ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ ПРИКЛАДНЫХ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ С УЧЕТОМ ОГРАНИЧЕНИЙ НА ВОССТАНОВЛЕНИЕ РЕСУРСА

Кононыхин С.А., Шестопалова О.Л.

Рассматриваются вопросы прогнозирования показателей долговечности технического оборудования прикладных распределенных информационных систем на основе динамического многомодельного анализа вкладов различных групп элементов оборудования и системы восстановления технического ресурса в изменение вероятности недостижения предельного состояния.

Ключевые слова: прогнозирование, информационная система, анализ, вероятность, технический ресурс.

PREDICTION DURABILITY OF THE EQUIPMENT APPLICATION OF DISTRIBUTED INFORMATION SYSTEMS IN VIEW OF LIMITATIONS ON RESOURCE RECOVERY

Kononykhin S.A., Shestopalova O.L.

The problems of forecasting performance durability of technical equipment applications of distributed information systems based on dynamic analysis of the multimodal contributions of different groups of items of equipment and recovery systems technical resource in the change in the probability of failure limit state.

Keywords: forecasting, information systems, analysis, probability, and technical resources.

Рассмотрим трёхуровневую иерархическую модель «система – подсистема – элемент», описывающую закономерности, лежащие в основе причинно-следственных связей, приводящих к возникновению предельного состояния (ПС) оборудования прикладных распределенных информационных систем (ПРИС).

Интегрированной структурной моделью достижения предельного состояния ПРИС будем называть логико-вероятностную модель причинно-следственных связей между переходом ПРИС в предельное состояние и совокупностью начальных и промежуточных событий, отражающих изменение состояния как самих элементов эксплуатируемой системы, так и элементов системы восстановления технического ресурса (СВТР). В качестве возможного класса моделей для решения рассматриваемой задачи могут быть применены логико-вероятностные модели деревьев событий, которые в дальнейшем будем называть деревьями предельных состояний (ДПС).

Пусть задана некоторая функция (однозначно определяемая по ДПС)

$$P(t) = \rho(P_{s1}, P_{s1},..., P_{sk},..., P_{sm}, t) \tag{1}$$

зависимости ВНПС системы от соответствующих ВНПС подсистем, входящих в состав ПРИС.

При равной роли подсистем в обеспечении нормального функционирования ПРИС функция (1) принимает вид $P(t) = \prod_{k=1}^{m} P_{sk}(t)$.

Общим свойством функции (1) является её монотонность, вследствие чего моделируемая структура относится к классу монотонных структур. Функция (1) является функцией многих переменных. С достаточной степенью приближения изменение ВНПС системы может быть описано как: $dP \approx \sum_{k=1}^{m} \rho'_{P_{sk}}(P_{s1}, P_{s2},..., P_{sk},..., P_{sm})dP_{sk}$.

Назовём величину $\rho'_{P_{sk}}(P_{s1}, P_{s2},..., P_{sk},..., P_{sm})$ ресурсной значимостью k-й подсистемы ПРИС, а величину произведения $\rho'_{P_{sk}}(P_{s1}, P_{s2},..., P_{sk},..., P_{sm})dP_{sk}$ - ресурсным вкладом k-й подсистемы в изменение ВНПС системы. Обозначим ресурсную значимость подсистемы как $K_{sk}^{\text{зн}}$, а ресурсный вклад как $K_{sk}^{\text{вкл}}$, тогда

$$dP = \sum_{k=1}^{\text{m}} K_{sk}^{\text{зн}} dP_{sk} = \sum_{k=1}^{\text{m}} K_{sk}^{\text{вкл}}, \tag{2}$$

т.е. изменение ВНПС системы равно сумме ресурсных вкладов составляющих ее подсистем.

