

СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ АНАЛИЗА СТАТИСТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ МОДЕЛИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

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

Принятие решений по повышению эффективности функционирования сложных технических систем (СТС) связано, в первую очередь с построением моделей, отражающих процессы, протекающие в СТС.

В различных источниках различают несколько аспектов понятия «устойчивость». Устойчивость модели по отношению к изменениям ее параметров означает сохранение аппарата моделирования, основных связей между переменными, типов ограничений в некотором интервале ее параметров [1, 2]. Другим аспектом устойчивости является устойчивость решения задачи (результатов) моделирования (обнаруженных свойств, сценариев, траекторий, состояний) по отношению к изменениям параметров модели или начальных условий. Иногда устойчивость является целью практического моделирования. Практически СУ трактуется исследователем самым различным образом, как правило, используются оценки повторяемости и монотонное уменьшение длины доверительного интервала по мере роста числа реализаций при фиксированной доверительной вероятности [3, 4].

Мера статистической устойчивости (СУ) модели M_x может быть определена различными способами в зависимости от целей исследования и типа исследуемого объекта. В качестве оценочного параметра примем γ^{M_x} (как оценку текущей статистики модели M_x), представляющего интерес для исследования статистики по полученным результатам экспериментов в виде вектора (в простейшем случае – скаляра) θ . Пусть $\tilde{\gamma}$ – заданная ЛПР оценка статистики модели M_x ; $\Delta\gamma$ – мера близости текущей и заданной оценок статистики модели M_x ; i – число повторов репликаций модели; ε – точность модели; p – доверительная вероятность оценки параметров.

Вопросы планирования экспериментов исследовались многими авторами, один из возможных подходов будем использовать в следующем виде. Планы имитационных экспериментов ММ могут быть представлены в виде кортежа $\Pi(n, l, k, \theta)$, где n – скаляр, задающий число реплицированных переходов (сгенерированных цепочек ММ), $n = |N|$; l_m – длина m -ой репликации (длина цепи Маркова), $l = |L|$; k – кратность репликаций, $k = |K|$; $\theta_{n,l,k}$ – многомерная матрица, которая может содержать результаты первичной статистики, на основе которой будет оценена статистическая устойчивость (в общем случае вектор, в простейшем случае – скаляр). Таким образом, если обозначить D – множество допустимых планов ($J = |D|$), то $\Pi_j(n_j, l_j, k_j, \theta_j)$ – реализуемый план.

Модель M_x , реализованная в рамках одной из видов математических схем моделирования является статистически устойчивой, если для квалиметрической оценки ее устойчивости, начиная с некоторых $n_i \geq n_0$, $l_i \geq l_0$, $k_i \geq k_0$ будет выполняться условие

$$|\gamma^{M_x}(\theta(n_i, l_i, k_i)) - \tilde{\gamma}|_{\varepsilon, p} \leq \Delta\gamma \quad (1)$$

Следовательно, модель M_x может быть определена в общем случае как k – статистически устойчивая (n -, l -, ε -, p – статистически устойчивая) на основе заданного плана экспериментов $\Pi(n, l, k, \theta)$.

Таким образом, если при исследовании СТС на основе ММ по схеме: $schema A: \|P_{ij}\| \xrightarrow{M_v} \|P_{ij}^{M_x}\| \xrightarrow{M_m} \|\theta\|$ отклонение $\|P_{ij}^{M_m}\|$ в модели M_m не превысит заданную ЛПР величину $\tilde{\theta}$, то для плана экспериментов $\Pi(n, l, k, \theta)$ модель M_x будет считаться $\theta(k$ -, ε -, p -) – статистически устойчивой и обозначаться $\gamma_k^{M_x}, \gamma_\varepsilon^{M_x}, \gamma_p^{M_x}$.

Таким образом, очерченный круг задач определяет область исследования в рамках квалиметрического анализа моделей. Актуальность постановки задачи связана с вопросами практического характера, когда результаты анализа функционирования СТС оказываются

нерепрезентативными и недостоверными, либо для достижения положительных исходов моделирования требуется избыток ресурсов.

