

ПРИМЕНЕНИЕ СЦЕНАРНОГО ПОДХОДА К ВЫБОРУ ВАРИАНТА ПЛАНИРОВАНИЯ РЕМОНТНО-ПРОФИЛАКТИЧЕСКИХ РАБОТ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Е.Б. Доронина, А.В. Скатков, Ю.В. Доронина (Севастополь)

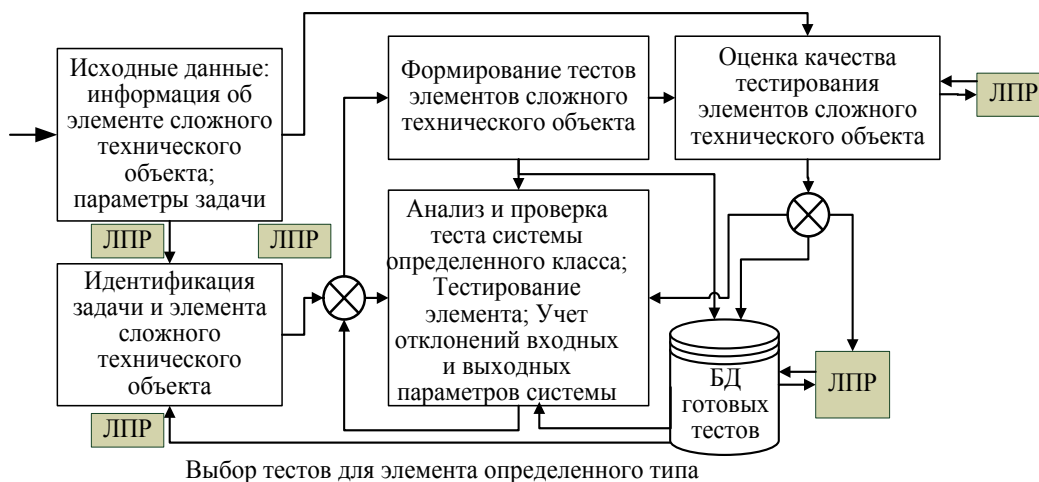
Важнейшими характеристиками сложных технических объектов ответственного применения (СТО ОП, далее – СТО) являются: потенциальная надежность, готовность, наработка на отказ и длительность жизненного цикла. Поддержание этих характеристик на должном уровне является первостепенной задачей специальных служб.

Техническое обслуживание и ремонт (ТОиР) представляет собой комплекс технологических операций и организационных действий по поддержанию исправности объекта при его использовании по назначению, ожидании, хранении и транспортировании; ТОиР могут быть как плановыми (регламентированными), так и неплановыми. Наряду с ТОиР применяются термины: (А) ремонтно-профилактические работы (РПР) – это комплекс мероприятий, направленных на предупреждение износа и содержания в работоспособном состоянии оборудования; (Б) контрольно-проверочные работы, которые проводятся с целью установления соответствия между техническим состоянием оборудования и заранее заданными допусками на возможные отклонения параметров изделий, изложенных в эксплуатационной документации и другие. В нормативной документации к типам СТО применяется различная трактовка и уточнение определений (А) и (Б).

С учетом формулировки РПР СТО определим технологический процесс обслуживания СТО [1]. Основной целью обслуживания является доведение параметров СТО до значений, заданных в нормативно-технических документах на основе достоверного определения и всесторонней оценки параметров, обслуживаемой СТО. Техническое обслуживание и ремонт СТО осуществляются при возможной неопределенности параметров процесса, поскольку задачи РПР в некоторых случаях не являются директивно определенными, а возникают обслуживание «по состоянию». Проблематика задач РПР обусловлена: сложностью и многокомпонентностью СТО, необходимостью многовариантного тестирования каждого элемента СТО, целесообразностью оценки полноты, частоты, длительности, интенсивности, избыточности при формировании планов РПР; наличием априорной неопределенности в состоянии элементов СТО и, как следствие: неопределенности в процессе управления РПР [2–6]. В связи с этим методы оценивания состояния аппаратуры и анализ эффективности работ по техническому обслуживанию требуют научной проработки, вследствие чего моделирование процессов РПР СТО является актуальным.

Цель исследования: определение вариантов РПР СТО формулировка сценарного подхода к выбору плана ремонтно-профилактических работ сложных технических объектов.

