

# Верификации прогнозов АРПСС-моделей временных рядов, применяемых для прогнозирования долговечности ИС

Андрей СТРОГОНОВ,  
к. т. н.  
andreis@hotmail.ru

**В предыдущих публикациях автора показано, что модели цифровых фильтров, модели временных рядов и нейронные сети могут быть использованы для прогнозирования процесса деградации контролируемых электрических параметров ТТЛ ИС при испытаниях на долговечность.**

Цифровые адаптивные фильтры способны строить лишь одношаговые прогнозы и не пригодны для прогнозирования времени наступления параметрических отказов. Цифровые фильтры эффективны в задачах слежения за процессом деградации электрических параметров ИС. Модели временных рядов (модель авторегрессии проинтегрированного скользящего среднего или модель АРПСС( $p, d, q$ ), где  $p$  — число параметров авторегрессии,  $d$  — порядок дифференцирования,  $q$  — число параметров скользящего среднего) позволяют прогнозировать время наступления параметрического отказа по траектории процесса деградации контролируемого параметра [1, 2]. Нейронные сети способны эффективно решать более широкий круг задач, в том числе задачи слежения и прогнозирования процесса деградации [5].

В данном разделе рассматривается графическая верификация прогнозов модели АРПСС(0,1,2), подогнанной к ряду деградации наихудших (экстремальных) значений параметра  $U_{OL}$  (выходное напряжение низкого уровня) ТТЛ ИС типа 106ЛБ1 выпуска января 1980 года при испытаниях на долговечность продолжительностью 120 тыс. ч.

Главная особенность такого ряда — отсутствие корреляции между изменением параметра и временем испытаний:  $U_{OL} = 0,3371 - 0,0007 \times t$ , где  $t$  — время испытаний. Коэффициент детерминации  $R^2 = 0,0329$  (коэффициент детерминации показывает, что в данной ситуации только 3,29% общей варибельности объясняется изменением значений параметра  $U_{OL}$  под воздействием времени испытаний, в то время как на все остальные факторы приходится 96,71%), коэффициент корреляции  $r = -0,1812$ . Таким образом, наличие вероятностная природа ряда деградации (процесс деградации развивается по законам теории вероятности).

Прогнозирование осуществляется с использованием модуля «Анализ временных

рядов и прогнозирования» системы Statistica for Windows компании StatSoft [6].

Ряд замеров параметра  $U_{OL}$  ТТЛ ИС типа 106ЛБ1 при испытаниях на долговечность в течение 120 тыс. ч имеет вид: 0; 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 14; 15; 16; 17; 18; 19; 20; 21; 22; 23; 24; 25; 26; 27; 28; 29; 30; 40; 50; 60; 70; 80; 90; 100; 110; 120 тыс. ч.

Ряд деградации параметра  $U_{OL}$  содержит данные с пропусками. Число отсчетов ряда — 40 и они получены в неравные интервалы времени. Необходимое число отсчетов для построения АРПСС-модели — не менее 50 [7–10], оптимальное число замеров — 150, а в некоторых случаях — более 1000. Тем не менее, система Statistica for Windows позволяет построить АРПСС-модели при числе замеров не менее 15. Однако в этом случае использование АРПСС-модели носит демонстрационный характер. Для получения недостающих значений необходимо использовать анализ данных с пропусками. Система Statistica for Windows предлагает 5 стандартных методов заполнения пропусков: заполнение пропусков средним значением ряда; интерполяция по соседним точкам; среднее по  $N$  соседним точкам; медиана  $N$  ближайших значений ряда; заполнение пропусков прогнозами линейной регрессии. Однако могут быть использованы и другие методы получения недостающих значений, например, аппроксимация кубическими сплайнами или аппроксимация недостающих значений двухслойной нейронной сетью с радиальными базисными элементами.

Выбор того или иного метода для аппроксимации недостающих значений ряда деградации контролируемого электрического параметра ИС — достаточно сложная задача. Пользователь должен самостоятельно выбрать любой из подходящих методов.