Обозначим вероятность безотказной работы i-го элемента k-й подсистемы как p_{ik}, а вероятность нормального функционирования j-го элемента СВТР k-й подсистемы как r_{jk}, тогда по соответствующей k-й системе ветви ДПС можно найти выражение для ВНПС k-й подсистемы

$$P_{sk}(t) = \psi_k(p_{<l_k>}, r_{<\nu_k>}, t), \tag{3}$$

где $p_{<l_k>} =< p_{1k}, p_{2k}, ..., p_{ik}, ..., p_{l_k k} >$ - вектор вероятностей безотказной работы элементов k-й подсистемы; $r_{<\nu_k>} =< r_{1k}, r_{2k}, ..., r_{ik}, ..., r_{\nu_k k} >$ - вектор вероятностей нормального функционирования элементов СВТР, соответствующих (по ДПС) k-й подсистеме ПРИС.

Обозначим $\Omega_{\{l_k\}k}$ - множество индексов, соответствующих элементам p_{ik}, $i = \overline{1, l_k}$, и $\Omega_{\{\nu_k\}k}$ - множество индексов, соответствующее элементам r_{jk}, $j = \overline{1, \nu_k}$. Тогда можно записать (при фиксированном аргументе $t := t^0$):

$$dP_{\text{sk}} = \sum_{i=1}^{l} \psi'_{kp_i}(p_{<l_k>k}, r_{<\nu_k>k}) dp_{ik} + \sum_{j=1}^{\nu_k} \psi'_{kr_j}(p_{<l_k>k}, r_{<\nu_k>k}) dr_{jk} . \tag{4}$$

где
$$\psi'_{kp_i}(p_{<l_k>k}, r_{<\nu_k>k}) = \frac{\partial \psi_k(p_{<l_k>k}, r_{<\nu_k>k})}{\partial p_{ik}};$$

$$\psi'_{kr_j}(p_{<l_k>k}, r_{<\nu_k>k}) = \frac{\partial \psi_k(p_{<l_k>k}, r_{<\nu_k>k})}{\partial r_{jk}}.$$

Или

$$dP_{\text{sk}} = \sum_{\xi=1}^{n_k} \psi'_{k\xi}(\overset{*}{p}_{1k}, \overset{*}{p}_{2k}, ..., \overset{*}{p}_{\xi k}, ..., \overset{*}{p}_{n_k k}) d\overset{*}{p}_{\xi k} . \tag{5}$$

где $$\psi'_{k\xi}(\overset{*}{p}_{1k}, \overset{*}{p}_{2k}, ..., \overset{*}{p}_{\xi k}, ..., \overset{*}{p}_{n_k k}) = \begin{cases} \dfrac{\partial \psi_k(p_{<l_k>k}, r_{<\nu_k>k})}{\partial p_{\xi k}}, \xi \in \Omega_{\{l_k\}k}, \\ \dfrac{\partial \psi_k(p_{<l_k>k}, r_{<\nu_k>k})}{\partial r_{\xi k}}, \xi \in \Omega_{\{\nu_k\}k}; \end{cases}$$

$$d\overset{*}{p}_{\xi k} = \begin{cases} dp_{\xi k}, \xi \in \Omega_{\{l_k\}k}, \\ dr_{\xi k}, \xi \in \Omega_{\{\nu_k\}k}; \end{cases} \qquad n_k = l_k + \nu_k.$$

Назовём величину $\psi'_{kp_i}(p_{<l_k>k}, r_{<\nu_k>k})$ ресурсной значимостью i-го элемента k-й подсистемы, а её произведение на dp_{ik} – ресурсным вкладом i-го элемента в изменение ВНПС k-й подсистемы.

Назовём величину $\psi'_{kr_j}(p_{<l_k>k}, r_{<\nu_k>k})$ ресурсной значимостью j-го элемента системы восстановления технического ресурса k-й подсистемы, а её произведение на dr_{jk} – ресурсным вкладом j-го элемента СВТР в изменение ВНПС k-й подсистемы.

