp 33-37 (in Russian).

10. Medvedev V. I. Ocenka parametricheskoj sovmestimosti slozhnyh apparaturnyh kompleksov [The estimation of the complicated hardware complexes parametrical compatibility]. *Reshetnevskie chteniya: materialy XIV Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii* [Reshetnev readings: proceedings of the XIV International scientific conference]. Krasnoyarsk, Sibirskij gosudarstvennyj aerokosmicheskij universitet imeni akademika M. F. Reshetneva, 2010, pp. 230-231 (in Russian).

11. Timenko A. V., Shkarupilo V. V., Olejnik A. A., Grushko S. S. Formal'naya model' proverki sovmestimosti komponentov IoT-sistemy [Formal model for checking compatibility of IoT system components]. *Problems of the Regional Energetics*, 2019, vol. 40, no. 1-1, pp. 69-78. doi: 10.5281/zenodo.3239196.

12. Solov'yov I. V. *Problemy issledovaniya slozhnoj organizacionno-tekhnicheskoj sistemy* [Problems of studying a complex organizational and technical system]. *Herald of MSTU mirea*, 2013, vol. 1, no. 1 (1), pp. 20-40 (in Russian).

13. Zaporozhcev A. V. Modelirovanie tekhnicheskih sistem [Modeling of technical systems]. *Fundamental Research*, 2014, no 8-6, pp. 1288-1294 (in Russian).

14. Choi D., Sage A. P. A framework for interoperability assessments in Systems of Systems and Families of Systems. *Information, Knowledge, Systems Management*, 2012, vol. 11, no. 3-4, pp. 275-295.

15. Vasin S. A., Malikov A. A., Plakhotnikova E. V. Compatibility of Components in Complex Systems. *Russian Engineering Research*, 2018, vol. 38, pp. 872-875. doi: 10.3103/S1068798X18110199.

16. Teppei Okamoto. A User Interface Design Method based on Quantitative Evaluation of Consistency in Device Operation. *Electronics and Communications in Japan*, 2018, vol. 101, no. 2, pp. 32-44. doi: 10.1002/ecj.12036.

17. Ginevicius R. Quantitative assessment of the compatibility of the development of socioeconomic systems. *Journal of Competitiveness*, 2019, vol. 11, no. 2, pp. 36-50. doi: 10.7441/joc.2019.02.03.

18. Stefani Agusta, Suharjito Suharjito, Abba Suganda Girsang. Effort Estimation Development Model for Web-based Mobile Application Using Fuzzy Logic. *Telkomnika*, 2018, vol. 16, no. 5, pp. 2082-2090.

19. Yuanyuan Zhou, Jiaming Zhu, Ligang Zhou, Huayou Chen, Tong Zheng. A new approach to fuzzy group decision making with trapezoidal fuzzy preference relations by using compatibility measure. *Neural Comput & Applic*, 2018, vol. 29, pp. 1187-1203. doi: 10.1007/s00521-016-2627-7.

**Статья поступила 11 марта 2020 г.**

## Информация об авторах

*Бочков Александр Петрович* – доктор технических наук, профессор. Профессор кафедры прикладной математики. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Область научных интересов: математическое моделирование; моделирование развития технических систем, сложных систем; информационные системы, информационные системы управления; моделирование совместимости программного обеспечения. E-mail: kostpea@mail.ru

Адрес: 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

*Барановский Анатолий Михайлович* – кандидат технических наук, доцент. Доцент кафедры информационные и вычислительные системы. Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I. Область научных интересов: моделирование сложных систем; информационные системы, оценка рисков информационных систем; контроль и диагностика технического состояния систем управления. E-mail: bamvka@mail.ru

Адрес: 190031, Россия, г. Санкт-Петербург, Московский пр., д. 9.

*Гильванов Ринат Гаффанович* – кандидат военных наук, доцент. Доцент кафедры информационные и вычислительные системы. Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I. Область

научных интересов: моделирование информационно-вычислительных систем. E-mail: gilvanon1950@mail.ru

Адрес: 190031, Россия, г. Санкт-Петербург, Московский пр., д. 9.