Для решения поставленной задачи предлагается формализовать схему процесса РПР СТО с целью оптимизации существующего процесса (рисунок 1).



Выбор тестов для элемента определенного типа

Рис.1 – Обобщенная структура процесса технического обслуживания и ремонта сложных технических объектов

Приведенная на рисунке 1 обобщенная структура основных процессов и задач РПР содержит следующие подсистемы: подсистема выявления элемента СТО, подлежащего обслуживанию и относящегося к конкретному классу систем; подсистема выбора задачи обслуживания, формирования и/или проверки теста для элемента СТО); подсистема тестирования и формирования базы данных (БД) тестов; подсистема оценки результатов (оценка выходных решений задачи). Идентификация задачи реализуется посредством соотнесения задачи на входе с элементами конечного множества задач, например, анализом и верификацией теста (на эталонном элементе), тестированием элемента СТО. В качестве примера реализации РПР рассмотрим сложное техническое устройство ответственного применения (СТУ), примем множество операций {O} (этапов РПР), которое в общем случае реализуется следующей последовательностью работ:

O1<Сопоставление устройства T, входящего в состав сложной технической аппаратуры, с документацией>;

O2 <Прием и идентификация элемента T1, входящего в состав устройства T>;

O3<Определение перечня Tn (типовых элементов замены), входящих в T, на которых реализован РПР>;

O4<Анализ существующего (сопутствующего) T3 на РПР для устройства T или его элементов Tn>;

O5<Анализ технической документации на T1 для определения уровня доработок, принятие решение о внесении доработок в рамках РПР>;

O6<Подбор соответствующей ремонтно-диагностической аппаратуры для осуществления необходимые действия для каждого Tn>;

O7<Распределение Tn по конструктивному исполнению между различными типами ремонтно-диагностической аппаратуры в соответствии с спецификацией устройства T>;

O8<Утверждение списка Tn для разработки на определенном виде аппаратуры согласно специализации>;

O9<Анализ технической документации на элемент T1 устройства T>;

O10<Подготовка библиотеки элементов, используемых в T1>;

O11<Разметка схемной документации на T1>;

O12<Определение способа подключения Т1 к ремонтно-диагностической аппаратуре. Отработка схемы жгута (адаптера). Отработка конструкторской документации на жгут>;

O13<Изготовление жгута (адаптера)>;

O14<Создание алгоритмов проверки, настройки и ремонта Т1>;

O15<Подключение Т1 к ремонтно-диагностической аппаратуре с помощью жгута (адаптера) и отладка алгоритмов проверки, настройки и ремонта Т1>;

O16<Отработка вспомогательного материала для диагностики и ремонта Т1>;

O17<Документальное оформление РПР (Инструкция проверки, схемная документация и т.д.), проверка ее в нормоконтроле>;

O18<Сдача РПР заказчику. Утверждение документации>;

O19<Сдача утвержденной документации в архив>;

O20 <Техническое сопровождение устройства Т в процессе эксплуатации>.

Технологический процесс РПР состоит из набора операций, заданных ЛПР с учетом регламента. Выполнение последовательности этих работ (операций) может быть отображено множеством различных путей на графе. Имеется некоторая обоснованная регламентом свобода выбора варианта пути. К двум основным вариантам относятся: директивно-заданный набор операций и набор, обусловленный опытом исполнителя (специализированный). На рисунке 2 показана возможная полная схема работ (вид технологического процесса (ТП)) РПР для приведенного множества операций O_i .

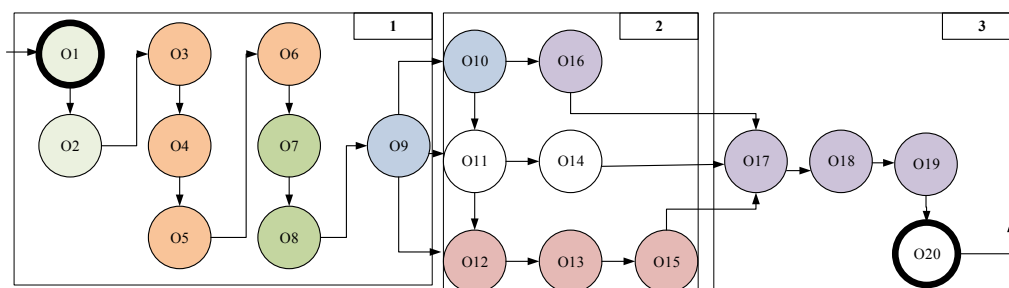


Рис.2 – Схема технологического процесса в рамках регламентных операций O_i для рассматриваемого СТУ