Обозначим ресурсную значимость i-го элемента k-й подсистемы как $K^{\text{зн}}_{p_{i\,k}}$, ресурсную значимость j-го элемента СВТР k-й подсистемы как $K^{\text{зн}}_{r_{i\,k}}$, ресурсный вклад i-го элемента k-й подсистемы как $K^{\text{вкл}}_{p_{i\,k}}$, ресурсный вклад j-го элемента СВТР как $K^{\text{вкл}}_{r_{i\,k}}$. Тогда можно записать

$$dP_{S_K} = \sum_{i=1}^{l_k} K^{\text{зн}}_{p_{i\,k}} dp_{ik} + \sum_{j=1}^{\nu_k} K^{\text{зн}}_{r_{i\,k}} dr_{jk} = \sum_{i=1}^{l_k} K^{\text{вкл}}_{p_{i\,k}} + \sum_{j=1}^{\nu_k} K^{\text{вкл}}_{r_{i\,k}}, \tag{6}$$

т.е. изменение ВНПС k-й подсистемы ПРИС равно сумме ресурсных вкладов её элементов и ресурсных вкладов элементов СВТР, задействованных при восстановлении технического ресурса k-й подсистемы.

Подставив (6) в (2), получим

$$dP = \sum_{k=1}^{m} K^{\text{зн}}_{S_k} \left(\sum_{i=1}^{l_k} K^{\text{вкл}}_{p_{i\,k}} + \sum_{j=1}^{\nu_k} K^{\text{вкл}}_{r_{i\,k}} \right) = \sum_{k=1}^{m} \sum_{i=1}^{l_k} K^{\text{зн}}_{S_k} K^{\text{вкл}}_{p_{i\,k}} + \sum_{k=1}^{m} \sum_{j=1}^{\nu_k} K^{\text{зн}}_{S_k} K^{\text{вкл}}_{r_{i\,k}}, \tag{7}$$

или, с учётом того, что $K^{\text{вкл}}_{p_{i\,k}} = K^{\text{зн}}_{p_{i\,k}} dp_{ik}$, $K^{\text{вкл}}_{r_{i\,k}} = K^{\text{зн}}_{r_{i\,k}} dr_{jk}$,

$$dP = \sum_{k=1}^{m} \sum_{i=1}^{l_k} K^{\text{зн}}_{S_k} K^{\text{зн}}_{p_{i\,k}} dp_{ik} + \sum_{k=1}^{m} \sum_{j=1}^{\nu_k} K^{\text{зн}}_{S_k} K^{\text{зн}}_{r_{i\,k}} dr_{jk}. \tag{8}$$

Из анализа общего вида выражения (8) видно, что изменение ВНПС системы определяется двумя основными составляющими: $dP = dP^{\text{об}} + dP^{\text{СВТР}}$,

где $dP^{\text{об}} = \sum_{k=1}^{m} \sum_{i=1}^{l_k} K^{\text{зн}}_{S_k} K^{\text{зн}}_{p_{i\,k}} dp_{ik}$ –– интегральная составляющая изменения ВНПС собственно объекта эксплуатации (ПРИС), обусловленная изменением технического состояния его собственных элементов, а $dP^{\text{СВТР}} = \sum_{k=1}^{m} \sum_{j=1}^{\nu_k} K^{\text{зн}}_{S_k} K^{\text{зн}}_{r_{i\,k}} dr_{jk}$ - интегральная составляющая изменения ВНПС объекта из-за влияния системы восстановления технического ресурса.

Введём в рассмотрение Ω – полное множество индексов элементов системы: $\Omega = \bigcup_{k=\overline{1,m}} \Omega_{\{l_k\}k}$.

Базовыми элементами будем называть такие элементы, восстановление технического ресурса которых невозможно без кардинальной модернизации ПРИС в целом.

Тогда можно записать:

$$\Omega = \Omega_{Б} \cup \Omega_{НБ}, \qquad (9)$$

где $\Omega_{Б}$ – подмножество индексов базовых, а $\Omega_{НБ}$ – соответственно, небазовых элементов системы. С учётом (9) имеем:

$$\begin{aligned} dP^{\text{об}} &= \sum_{k=1}^{m} K_{S_k}^{\text{зн}} \left(\sum_{ik \in \Omega_{Б}} K_{p_{i\,k}}^{\text{вкл}} + \sum_{ik \in \Omega_{НБ}} K_{r_{i\,k}}^{\text{вкл}} \right) = \\ &= \sum_{k=1}^{m} K_{S_k}^{\text{зн}} \sum_{ik \in \Omega_{Б}} K_{p_{i\,k}}^{\text{вкл}} + \sum_{k=1}^{m} K_{S_k}^{\text{зн}} \sum_{ik \in \Omega_{НБ}} K_{r_{i\,k}}^{\text{вкл}} = dP^{Б} + dP^{НБ}. \end{aligned} \qquad (10)$$