Постановка задачи и подход к ее решению на основе предложенной СППР

Пусть общий ресурс системы описывается переменной Ψ , $\psi(t_i) \in \Psi$ – остаточный ресурс СТС. Состояние СТС на следующем шаге t_{i+1} оценивается Q – эффективностью принимаемого решения по профилактике или резервированию, что повлечет прирост ресурса $\psi(t_{i+1}) \in \Psi$; S – стратегия обслуживания СТС, при которой принимается эффективное решение, s_i – текущая стратегия, при которой достигается некоторая эффективность q_i . Таким образом, принимаемое решение есть функция $F(q_i, s_i)$, а эффективность обслуживания описывается функционалом

$$Q = \Phi(q_i, s_i, F(q_i, s_i), \psi(t_{i-1}), t_i).$$

Для достижения наилучшего результата обслуживания СТС по текущей стратегии s_i необходимо учитывать особенности квалиметрического анализа моделей. При статистических испытаниях для достижения наилучшего результата предполагается целесообразным проведение достаточного количества запусков модели [4-5]. Возникает необходимость определения достаточности выборки. ММ строится по схеме А, где $\|P_{ij}\|$ – матрица переходов ММ; $\|P_{ij}^{M_m}\|$ – «восстановленная» матрица переходных вероятностей, содержащая статистические оценки P_{ij} , (именно эта матрица будет использована для анализа статистической устойчивости модели M_x) в следующем фазовом пространстве состояний системы: $S = \{S_0, S_1, S_2, S_3, S_4\}$, где S_0 – рабочее состояние, S_1 – состояние отказа, S_2 – состояние восстановления системы после отказа, S_3 – состояние профилактики (в модели не фиксируется – работает или простаивает система в момент профилактики), S_4 – состояние сбоя – это состояние, из которого может быть осуществлен переход в состояние отказа, в след за которым требуется восстановление, либо в начальное состояние без восстановления. На рис.1 приведены: а) укрупненное множество состояний СТС, б) граф переходов сложного технического объекта, в табл.1 – исходные вероятности переходов для имитационного моделирования.

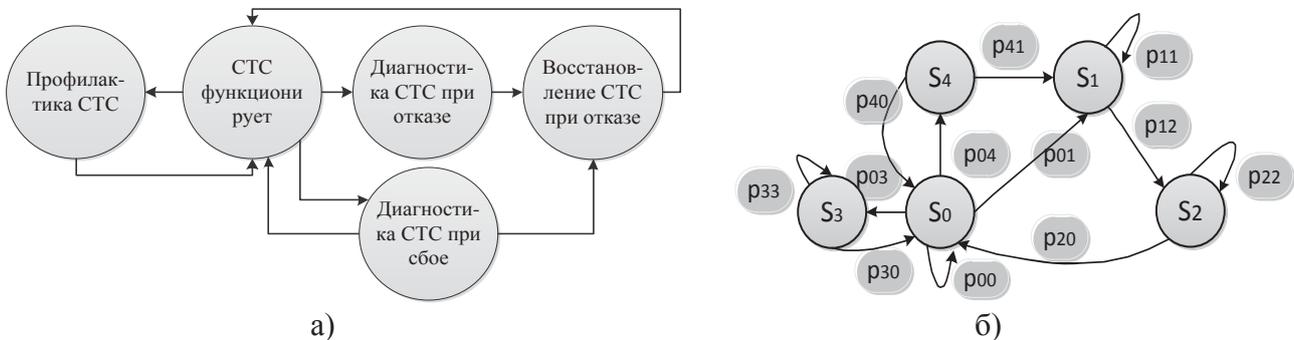


Рис. 1. Схемы функционирования СТС: а) укрупненное множество состояний СТС, б) граф переходов в состояния системы со сбоями, восстановлениями и профилактикой

Зададим для примера значения исходной матрицы вероятностей переходов $\|P_{ij}\|$ с учетом $P_{ij} \approx \frac{1}{l}$.