Особенностями ТП РПР, приведенного на рисунке 2, являются: сложный многокомпонентный состав; избыточность операций, как компенсация неопределенности, связанной со сложностью оборудования и возможных неполадок в его работе. Для организационно-технологических процессов, к которым относится ТП РПР рассматриваемого СТУ, возможно провести операцию укрупнения путем композиции некоторых этапов.

На схеме (рисунок 2) выделены некоторые укрупненные группы операций (УГО) технологического процесса исходя из спецификации операций: 1) $O1-O9$ – подготовительные операции $O_p, p \in P$; 2) $O10-O15$ – базовые операции РПР $O_b, b \in B$; 3) $O15-O20$ – обеспечивающие операции РПР $O_\omega, \omega \in \Omega$.

Полный РПР определяется на двух уровнях: на нижнем, как совокупность всех возможных операций РПР (по регламенту); на верхнем уровне УГО: $\Theta = O_p \times O_b \times O_\omega$, где $O_p, p \in P$, $O_b, b \in B$, $O_\omega, \omega \in \Omega$ – подмножества УГО из множества Θ РПР. Обозначим Z_p – как задачу, являющуюся источником требований выполнения операций из

подмножеств O_p, O_b, O_ω , Z – множество всех возможных задач обслуживания СТУ в рамках РПР. Считаем, что множество Θ является функционально полным, если выполняется условие: любая задача обслуживания $Z_j \in \{Z\}, j = \|J\|$ реализуется некоторой цепочкой операций $O_i \in \Theta : \forall z_i \in \{Z\} \exists O_i \in \Theta$.

В каждой УГО возможен выбор вариантов выполнения или обоснованного игнорирования определенных работ в заданных организационных условиях, в связи с чем образуется вариативность решений.

Под планом РПР СТУ понимается совокупность действий, направленных на осуществление технического обслуживания, ремонта и профилактики СТА, т.е. план – это последовательность операций, необходимых при тестировании сложной технической аппаратуры: ($Oper1=O1, Oper2=O2, \dots, OperJ=OJ$), $O_i \in \Theta$. Планов реализации операций может быть много, они образуют допустимое множество последовательностей операций.

Формирование совокупности операций в плане реализуется на основе бинарного вектора $x = \langle x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1J} \rangle$, построенного на основе булевых переменных, равных единице, если осуществляется j -й вариант выполнения операций на n -м этапе, и равных нулю в противном случае:

$$\Pi_{NJ} = \langle x_{11} \cdot Oper1, x_{12} \cdot Oper2, \dots, x_{1N} \cdot OperJ \rangle. \quad (1)$$

В условиях, связанных с оперативным решением задач, или реализующих решения ЛПР, точный регламент работ (совокупность операций) не во всех случаях может быть осуществлен, что порождает неопределенность, вариативность и, как следствие – необходимость принятия решений по выбору варианта совокупности операций.

На основе выбранных элементов (операций) в каждой УГО могут быть сформированы сценарии реализации ТП РПР, связанные с конкретным типом организации РПР (например, оперативный ремонт; полный ремонт и диагностика; проверка, заданная ЛПР). Для упорядочения операций в составе ТП в случаях нестандартных решений предлагается определить ряд сценариев.

Из множества допустимых планов формируются типовые подмножества, которые будем называть сценарием. Например, пусть имеются планы 1,2,3,4,5 и 6, из которых можно сформировать три сценария, основанные на планах: первый сценарий – 1,2, второй – 3, 4, 6 и третий – 5.