Подставив (10) в (13), получим

$$dP = dP^{Б} + dP^{НБ} + dP^{\text{СВТР}}. \qquad (11)$$

Обозначим относительный дифференциальный вклад базовых элементов в dP как

$$dP_{Б} = dP^{Б} \big/ dP \quad . \qquad (12)$$

С учётом (8) и (10) выражение (12) можно представить в виде:

$$\delta_{Б} = \frac{\sum_{k=1}^{m} K_{S_k}^{\text{зн}} \sum_{ik \in \Omega_{Б}} K_{p_{i\,k}}^{\text{зн}} dp_{ik}}{\sum_{k=1}^{m} \sum_{i=1}^{l_k} K_{S_k}^{\text{зн}} K_{p_{i\,k}}^{\text{зн}} dp_{ik} + \sum_{k=1}^{m} \sum_{j=1}^{\nu_k} K_{S_k}^{\text{зн}} K_{r_{i\,k}}^{\text{зн}} dr_{jk}}. \qquad (13)$$

Определим входящие в (13) ресурсные значимости $K_{S\,k}^{\text{зн}}, K_{p_{i\,k}}^{\text{зн}}$ и $K_{r_{i\,k}}^{\text{зн}}$. В соответствии с выражением (2) ресурсная значимость k-й подсистемы ПРИС равна:

$$K_{S\,k}^{\text{зн}} = \rho'_{P_{S_k}}(P_{S_1}, P_{S_2}, \ldots, P_{S_m}) = \frac{\partial \rho(P_{S_1}, P_{S_2}, \ldots, P_{S_m})}{\partial P_{S_k}} = \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^{m} P_{S_j}. \qquad (14)$$

В соответствии с подходом к нахождению частных производных от функции многих переменных произвольного вида, описанным в [1], ресурсная значимость элемента p_{ik} равна:

$$\begin{aligned} K_{p_{ik}}^{\text{зн}} &= \frac{\partial \psi_k(p_{<l_k>}, r_{<\nu_k>k})}{\partial p_{ik}} = \psi_{k1}^{(ik)} - \psi_{k0}^{(ik)} = \\ &= \psi_k(p_{1k}, p_{2k}, \ldots, p_{(i-1)k}, 1, p_{(i+1)k}, \ldots, p_{l_k k}, r_{<\nu_k>k}) - \\ &- \psi_k(p_{1k}, p_{2k}, \ldots, p_{(i-1)k}, 0, p_{(i+1)k}, \ldots, p_{l_k k}, r_{<\nu_k>k}). \end{aligned} \tag{15}$$

Аналогично, ресурсная значимость элемента r_{ik} системы восстановления технического ресурса элементов k-й подсистемы ПРИС определится выражением:

$$\begin{aligned} K_{r_{ik}}^{\text{зн}} &= \frac{\partial \psi_k(p_{<l_k>}, r_{<\nu_k>k})}{\partial r_{ik}} = \psi_{k1}^{(jk)} - \psi_{k0}^{(jk)} = \\ &= \psi_k(p_{<l_k>k}, r_{1k}, r_{2k}, \ldots, r_{(j-1)k}, 1, r_{(j+1)k}, \ldots, r_{\nu_k k}) - \\ &- \psi_k(p_{<l_k>k}, r_{1k}, r_{2k}, \ldots, r_{(j-1)k}, 0, r_{(j+1)k}, \ldots, r_{\nu_k k}). \end{aligned} \tag{16}$$