$$P_1 = \begin{pmatrix} 0.35 & 0.25 & 0 & 0.20 & 0.20 \\ 0 & 0.50 & 0.50 & 0 & 0 \\ 0.55 & 0 & 0.45 & 0 & 0 \\ 0.55 & 0 & 0 & 0.45 & 0 \\ 0.55 & 0.45 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \tag{2}$$

На рис. 2. представлены результаты моделирования (значения матрицы $\|P_{ij}^{M_m}\|$) на основе специального модуля, разработанного для решения представленной задачи. План экспериментов имеет вид: $P(100, 100, k, \theta)$, где $l=100$, $n=50$, $k=5, 10, 15$ и $\theta_{n,l,k}$ используется для оценки $\Delta \gamma_{\epsilon_1, p_1, k_1}^{M_1}$. Зеленым обозначены значения элементов матрицы $\|P_{ij}^{M_m}\|$, отличающиеся от значений элементов матрицы $\|P_{ij}\|$ менее, чем на $\epsilon = 0.01$.

| S | S ₀ | S ₁ | S ₂ | S ₃ | S ₄ |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| S ₀ | 0.352 | 0.238 | 0 | 0.208 | 0.202 |
| S ₁ | 0 | 0.467 | 0.533 | 0 | 0 |
| S ₂ | 0.540 | 0 | 0.460 | 0 | 0 |
| S ₃ | 0.558 | 0 | 0 | 0.442 | 0 |
| S ₄ | 0.605 | 0.395 | 0 | 0 | 0 |

а)

| S | S ₀ | S ₁ | S ₂ | S ₃ | S ₄ |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| S ₀ | 0.348 | 0.255 | 0 | 0.202 | 0.195 |
| S ₁ | 0 | 0.511 | 0.489 | 0 | 0 |
| S ₂ | 0.545 | 0 | 0.455 | 0 | 0 |
| S ₃ | 0.563 | 0 | 0 | 0.437 | 0 |
| S ₄ | 0.498 | 0.502 | 0 | 0 | 0 |

б)

| S | S ₀ | S ₁ | S ₂ | S ₃ | S ₄ |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| S ₀ | 0.333 | 0.267 | 0 | 0.221 | 0.179 |
| S ₁ | 0 | 0.507 | 0.493 | 0 | 0 |
| S ₂ | 0.607 | 0 | 0.393 | 0 | 0 |
| S ₃ | 0.522 | 0 | 0 | 0.478 | 0 |
| S ₄ | 0.505 | 0.495 | 0 | 0 | 0 |

в)

Рис. 2. Результаты моделирования СТС: а) k=5, б) k=10, в) k=50

Визуальный анализ рис.2 дает представление СУ модели M_x : чем больше элементов матрицы, окрашенных в зеленый цвет, тем выше ее СУ. Повышение СУ модели СТС обусловлено ростом числа реализаций процесса. Однако, в процессе моделирования было выявлено расхождение результатов при дальнейшем росте числа реализаций.

На основании полученных численных показателей надежности СТС и построенных графиков распределений, ЛПР получает возможность принимать решения следующих типов:

(1) определить предполагаемую длительность безотказной работы СТС до предотказного и предельного состояний, изменяя некоторые параметры как СТС, так и учитывая условия работы устройств;

(2) при задаваемом времени работы СТС (или их компонентов) находить вероятности безотказной работы [7].

На рис. 3 схематически изображены результаты моделирования моментов времени переноса предельного состояния(ПрС) при изменении интенсивности профилактических работ. Условия моделирования: Значения параметров модели:-0,5 - коэффициент интенсивности профилактических работ СТС;-0,3 - коэффициент с усиленной интенсивностью профилактических работ. Моделирование проводилось в среде Maple.

На рис. 3 можно видеть, что при изменении значений времен начала профилактики: при ограничении на показатель эффективности СТС в целом 1,5 (условных единиц) время ПрС изменилось с 5 мес. (красные пунктирные вертикали) до 6.52 мес. (зеленые пунктирные вертикали); а при ограничении на показатель эффективности АД и ЭУ в целом в 3 условные единицы; время наступления ПрС изменилось с 3.6 (красные пунктирные вертикали) до 4.2 (зеленые пунктирные вертикали) месяцев при условии экспоненциального вида кривой деградации.