Таким образом, под сценарием будем понимать последовательность операций $O_i \in \Theta$, при условии, что $\exists O_p, p \in P, O_b, b \in B, O_\omega, \omega \in \Omega$ из подмножеств УГО. Таким образом, определим сценарий как некоторый план или совокупность планов РПР

$$C_j : \tilde{\Pi}_{NJ} = \langle x_{11} \cdot O_1, x_{12} \cdot O_2, \dots, x_{1N} \cdot O_J \rangle; O_i \in \{O_p, O_b, O_\omega\}, O_i \subseteq \Theta. \quad (2)$$

$$C_j = \langle x_i \cdot O_i | O_i \subseteq \Theta \rangle; x = \langle x_1, x_2, \dots, x_J \rangle. \quad (3)$$

Следует отметить, что для $\tilde{\Pi}_{NJ}$ в (2) C_j в (3) и не всегда справедливо $O_p \cup O_b \cup O_\omega$ в Θ . Это условие отражает возможную операционную неполноту сценариев, например в случае оперативного РПР с сокращением некоторых операций для обеспечения заданного времени выполнения (сокращение за счет дополнительных или избыточных операций, в основном из УГО: $O_p, p \in P, O_\omega, \omega \in \Omega$ в рамках текущей задачи $Z_j \in \{Z\}, j = \|J\|$). Для рассматриваемого СТУ множество вариантов реализации РПР представлено в виде сценариев (С1–С4), приведенных в таблице 1

Таблица 1 – Возможные задачи обслуживания СТУ

Сценарий	Содержание сценария
С1	Оперативный ремонт Т1, выбор базовых задач (минимальный, но достаточный набор операций РПР Т1)
С2	Квазиоптимальная диагностика Т1
С3	Полная проверка Т1, полная реализация задач (максимальный, но не избыточный набор операций РПР Т1)
С4	Задачи, предложенные ЛПР (набор операций РПР, по мнению ЛПР)

Таблица 1 и перечень наименования задач являются морфологическим описанием вариантов реализации РПР, С1–С4. Список признаков, определяющий вариант морфологического множества, представляет его признаковый образ.

Учитывая наработанный опыт исследователей в области формирования мер сходства [6–8], проведем анализ сходства сценариев C_i и C_j , на основе оценки эквивалентности сценариев выполнения наборов определенных операций

$$Z(C_j^1, C_j^2) = \frac{2m(C_i \cap C_j)}{(1+u)(m(C_i) + m(C_j) - 2um(C_i \cap C_j))}, \quad (4)$$

где u – константа, определяющая вид меры сходства вариантов, $-1 \leq u \leq \infty$; $m(C_i)$ – обозначение числа элементов множества C_i .

Морфологическое множество операций, распределенных по каждому сценарию с учетом описанных ранее спецификаций базовых операций и добавленных в сценарий, приведено в таблице 2. На основании данных таблицы 1 и с учетом (4) рассчитаны оценки на основе меры сходства: по Чекановскому-Серенсену и по Жаккару (таблица 3), что может быть использовано для принятия решений по выбору наилучшего сценария в конкретных случаях (например, в случае крайнего дефицита времени).

В таблицах 3,4 оценки бинарной меры сходства по Чекановскому-Серенсену в целом аналогичны оценкам, полученным на основе меры Жаккара для конечных множеств сравниваемых объектов по определенным признакам [7-9].

Среднее по оценкам на основе меры по Чекановскому-Серенсену равно 0,88, среднее отклонение – 0,041, для оценок на основе меры по Жаккару эти величины составляют соответственно 0,75 и 0,042. Максимальное сходство выявлено у сценариев С2 и С4, так как специфика этих сценариев связана с выборочной диагностикой и ремонтом устройства (для С4 – на основе задач, предложенных ЛПР, а для С2 – на основе регламентных работ). Таким образом, при условии высокой квалификации исполнителя (и/или ЛПР), сценарии С4 и С2 могут быть квазиэквивалентными.

При добавлении в РПР операции Об, соответствующей проверке исправности и работоспособности ремонтно-диагностического оборудования, например, в случае решения оперативной задачи диагностики, приведена в таблице 4, а оценка мер сходства сценариев приведена в таблице 5.

Среднее по оценкам на основе меры по Чекановскому-Серенсену 0,88, среднее отклонение 0,05, для оценок на основе меры по Жаккару, эти величины составляют 0,77 и 0,065. При добавлении в РПР операции, соответствующей проверке исправности ремонтно-диагностического оборудования, тенденция зависимости между сценариями С2 и С4 осталась прежней (в обоих случаях важна квалификация исполнителя и/или

участие ЛПП, что приводит к возможному сходству сценариев в определенных ситуациях).

