

Прогнозирование показателей долговечности объектов наземных комплексов с учетом неполноты информации о возможностях восстановления работоспособности

Forecasting of ground complex elements lifetime indexes with account of incomplete information on possibilities of functional recovery

Ключевые слова: техническое состояние – technical state; надежность – reliability; ресурс – resource; прогнозирование – forecasting; объекты наземных комплексов – surface facilities.

В статье описана математическая модель прогнозирования показателей долговечности объектов наземных комплексов, отличающаяся совместным (в рамках единой модели) рассмотрением изменения свойств элементов оборудования и возможностей системы восстановления его технического ресурса (СВТР). Неполнота информации об изменении свойств СВТР на интервале упреждения прогноза учитывается применением нечеткой формы описания исходных данных о возможностях восстановления работоспособности.

Described in the article is a mathematical model of forecasting the ground complex elements lifetime indexes, distinguished by the joint consideration (within a single model) of the equipment elements properties change and possibilities of its technological lifespan recovery system (TLRS). Incomplete information on TLRS properties change in the interval of forecast lead is taken into account by applying fuzzy form of description of the initial data on possibilities of functional recovery.

Большинство объектов наземных комплексов (ОНК) с точки зрения надежности являются сложными восстанавливаемыми техническими системами (ОНК). Анализ научно-технической литературы по вопросам прогнозирования предельных сроков эксплуатации ОНК показал, что к настоящему времени недостаточно разработаны методы совместного (в рамках обобщенной модели)

БЕССОНОВ / BESSONOV P.

Павел Евгеньевич

(bessonov.pe@szte.ru)
старший научный сотрудник,
филиал ФГУП «ЦЭНКИ» – «ЦЭНКИ – Северо-Запад»,
Санкт-Петербург

ПИВОВАРОВ / PIVOVAROV O.

Олег Григорьевич

(command@usst3.spb.ru)
начальник ФГУП «ГУССТ № 3 при Спецстрое России»,
Санкт-Петербург

прогнозирования изменения свойств элементов ОНК и возможностей системы восстановления технического ресурса (СВТР) с учетом реальной неопределенности исходной информации [1]. Структуру такого многомодельного комплекса прогнозирования предельных сроков эксплуатации ОНК можно представить в виде, изображенном на рис. 1.

Одной из основных компонент многомодельного комплекса является интегрированная структурная математическая модель достижения предельного состояния (ПС) ОНК. Модель имеет трехуровневую иерархическую структуру и отображается в виде дерева предельного состояния ОНК.

Условия недостижения предельного состояния ОНК могут быть записаны в виде булевой логической функции недостижения предельного состояния (ЛФНПС), которая, в свою очередь, может быть выражена через минимальные пути либо минимальные сечения ДПС. Затем с использованием методов логико-алгебраических преобразований осуществляется переход от ЛФНПС к вероятности недостижения предельного состояния (ВНПС) ОНК:

$$P_{cc}(t) = p(P_{s1}, P_{s1}, \dots, P_{sk}, \dots, P_{sm}, t), \quad (1)$$

где $P_{sk}(t) = \Psi_k(p_{<l_k>, r_{<v_k>}, t)$ – ВНПС k -й подсистемы ОНК; $p_{<l_k>} = \langle p_{1k}, p_{2k}, \dots, p_{ik}, \dots, p_{l_k k} \rangle$ – вектор вероятностей безотказной работы элементов k -й подсистемы; $r_{<v_k>} = \langle r_{1k}, r_{2k}, \dots, r_{jk}, \dots, r_{v_k k} \rangle$ – вектор вероятностей успешного функционирования элементов СВТР; m – число подсистем ОНК; l_k – число элементов в k -й подсистеме ОНК; v_k – число элементов СВТР, задействованных на k -ю подсистему ОНК.

Введем понятия bv : ресурсной значимости k -й функциональной подсистемы ОНК $K_{sk}^{ЗН} = \rho'_{P_{sk}}(P_{s1}, P_{s2}, \dots, P_{sk}, \dots, P_{sm})$; ресурсного вклада k -й подсистемы в изменение ВНПС ОНК $K_{sk}^{ВКЛ} = \rho'_{P_{sk}}(P_{s1}, P_{s2}, \dots, P_{sk}, \dots, P_{sm}) dP_{sk}$; ресурсной значимости i -го элемента k -й подсистемы $K_{pik}^{ЗН} = \Psi'_{kp_i}(p_{<l_k>, r_{<v_k>})$; ресурсного вклада i -го элемента в изменение ВНПС k -й подсистемы $K_{pik}^{ВКЛ} = K_{pik}^{ЗН} dp_{ik}$; ресурсной значимости j -го элемента СВТР k -й подсистемы $K_{rjk}^{ЗН} = \Psi'_{kr_j}(p_{<l_k>, r_{<v_k>})$ и ресурсного вклада j -го

элемента СВТР в изменение ВНПС k -й подсистемы $K_{rjk}^{ВКЛ} = K_{rjk}^{ЗН} dr_{jk}$.