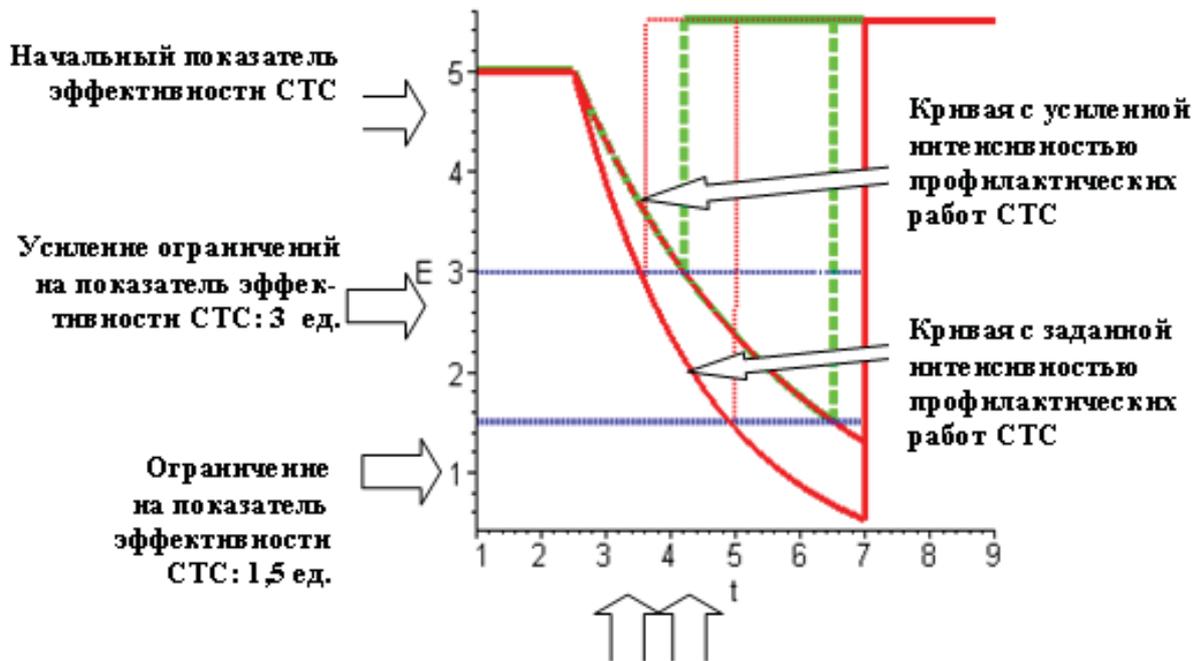


Рис.3. Результаты моделирования моментов времени переноса ПрС при изменении интенсивности профилактических работ СТС

При наличии у ЛПР требований к точности оценки показателей режимов СТС диапазоне $\varepsilon = 0.01..0.025$ и требуемого прироста ресурса, $\psi(t_i) \in \Psi$, позволяющего проводить не более, чем $k = 20$ репликаций модели при изменении числа реплицированных переходов (сгенерированных цепочек ММ) от 100 до 200, на рис.4 схематически показан принцип, позволяющий принимать решения по дополнительному проведению профилактических работ.