Таблица 2 – Морфологическое множество операций в сценариях РПР

Сценарии, С/ Операции, О	C1	C2	C3	C4
O1	0	0	1	1
O2	1	0	1	1
O3	0	1	1	1
O6	0	0	1	0
O7	1	0	1	0
O16	0	1	1	1
O18	1	1	1	0
O19	1	1	1	0
O20	1	1	1	0
Операции O4, O5, O8-O15, O17 присутствуют во всех сценариях				

Таблица 3 – Значения попарных мер сходства сценариев РПР по двум мерам

Оценка меры сходства сценариев	на основе меры Чекановского-Серенсена, $u=0$	на основе меры Жаккара, $u=1$
C(C1,C2)	0,88	0,78
C(C3,C4)	0,86	0,75
C(C1,C3)	0,89	0,8
C(C1,C4)	0,77	0,63
C(C2,C3)	0,89	0,8
C(C2,C4)	0,97	0,75

Таблица 4 – Морфологические множество операций в сценариях РПР с учетом добавленной операции O6

Сценарии, С/ Операции, О	C1	C2	C3	C4
O1	0	0	1	1
O2	1	0	1	1
O3	0	1	1	1
O6	1	1	1	0
O7	1	0	1	0
O16	0	1	1	1
O18	1	1	1	0
O19	1	1	1	0
O20	1	1	1	0
Операции O4, O5, O8-O15, O17 присутствуют во всех сценариях				

Таблица 5 – Значения мер сходства сценариев с учетом добавленной операции O6

Оценка меры сходства сценариев	на основе меры Чекановского-Серенсена, $u=0$	на основе меры Жаккара, $u=1$
C(C1,C2)	0,88	0,79
C(C3,C4)	0,86	0,75
C(C1,C3)	0,92	0,85
C(C1,C4)	0,75	0,6
C(C2,C3)	0,92	0,85
C(C2,C4)	0,94	0,75

На рисунке 3 приведено сравнительное описание рассчитанных мер сходства сценариев с помощью наборов необходимых операций при введении операции O6 (для оперативного ремонта).

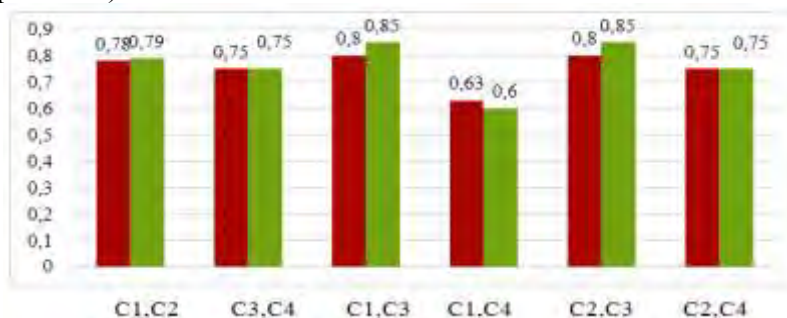


Рис. 3 – Результаты расчёта мер сходства сценариев с введенной операций O6 (оперативный ремонт СТУ)

Исходя из сравнения результатов, видно, что сходство сценариев С2 и С4 (С2 – квазиоптимальный ремонт или диагностика, С4– перечень операций, предложенный ЛПР) при изменении состава операций незначительно изменяется. Внедрение ресурсоемкой операции в состав сценария незначительно меняет оценки мер сходства сценариев, и это не отражает действительность, поскольку, задаваемые ЛПР операции, могут значительно отличаться от выбранного сценария С2. Важность операций в оценке их сходства не учитывается, что значительно снижает применимость приведенных оценок [10].

Предлагается следующая мера сходства сценариев C_i и C_j , учитывающая важность каждой операции в сценарии:

$$\tilde{Z}(C_i, C_j) = \frac{2k_{ij}m(C_i \cap C_j)}{\sum_{i=1}^I k_{C_i}m(C_i) + \sum_{j=1}^J k_{C_j}m(C_j)}, \quad (5)$$

где $\tilde{Z}(C_i, C_j)$ – модифицированная мера сходства; $m(C_i)$ – обозначение числа элементов множества C_i ; k_{C_i} , k_{C_j} – коэффициенты важности операций i и j соответственно, задаваемые ЛПР, k_{ij} – среднее значение среди группы пересечений в рассматриваемых парах.