---

## Assessment of consistency and compatibility of technical systems in complex organizational and technical systems

A. P. Bochkov, A. M. Baranovskii, R. G. Gilvanov

***Problem statement.*** *The increasing complexity of the design of technical systems as part of complex organizational and technical systems makes it important to assess their compatibility and consistency at the early stages of development. The known methods for evaluating compatibility and consistency are based on a fairly extensive and detailed information base of source data and cannot be implemented in the conditions of significant uncertainty at the early stages of technical systems development.* ***The aim of this work*** *is to assess the coherence and compatibility of the circuitry of the technical system and the system itself in the composition of more complex systems, such as complex technical-organizational system, with the variant design of exploratory research with the new circuitry. It is proposed to evaluate consistency and compatibility based on a system of fuzzy rules that formalize the idea of the place of the developed sample of the technical system in the General new scheme of application as part of the organizational and technical system.* ***Used method.*** *When formalizing new conditions for the application of a technical system, evaluation methods are used based on fuzzy terms (linguistic variables, fuzzy numbers), complex fuzzy rules (with relations AND or OR) that formalize the interaction of the sample as part of a more complex system. Graph theory methods are used to construct interaction schemes. All the formulated rules are synthesized in a qualitative matrix, on the basis of which a qualitative vector of conditions is obtained, which characterizes the complexity (consistency and compatibility) of the sample technical system. An* ***element of novelty*** *in evaluating the consistency and compatibility of a technical system sample is the formalization of sample relationships by fuzzy rules, which are used to calculate an extended quality vector that reflects the consistency and compatibility of the sample.* ***The result of the study*** *is that the conditions and models for evaluating consistency and compatibility for the early stages of development are characterized. Algorithms for obtaining an extended qualitative vector and forming an indicator of consistency and compatibility of a sample of a technical system with a fuzzy term followed by normalization are developed. A specific calculation example is given based on a fuzzy system of connections of a conditional complex organizational and technical system. For this example, we used a complex fuzzy rule with the relation AND.* ***The practical significance of the work*** *is determined by the fact that the research results were used to assess the consistency and compatibility of the developed sample of the technical system. This improves the quality of work on creating a sample, and, consequently, its operational efficiency in the future. In addition, the practical significance is enhanced by the fact that the assessment of consistency and compatibility can be used in other applications, for example, when evaluating the compatibility of developed software, electronic computing, information systems, etc.*

***Key words:*** *development, technical system, algorithm, consistency and compatibility, evaluation, complex organizational and technical system.*

## Information about Authors

*Aleksandr Petrovich Bochkov* – Dr. habil. of Engineering Sciences, Full Professor. Professor of applied mathematics Department. Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University. Research interests: mathematical modeling; modeling of development of technical systems, complex systems; information systems,

management information systems; modeling of software compatibility. E-mail: kostpea@mail.ru

Address: Russia, 195251, Saint-Petersburg, Politekhnicheskaya Street, 29.

*Anatolij Mihajlovich Baranovskij* – Ph.D. of Engineering Sciences, Associate Professor. Associate Professor at the Department of Information and Computing systems. St. Petersburg state University of transport of the Emperor Alexander I. Research interests: modeling of complex systems; information systems, risk assessment of information systems; control and diagnostics of the technical condition of management systems. E-mail: bamvka@mail.ru

Address: Russia, 190031, Saint-Petersburg, Moskovskij prospekt, 9.

*Rinat Gaffanovich Gilvanov* – Ph.D. of Military Sciences, assistant professor of Department of Information and Computing Systems. St. Petersburg state University of transport of the Emperor Alexander I. Research interests: modeling of information and computing systems. E-mail: gilvanon1950@mail.ru

Address: Russia, 190031, Saint-Petersburg, Moskovskij prospekt, 9.