Подставив (14), (15) и (16) в формулу (13), получим окончательное выражение для оценивания величины относительного дифференциального вклада базовых элементов в dP:

$$\delta_Б = \frac{\sum\limits_{k=1}^{m} \prod\limits_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^{m} P_{S_j} \sum\limits_{ik \in \Omega_Б} \left(\psi_{k1}^{(ik)} - \psi_{k0}^{(ik)}\right) dp_{ik}}{\sum\limits_{k=1}^{m} \sum\limits_{i=1}^{l_k} \prod\limits_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^{m} P_{S_j} \left(\psi_{k1}^{(ik)} - \psi_{k0}^{(ik)}\right) dp_{ik} + \sum\limits_{k=1}^{m} \sum\limits_{j=1}^{\nu_k} \prod\limits_{\substack{\xi=1 \\ \xi \neq k}}^{m} P_{S_\xi} \left(\psi_{k1}^{(ik)} - \psi_{k0}^{(ik)}\right) dr_{ik}}, \tag{17}$$

где
$$P_{S_j} = \psi_j(p_{1j}, p_{2j}, \ldots, p_{l_j j}, r_{1j}, r_{2j}, \ldots, r_{\nu_j j}). \tag{18}$$

Аналогичным образом можно получить выражение для оценивания относительного дифференциального вклада элементов СВТР:

$$\delta_{\text{СВТР}} = \frac{\sum\limits_{k=1}^{m} \sum\limits_{j=1}^{\nu_k} \prod\limits_{\substack{\xi=1 \\ \xi \neq k}}^{m} P_{S_\xi} \left(\psi_{k1}^{(ik)} - \psi_{k0}^{(ik)}\right) dr_{ik}}{\sum\limits_{k=1}^{m} \sum\limits_{i=1}^{l_k} \prod\limits_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^{m} P_{S_j} \left(\psi_{k1}^{(ik)} - \psi_{k0}^{(ik)}\right) dp_{ik} + \sum\limits_{k=1}^{m} \sum\limits_{j=1}^{\nu_k} \prod\limits_{\substack{\xi=1 \\ \xi \neq k}}^{m} P_{S_\xi} \left(\psi_{k1}^{(ik)} - \psi_{k0}^{(ik)}\right) dr_{ik}}, \tag{19}$$

Нетрудно заметить, что и выражение (17), и выражение (19) зависят от одних и тех же аргументов, т.е. можно записать:

$$\delta_Б = \Phi_1\left(p_{<l_k>k}, r_{<\nu_k>k}, dp_{<l_k>k}, dr_{<\nu_k>k} \mid k = \overline{1,m}\right), \tag{20}$$

$$\delta_{\text{СВТР}} = \Phi_2\left(p_{<l_k>k}, r_{<\nu_k>k}, dp_{<l_k>k}, dr_{<\nu_k>k} \mid k = \overline{1,m}\right), \tag{21}$$

где $\Phi_1(\cdot)$ и $\Phi_2(\cdot)$ есть функциональные зависимости, вид которых определяется правыми частями выражений (17) и (18) соответственно.

Таким образом, так как общий вид функций $\Phi_1(\cdot)$ и $\Phi_2(\cdot)$ задан, для оценивания относительных дифференциальных вкладов $\delta_{Б}$ и $\delta_{\text{СВТР}}$ достаточно оценить абсолютные значения соответствующих вероятностей $p_{<l_k>k}, r_{<\nu_k>k}, k=\overline{1,m}$ и их изменений во времени $dp_{<l_k>k}$ и $dr_{<\nu_k>k}$, характеризующих фактическое состояние элементов ПРИС и ее СВТР в момент контроля $t = t_0$, причём:

$$\begin{cases} p_{<l_k>k} = p_{<l_k>k}(t \mid t = t_0), \\ r_{<\nu_k>k} = r_{<\nu_k>k}(t \mid t = t_0), \\ dp_{<l_k>k} = p_{<l_k>k}(t_0 + \Delta t) - p_{<l_k>k}(t_0), \\ dr_{<\nu_k>k} = r_{<\nu_k>k}(t_0 + \Delta t) - r_{<\nu_k>k}(t_0). \end{cases} \tag{22}$$

Оценки значений соответствующих вероятностей могут быть получены с помощью моделей нижнего уровня иерархии интегрированной структурной модели предельного состояния ПРИС (см. рис.1).