Сравнительное описание полученных мер сходства сценариев РПР с учетом весов операций приведено на рисунке 4. Изображенные на рисунке 4 результаты расчетов мер сходства сценариев с учетом весов операций имеют тенденцию, подтверждающую результаты, приведенные на рисунке 3, выраженную в том, что близость сценариев в целом сохранилась, однако для некоторых операций, например, С1:С3 = 0,8:0,85 (рис.3), и С1:С3 = 0,982:0,889 (рисунок 4) наблюдаются определенные отличия.



Рис.4 – Результаты расчёта мер сходства сценариев РПР с учетом весов операций

Расчеты оценок включения одного сценария в другой на основе соответствия операций, показывают различные подходы к формированию сценариев: с полным или частичным включением операций в сценарий. Например, сценарий С4 полностью входит в сценарий С3, который соответствует полному набору операций. Сценарии С1 и С2 идентичны по входящим в них операциям (С1 – оперативный ремонт, соответствующий выбору базовых задач, а С2 соответствует оптимальной диагностике СТУ). Однако, в определённом случае С2 может иметь иной набор операций, что повлечет разницу в показателе включения. Таким образом, оперативное изменение состава операций в сценарии, задаваемого ЛПР, влечет за собой необходимость решения по возможному управлению этим процессом. Этот подход позволил применить данные оценки для построения подсистемы в системе принятия решений по выбору операций в определенном сценарии.

На рисунке 5 приведена укрупненная схема системы поддержки принятия решений (СППР) с подсистемой оценки параметров сходства сценариев ТП РПР СТУ.

Представленная на рисунке 5 (модель ТО-ВЕ «как будет») схема является модификацией схемы РПП рисунка 1 (модель AS-IS «как есть») [11].



Рис. 5 – Укрупненная схема системы поддержки принятия решений (СППР) с подсистемой оценки параметров сходства сценариев ТП РПП СТУ

Модификация осуществлена на основе введенной СППР с подсистемой оценки параметров сходства (и включения) сценариев ТП РПП СТУ, что позволяет снизить участие ЛППР и влияния опыта сотрудников на принимаемые решения, например, вновь вводимый сценарий ТП РПП, который совпал по набору операций с отработанным, становится эквивалентным ему и организация работ по полученному сценарию не потребует дополнительных ресурсов. В другом случае, новый сценарий, значительно отличающийся от существующих, потребует временных и других ресурсов для внедрения [12].

Моделирование элементов системы принятия решений по выбору варианта планирования РПП СТО приведено на рисунке 6.

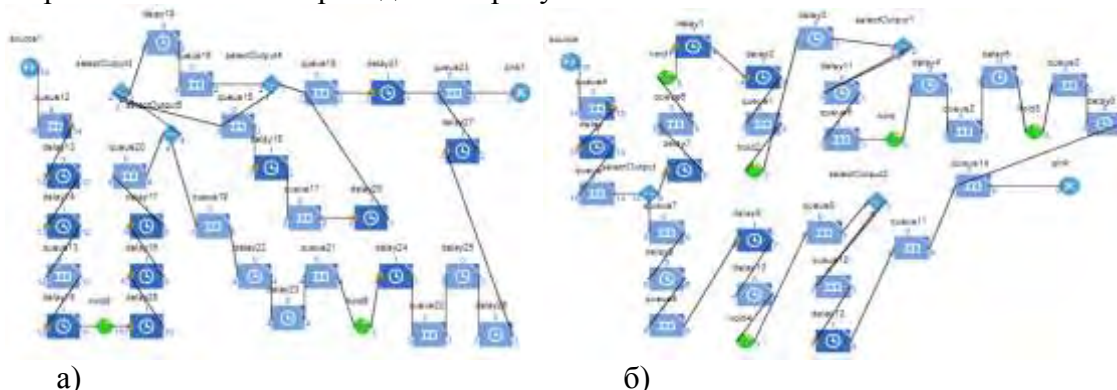


Рис.6 – Укрупненная схема моделей принятия решений по выбору варианта сценария ТП РПП СТО: а) – схема модели AS-IS «как есть»; б) – схема модели ТО-ВЕ «как будет» (с учетом применения СППР)

На рисунке 6,а приведена схема модели вида «как есть», соответствующая рисунку 1, отличительной особенностью которого является распределенное принятие решений на нескольких участках ТП РПП.