Можно показать, что для k -й подсистемы $dP_{sk} = \sum_{i=1}^{l_k} K_{pik}^{ЗН} dp_{ik} + \sum_{j=1}^{v_k} K_{rjk}^{ЗН} dr_{jk} = \sum_{i=1}^{l_k} K_{pik}^{ВКЛ} + \sum_{j=1}^{v_k} K_{rjk}^{ВКЛ}$, т.е. изменение ее ВНПС равно сумме ресурсных вкладов элементов ОНК и СВТР. Аналогично для ОНК в целом:

$$dP_{CC} = \sum_{k=1}^m K_{sk}^{ВКЛ} = \sum_{k=1}^m K_{sk}^{ЗН} dP_{sk} = \sum_{k=1}^m K_{sk}^{ЗН} \sum_{i=1}^{l_k} K_{pik}^{ВКЛ} + \sum_{k=1}^m K_{sk}^{ЗН} \sum_{j=1}^{v_k} K_{rjk}^{ВКЛ} = dP_{CC}^{СВТР} + dP_{CC}^{ОНК},$$

т.е. изменение ВНПС ОНК интегрально определяется изменением технического состояния элементов ОНК и элементов системы восстановления технического ресурса.

Если в составе оборудования ОНК выделить базовые элементы (то есть такие элементы, восстановление технического ресурса которых невозможно либо не

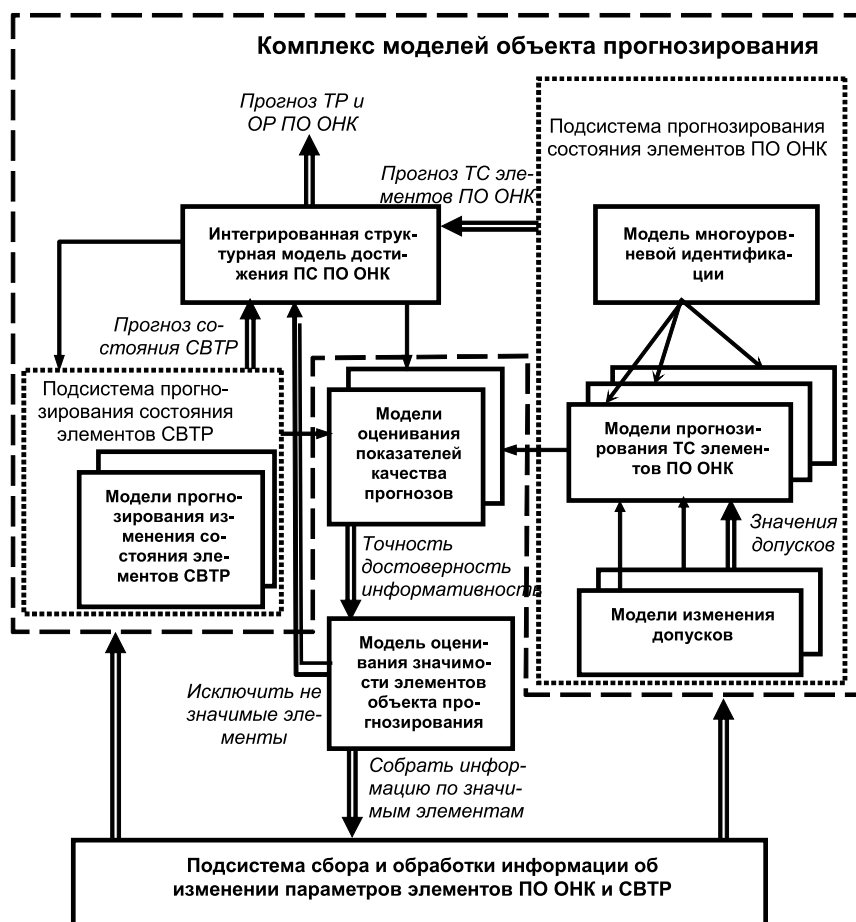


Рис. 1. Структура многомодельного комплекса прогнозирования показателей долговечности ОНК