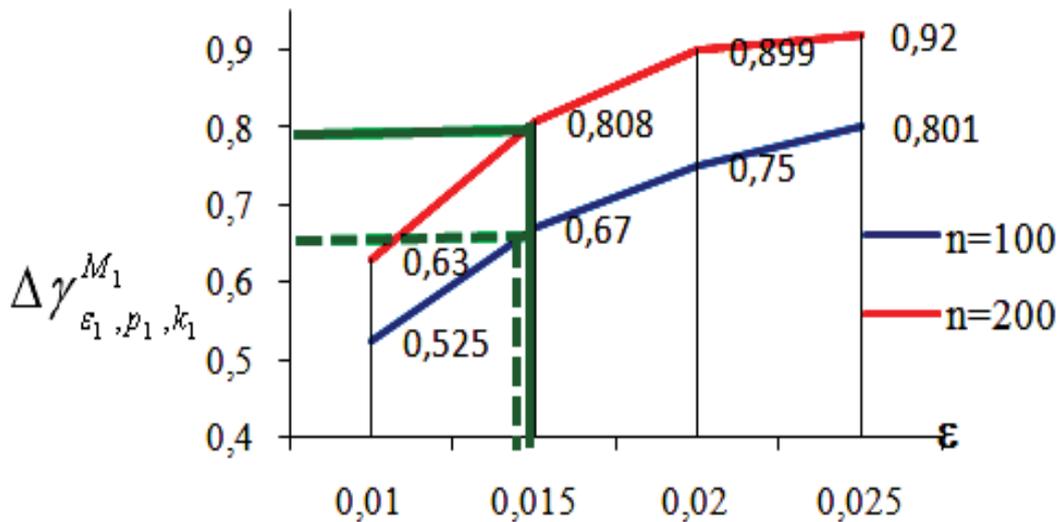


Рис. 4. Оценки СУ $\Delta \gamma_{\varepsilon_1, p_1, k_1}^{M_1}$ при изменении числа реплицированных переходов

Для $\varepsilon = 0.015$, оценка СУ по мере $\Delta \gamma_{\varepsilon_1, p_1, k_1}^{M_1}$ колеблется от 0,67 до 0,81, что весьма существенно при принятии решений о наличии проблемной ситуации при исследовании перехода в состояние отказа. Если требования к ресурсам не позволяют проводить дополнительные запуски модели в увеличить число реплицированных переходов, то модель может считаться $\Delta \gamma_{\varepsilon_1, p_1, k_1}^{M_1}$ устойчивой при $\varepsilon = 0.015, n = 100, k = 20$.

Структура модели управления поддержкой обслуживания сложной технической системы содержит следующие подсистемы: подсистема квалиметрического анализа моделей (ПКАМ), подсистема формирования полимодельного комплекса (ПФПМК), подсистема сбора и обработки данных с первичных источников (ПСОД ПИ), подсистема распределения работ (ПРР), подсистема поддержки обслуживания сложной технической системы (ППС СТС), рис 5.

В некоторый момент времени $t_i, t_0 < t_i < t_{i+1} \leq T$ на вход ПСОД ПИ поступает информация о необходимости анализа функционирования СТС, причем эта информация может быть обусловлена как текущей необходимостью, так и некоторым случайным возмущением ξ .