Приведенная на рисунке 6,б модель отражает предложенный прототип СППР с элементами выбора варианта сценария реализации ТП, что позволило сконцентрировать процесс принятия решений и снизить зависимость решений от опыта специалистов. Результаты на выходе моделей (рисунок 6) значительно отличаются (в первом случае три, во втором девять выполненных операций), в рамках единого модельного времени и идентичных начальных условий, что отражает преимущество принятия решений СППР.

Предложенный подход к анализу эквивалентности сценариев позволил получить не только качественные, но и количественные оценки, что может быть использовано для моделирования принятия решений по выбору наилучшего сценария в конкретных случаях (например, в случае крайнего дефицита времени или других ресурсов). Модифицированная мера сходства сценариев с учетом их важности позволила уточнить оценки сходства сценариев в случаях значительного различия важности операций, что в ситуациях дефицита ресурсов даст возможность количественно оценить особенности выбранного сценария РПР.

Укрупненная схема СППР, предложенная авторами, с подсистемой оценивания параметров сходства сценариев ТП РПР СТУ, позволит снизить интенсивность участия опытных сотрудников и/или ЛПР в определении необходимого набора работ (операций) в рамках одного сценария для решения задач ремонта и диагностики СТУ, то есть формирования сценария, а регулирование этого процесса повысит его эффективность.

Дальнейшее направление исследований планируется вести в области уточнения структуры отдельных подсистем, предложенной СППР, исследования связи новых сценариев и сложности их реализации, а также получения количественных мер сложности ТП РПР СТУ и СТО в целом.

Литература

1. ГОСТ 27.002-89 «Надежность в технике Основные понятия. Термины и определения» (дата обращения: 15.03.2020).
2. **Алексеев В.В., Хоменко И.В., Прохорский Р.А.** Модели планирования ремонтов и замен элементов в процессе жизненного цикла сложных технических систем // Вестник ВИ МВД России. 2011. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modeli-planirovaniya-remontov-i-zamen-elementov-v-protsesse-zhiznennogo-tsikla-slozhnyh-tehnicheskikh-sistem> (дата обращения: 20.07.2020).
3. **Бурков В.Н., Коргин Н.А., Новиков Д.А.** Введение в теорию управления организационными системами. М.: Либроком, 2009. 264 с.
4. **Никифоров В.О., Слита О.В., Ушаков А.В.** Интеллектуальное управление в условиях неопределенности: учебное пособие // СПб: СПбГУ ИТМО. 2011. 226 с.
5. **Городецкий В.И., Троицкий Д.В.** Сценарная модель и язык описания знаний для оценки и прогнозирования ситуаций // Тр. СПИИРАН. 2009. № 8. С. 93–127.
6. **Дубров А.М., Мхитаряч В.С., Трошин Л.И.** Многомерные статистические методы. – М.: Финансы и статистика, 1998. – 369 с.
7. **Семкин Б.И., Двойченков В.И.** Об эквивалентности мер сходства и различия. // Исследование систем. 1. Сложные системы. Владивосток: ДВНЦ, 1973. – С. 95- 104.
8. **Sorensen T.** A method of establishing groups of equal amplitude in plant sociology based on similarity of species content // Kongelige Danske Videnskabernes Selskab. Biol. krifter. Bd V. № 4. 1948. P. 1-34.
9. **Czekanowski J.** Zur differential Diagnose der Neandertalgruppe // Korrespbl. Dtsch. Ges. Anthropol. 1909. Bd 40. S. 44-47.

-
10. **Уздин Д.З.** Новые меры близости, функции состояний и решающие правила в теории распознавания состояний (статистической классификации) // М.: МАКС Пресс. 2016. 128 с.
 11. Семейство методологий процесса моделирования IDEF Режим доступа - <http://idef.ru/idef.php> (дата обращения: 08.10.2020).
 12. **Арепин Ю.И., Смоляков А.А., Допира Р.В.** Военная кибернетика: методология создания автоматизированных систем управления техническим обеспечением. Монография, ЗАО НИИ «Центрпрограммсистем» – г. Тверь, 2006 г. – 204 с.