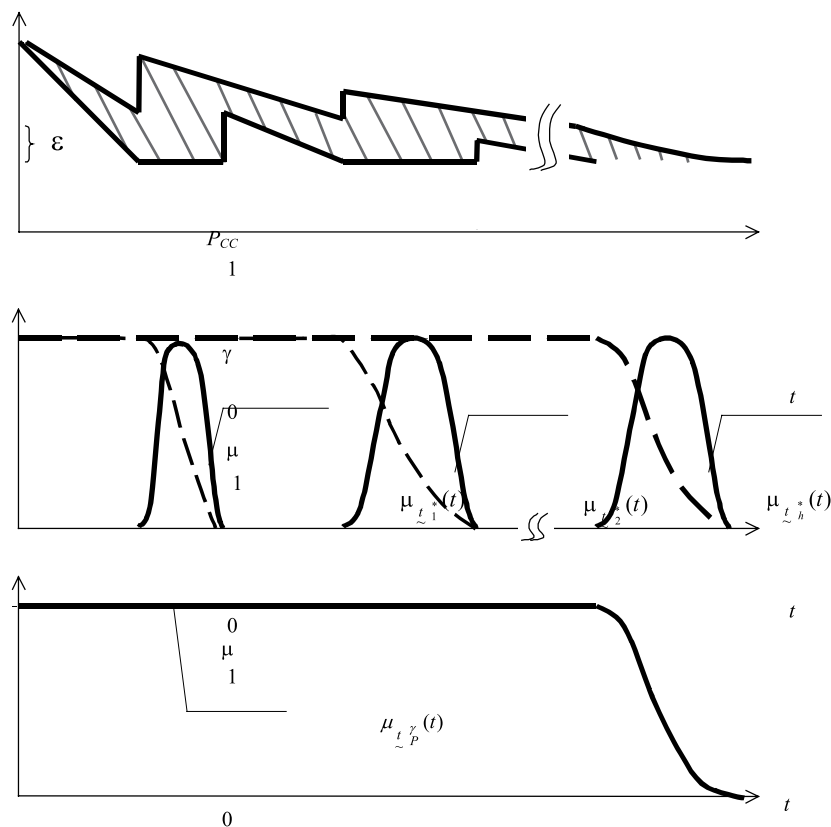


Рис. 2. Особенности оценивания технического ресурса ОНК при нечетком задании оценок вероятностей элементарных событий ДПС

предусмотрено в процессе штатной эксплуатации):

$$dP_{CC}^{CBTC} = \sum_{k=1}^m K_{S_k}^{3H} \sum_{ik \in \Omega_B} K_{Pi k}^{BKL} + \sum_{k=1}^m K_{S_k}^{3H} \sum_{ik \in \Omega_{HB}} K_{Pi k}^{BKL} = dP_{CC}^B + dP_{CC}^{HB}, \quad (2)$$

где Ω_B – подмножество индексов базовых, а Ω_{HB} – соответственно, подмножество небазовых элементов ОНК. Тогда $dP_{CC} = dP_{CC}^B + dP_{CC}^{HB} + dP_{CC}^{CBTP}$. Если обозначить относительный дифференциальный вклад базовых элементов в dP_{CC} как $\delta_B = dP_{CC}^B / dP_{CC}$, а относительный дифференциальный вклад элементов СВТР как $\delta_{CBTP} = dP_{CC}^{CBTP} / dP_{CC}$, то с учетом того, что $K_{S_k}^{3H} = \rho_{P_{S_k}}(P_{S_1}, P_{S_2}, \dots, P_{S_m}) =$

$$= \frac{\partial \rho(P_{S_1}, P_{S_2}, \dots, P_{S_m})}{\partial P_{S_k}} = \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^m P_{S_j}, \text{ имеем:}$$

$$\delta_B = \frac{\sum_{k=1}^m \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^m P_{S_j} \sum_{ik \in \Omega_B} (\psi_{k1}^{(ik)} - \psi_{k0}^{(ik)}) dp_{ik}}{\sum_{k=1}^m \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^m \prod_{\substack{\xi=1 \\ \xi \neq k}}^m P_{S_\xi} (\psi_{k1}^{(ik)} - \psi_{k0}^{(ik)}) dp_{ik} + \sum_{k=1}^m \sum_{\substack{j=1 \\ \xi \neq k}}^m \prod_{\substack{\xi=1 \\ \xi \neq k}}^m P_{S_\xi} (\psi_{k1}^{(jk)} - \psi_{k0}^{(jk)}) dr_{jk}}, \quad (3)$$

$$\delta_{CBTP} = \frac{\sum_{k=1}^m \sum_{\substack{\xi=1 \\ \xi \neq k}}^m \prod_{\substack{\xi=1 \\ \xi \neq k}}^m P_{S_\xi} (\psi_{k1}^{(jk)} - \psi_{k0}^{(jk)}) dr_{jk}}{\sum_{k=1}^m \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^m \prod_{\substack{\xi=1 \\ \xi \neq k}}^m P_{S_\xi} (\psi_{k1}^{(ik)} - \psi_{k0}^{(ik)}) dp_{ik} + \sum_{k=1}^m \sum_{\substack{j=1 \\ \xi \neq k}}^m \prod_{\substack{\xi=1 \\ \xi \neq k}}^m P_{S_\xi} (\psi_{k1}^{(jk)} - \psi_{k0}^{(jk)}) dr_{jk}}, \quad (4)$$