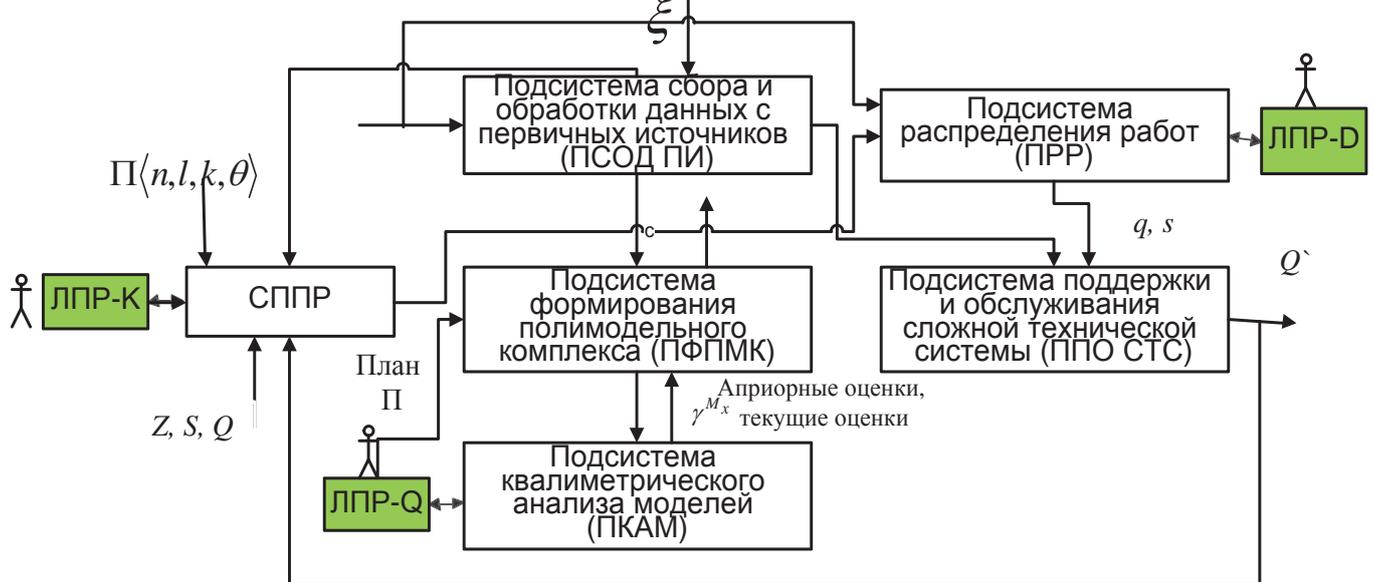


Рис.5.Схема управления системой поддержки обслуживания СТС

ЛПП на основе формирования ПФПМК и решения задачи анализа СУ некоторой модели может определить эффективную стратегию обслуживания СТС с учетом найденной характеристики СУ. То есть, зная заданный общий ресурс системы Ψ и $\psi(t_i) \in \Psi$ – остаточный ресурс, то возможно сформировать стратегию обслуживания, при которой принимается эффективное решение с учетом некоторой заданной меры СУ в рамках множества.

Заключение

Поддержка решений при мониторинге функционирования и прогнозирования параметров СТС не всегда может быть решена только на основе экспертной системы. Исследование статистической устойчивости в задачах квалиметрического анализа квазиоднородной модели сложных систем процессов функционирования СТО, особенно на границе изменения этапов его жизненного цикла, например, при переходе к режиму деградиционных изменений, режиму устаревания, или, напротив, совершенствования, сопряжено с рядом принципиальных особенностей, которые могут ограничить использование принятых статистик.

В связи с многомерностью планов экспериментов, сложностью задач квалиметрического анализа моделей, рассмотрение статистической устойчивости в общем виде не представляется возможным. Перспективным является конструктивный подход к определению мер СУ, который был реализован для СТС. Преимуществом предложенного подхода является учет качества модели на основе меры ее СУ, что позволит принимать решения по проведению обслуживания СТС не только конструктивного, но и модельного уровня в рамках допусков, заданных ЛПП.

Предложенная структура системы поддержки и принятия решений по рабочим режимам может быть полезна в области практического применения полученных результатов для исследования функционирования СТС, в том числе в критических условиях и на этапе деградации их свойств.

Литература

1. Panella I., Hardwick G. Model Oriented System Design Applied to Commercial Aircraft Secondary Flight Control Systems. In: Obaidat M., Ören T., Rango F. (eds) Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications. // SIMULTECH 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 873. Springer, Cham. 2019. pp. 55-76.
2. Ростовцев Ю. Г., Юсупов Р. М. Проблема обеспечения адекватности субъектно-объектного моделирования // Известия вузов. Приборостроение. 1991. № 7. С. 7–14.
3. Микони С. В., Соколов Б. В. Юсупов Р. М. Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов: монография / С. В. Микони, Б. В. Соколов, Р. М. Юсупов. // М.: РАН, 2018. 314 с
4. Gorban I.I. The Statistical Stability Phenomenon// Springer, 2017. 361 p.
5. Боев В. Д. Исследование адекватности GPSSWorld и AnyLogic при моделировании дискретно-событийных процессов: Монография. 2011. URL: www.xjtek.ru . (дата обращения 20. 02. 2019).
6. Скатков А.В., Балакирева И.А. Обеспечение функциональной устойчивости операционных характеристик систем мониторинга окружающей среды при произвольном входном потоке данных. Системы контроля окружающей среды. 2017. №8(28) С.47-54.
7. Доронина Ю.В. Реинжиниринг информационных систем: Монография. М.: Изд-во Спутник+, 2015. – 170с.