Используя результаты регулярного контроля технического состояния элементов ПРИС в процессе эксплуатации, а также результаты оценивания состояния элементов СВТР, можно отслеживать и прогнозировать динамику изменения значений относительных дифференциальных вкладов $\delta_{Б}(t)$ и $\delta_{\text{СВТР}}(t)$.

Представим изменение ВНПС системы в виде

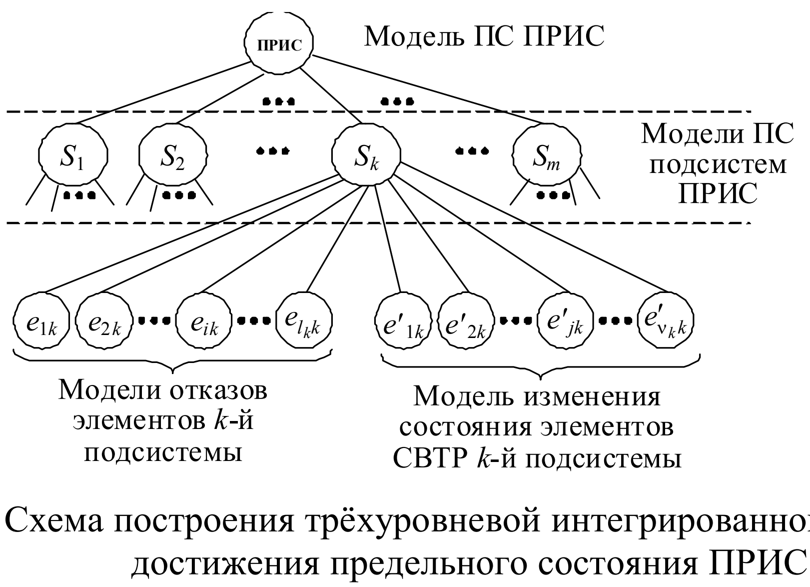

Рис. 1. Схема построения трёхуровневой интегрированной модели достижения предельного состояния ПРИС

$$dP = \delta_{Б}\, dP_{НСЧ} + \delta_{НБ}\, dP_{НСЧ} + \delta_{\text{СВТР}}\, dP_{НСЧ},$$

или
$$dP = (\delta_{Б} + \delta_{\text{СВТР}}) dP_{НСЧ} + (1 - \delta_{Б} - \delta_{\text{СВТР}}) dP_{НСЧ}\,. \qquad (23)$$

Первое слагаемое правой части выражения (23) характеризует необратимую составляющую изменения ВНПС, второе слагаемое – обратимую составляющую.

Необратимость изменения ВНПС системы обусловливается двумя основными причинами: неполнотой восстановления ресурса ПРИС из-за наличия в ее составе базовых элементов, ресурс которых по технологическим, организационным, временным и финансовым причинам может быть восстановлен только при проведении капитального ремонта ПРИС; ограничениями восстановления ресурса ПРИС в части небазовых элементов из-за снижения потенциальных возможностей СВТР с течением времени эксплуатации.

Таким образом, выражение (23) в дифференциальной форме отражает соотношение вкладов восстанавливаемого и невосстанавливаемого оборудования в ВНПС системы с учётом реальных возможностей системы восстановления технического ресурса.

Рассмотрим возможность получения прогнозных оценок показателей технического (либо остаточного) ресурса ПРИС на основе данных о динамике изменения относительных дифференциальных вкладов $\delta_{Б}(t)$ и $\delta_{\text{СВТР}}(t)$.

Отличия в прогнозировании показателей надежности и долговечности ПРИС при различных вариантах управления развитием заключаются в способах формирования исходных данных (22), в состав которых входят вероятности безотказной работы элементов системы и вероятности нормального функционирования элементов СВТР.

В большинстве практических случаев качество функционирования СВТР на интервале упреждения прогноза с приемлемой точностью можно оценить, заменив в (22) компоненты векторов $r_{<v_k>k}, k = \overline{1,m}$ значениями бинарной переменной [0;1], «0» - в случае, если по оценке экспертов на рассматриваемом предстоящем интервале эксплуатации система восстановления ресурса рассматриваемого элемента ПРИС будет функционировать неудовлетворительно, и «1» - в противном случае.