где $\psi_{k1}^{(ik)} = \psi_k(p_{1k}, p_{2k}, \dots, p_{(i-1)k}, 1, p_{(i+1)k}, \dots, p_{lk}, r_{<v_k>k})$;
 $\psi_{k0}^{(ik)} = \psi_k(p_{1k}, p_{2k}, \dots, p_{(i-1)k}, 0, p_{(i+1)k}, \dots, p_{lk}, r_{<v_k>k})$;
 $\psi_{k1}^{(jk)} = \psi_k(p_{<l_k>k}, r_{1k}, r_{2k}, \dots, r_{(j-1)k}, 1, r_{(j+1)k}, \dots, r_{v_kk})$;
 $\psi_{k0}^{(jk)} = \psi_k(p_{<l_k>k}, r_{1k}, r_{2k}, \dots, r_{(j-1)k}, 0, r_{(j+1)k}, \dots, r_{v_kk})$.

Используя результаты регулярного контроля технического состояния элементов оборудования ОНК в процессе эксплуатации, а также результаты оценивания состояния элементов СВТР, можно отслеживать и прогнозировать динамику изменения значений относительных дифференциальных вкладов $\delta_B(t)$ и $\delta_{СВТР}(t)$, а значит — и изменение ВНПС системы в целом.

Применение данного подхода на практике, как правило, ограничено неполнотой информации об изменении свойств СВТР на интервале упреждения прогноза, ее качественным (экспертным) характером, в связи с чем разработаны подходы к прогнозированию ресурса ОНК при нечетком характере соответствующих оценок. При этом изменение ВНПС описывается нечеткой функцией (рис. 2).

При различных допущениях об изменении свойств СВТР (от полного отсутствия до идеальной) можно получить нечеткие граничные оценки γ -процентного ресурса ОНК:

$$t'_{\sim P} < t^{\gamma}_{\sim P} < t''_{\sim P} .$$

Выделены основные направления снижения степени «размытости» итоговых оценок технического ресурса ОНК: 1) сокращение размерности математической модели достижения ПС ОНК за счет исключения из рассмотрения несущественных (с точки зрения влияния на ресурс ОНК) событий и 2) уменьшение степени «размытости» нечетких оценок вероятностей элементарных событий дерева предельных состояний ОНК с переходом в пределе к уточненным оценкам четкого вида.

Разработанный научно-методический аппарат апробирован при прогнозировании остаточного ресурса элементов оборудования заправочно-нейтрализационной станции (ЗНС) площадки 31 космодрома «Байконур».

Проведено сравнительное исследование степени согласованности прогнозов предельных сроков эксплуатации, получаемых с помощью разработанного подхода, с результатами эксплуатации. Для этого проанализированы данные об эксплуатации 44 однотипных агрегатов заправочного оборудования (ЗО) ЗНС на интервале наблюдения 18 лет. При этом было зафиксировано 10 наработок до ПС. С использованием методов анализа цензурированных выборок рассчитано значение ВНПС за 3 года эксплуатации, равное 0,9440. По 7 агрегатам ЗО были собраны данные мониторинга об изменении параметров технического состояния агрегатов ЗО ЗНС и расчи-

таны прогнозы ВНПС по истечении 3 лет. Сравнительный анализ показал, что разработанный метод в среднем в 2,5 раза точнее по сравнению с одномодельными методами прогнозирования предельных сроков эксплуатации.

В целом, результаты экспериментальных исследований показали достаточно высокую адекватность разработанных моделей и методов реальным условиям эксплуатации ОНК, а также существенный технико-экономический эффект от практического применения полученных результатов. Например, как показывают расчеты, ожидаемый экономический эффект от продления назначенного ресурса составляет примерно 1,5–2 млн рублей на один комплекс из 2 станций за 15 лет эксплуатации без капитального ремонта.

Литература

1. *Миронов А.Н.* Теоретические основы и методы многомодельного прогнозирования долговечности сложных военно-технических систем космического назначения. — МО РФ, 2000.