Значения показателя надежности невосстанавливаемой ПРИС (а именно - ВБР) можно получить, если в выражении (3) вектор вероятностей нормального функционирования элементов СВТР, соответствующих k-й подсистеме ПРИС $r_{<\nu_k>} =< r_{1k}, r_{2k}, ..., r_{ik}, ..., r_{\nu_k k} >$ заменить на вектор $r^0_{<\nu_k>} =< 0,0,...,0 >$.

Далее поясним способ прогнозирования показателей долговечности ПРИС по ВНПС системы. Пусть по результатам прогнозирования изменения вероятностей $p_{<l_k>k}, r_{<\nu_k>k}, k = \overline{1,m}$ построена функция ВНПС системы $P_{НСЧ}$ (t):

$$P(t) = \prod_{k=1}^{m} \psi_k \left(p_{<l_k>k}, r_{<\nu_k>k}, t \right). \tag{24}$$

Пусть также на некотором интервале (t_i, t_j) изменение ВНПС составило величину

$$\Delta P(t_i;\ t_j) = P_{НСЧ}\ (t_i) - P_{НСЧ}\ (t_j). \tag{25}$$

Тогда интегральный вклад базовых элементов системы в изменение ВНПС (25) может быть определён как

$$\Delta P^{Б}(t_i; t_j) = \sum_{\omega=1}^{(t_i - t_j)/\Delta t} \left[P\,(t_i + (\omega - 1)\Delta t)) - P\,(t_i + \omega \Delta t) \right] \delta_{Б}(t_i + \omega \Delta t), \tag{26}$$

где Δt – некоторый (достаточно малый) участок интервала (t_i; t_j).

По аналогии, интегральный вклад элементов СВТР в данном случае равен

$$\Delta P^{\text{СВТР}}(t_i; t_j) = \sum_{\omega=1}^{(t_i - t_j)/\Delta t} \left[P\,(t_i + (\omega - 1)\Delta t)) - P\,(t_i + \omega \Delta t) \right] \delta_{\text{СВТР}}(t_i + \omega \Delta t) \tag{27}$$

Суммируя интегральные вклады (26) и (27), получим окончательное выражение для интегрального вклада необратимой (невосстанавливаемой) компоненты изменения ВНПС на интервале (t_i; t_j)

$$\begin{gathered} \Delta P^{\text{НВ}}(t_i; t_j) = \sum_{\omega=1}^{(t_i - t_j)/\Delta t} \left[P\,(t_i + (\omega - 1)\Delta t)) - P\,(t_i + \omega \Delta t) \right] \times \\ \times \left[\delta_{Б}(t_i + \omega \Delta t) + \delta_{\text{СВТР}}(t_i + \omega \Delta t) \right]. \end{gathered} \tag{28}$$

Зададимся некоторым предельным уровнем γ, ограничивающем снизу интервал возможных изменений ВНПС. Рассмотрим рис.2.

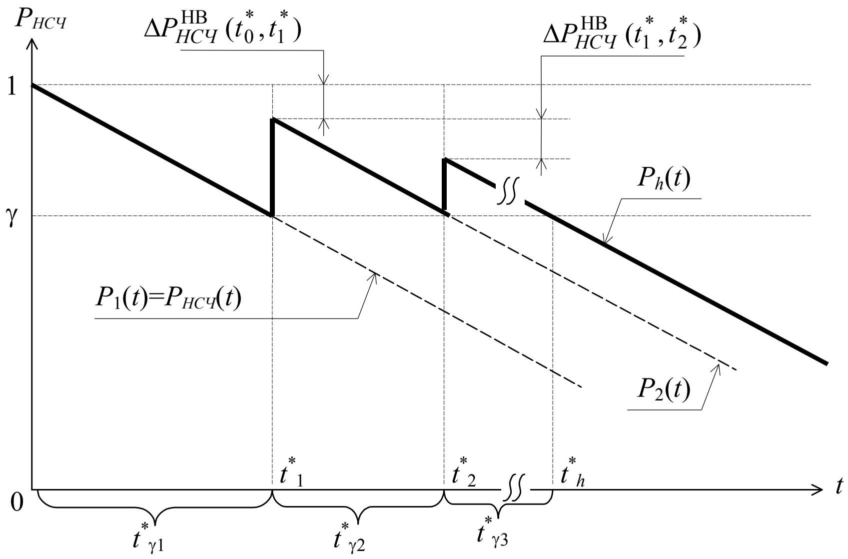

Рис.2. График изменения ВНПС системы при полном периодическом восстановлении ресурса небазовых элементов

При достижении функцией $P\,(t)$ уровня γ соответствующая этому событию наработка ПРИС составит $t^*_{\gamma 1} = t^*_1 - t^*_0$, t^*_0=0.

Допустим, что в этот момент технический ресурс всех небазовых элементов ПРИС восстановлен до уровня, обеспеченного текущим состоянием СВТР. Тогда, естественно предположить, что ВНПС системы возрастёт в данной точке на величину $\Delta P\,(t^*_1) = 1 - \gamma - \Delta P^{НВ}(0;\, t^*_1)$, т.е. до уровня $P\,(t^*_1)$=$1 - \Delta P^{НВ}(0;\, t^*_1)$.

При дальнейшем изменении функция $P'(t \mid t > t^*_1)$

$$P'(t \mid t > t^*_1) = P_2(t) = P\,(t) + \Delta P^{НВ}(0;\, t^*_1) + 1 - \gamma$$

также пересечёт заданный предельный уровень γ в некоторой другой точке t^*_2. Проведение в момент t^*_2 восстановления технического ресурса небазовых элементов снова позволит повысить ВНПС, но уже до более низкого, чем в предыдущем случае, значения

$$P'(t^*_2) = 1 - \Delta P^{НВ}(0;\, t^*_1) - \Delta P^{НВ}\,(t^*_1, t^*_2)$$

при общей суммарной наработке, равной $t^*_{\gamma 1} + t^*_{\gamma 2}$, где $t^*_{\gamma 2} = t^*_2 - t^*_1$.

Эксплуатация ПРИС по описанному алгоритму будет продолжаться до исчерпания возможностей восстановления технического ресурса (т.е. до того момента, когда величина достигаемого повышения ВНПС системы относительно заданного уровня γ уже не может быть обеспечена выше некоторого порога ε). Результирующая зависимость ВНПС от времени (наработки) в данном случае будет иметь вид пилообразной кривой с уменьшающейся высотой пиков. Так как данная ресурсная кривая получена при условии полного восстановления технического ресурса небазовых элементов в пределах текущих возможностей СВТР на момент достижения уровня γ, то соответствующую ей ВНПС будем называть условной ВНПС системы. Безусловная ВНПС (кривая $p_1(t)$ на рис.2) построена без учёта возможности полного восстановления ресурса небазовых элементов, хотя и учитывает возможности частичного восстановления ресурса небазовой компоненты ПРИС при отказах её элементов (но не до максимального достижимого уровня). Безусловная ресурсная кривая задаётся выражением (24).

Приведём выражение для условной ресурсной кривой:

$$P^{\text{усл}}(t) = \begin{cases} P_1(t) = P^{\text{БУ}}(t) = P\,;\ t \in [0; t_1^*],\ t_1^* = t \mid P_1(t) = \gamma;\ h = 1, \\ P_1(t) + 1 - \gamma - \sum\limits_{j=1}^{h-1} \Delta P^{\text{НВ}}(t_{j-1}^*; t_j^*),\ t \in [t_{h-1}^*; t_h^*];\ t_h^* = t \mid P_h(t) = \gamma;\ h \geq 2. \end{cases}$$

Таким образом, в данной статье рассмотрены вопросы прогнозирования показателей долговечности оборудования прикладных распределенных информационных систем на основе динамического многомодельного анализа вкладов различных групп элементов оборудования и системы восстановления технического ресурса в изменение вероятности недостижения предельного состояния оборудования ПРИС, получены соответствующие аналитические выражения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рябинин И.А., Черкесов Г.Н. Логико-вероятностные методы исследования надёжности структурно-сложных систем. – М.: Радио и связь, 1981. – 264 с.