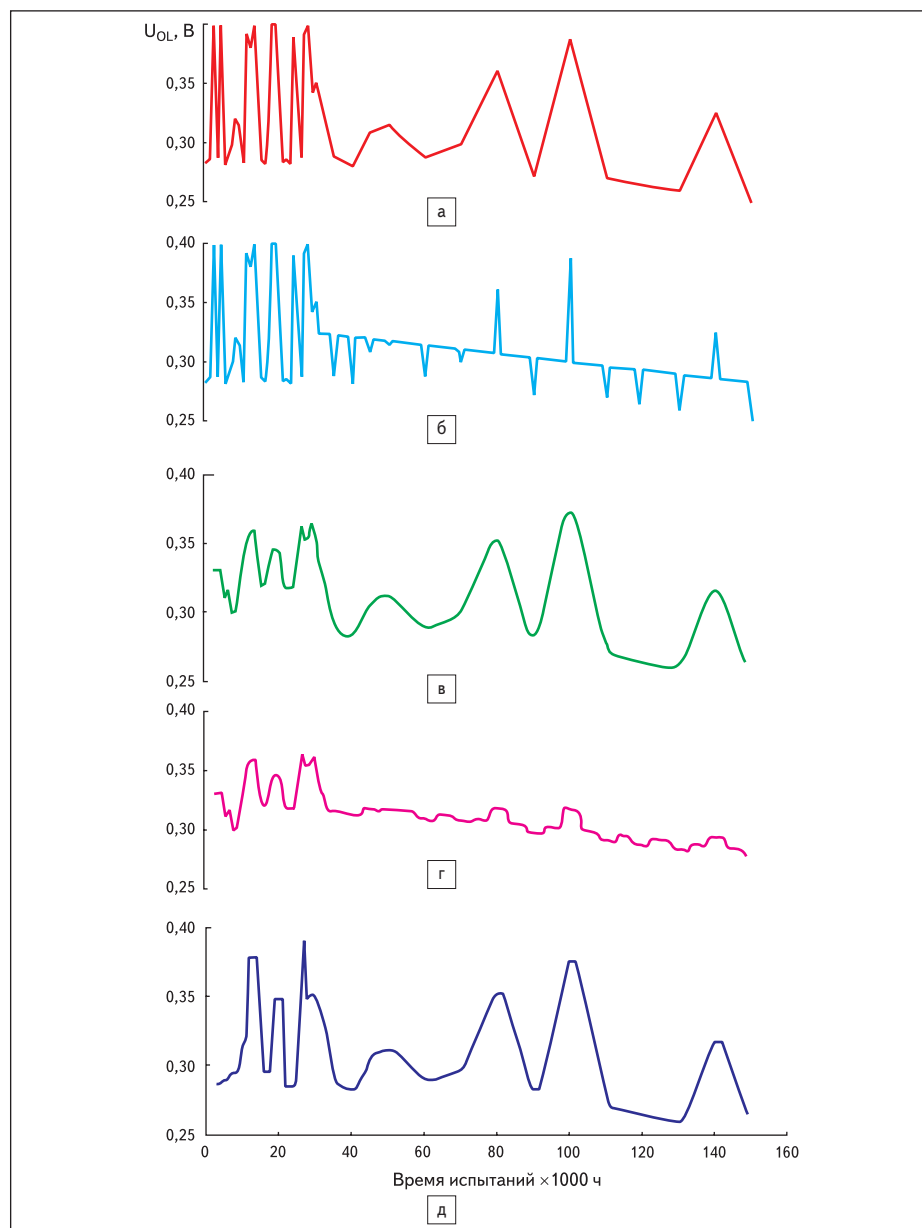
Например, ряд замеров параметров ТТЛ ИС типа 133ЛА8 при испытаниях на долговечность в течение 150 тыс. ч имеет вид: 0; 1;

2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 14; 15; 16; 17; 18; 19; 20; 21; 22; 23; 24; 25; 26; 27; 28; 29; 30; 35; 40; 45; 50; 60; 70; 80; 90; 100; 110; 120; 130; 140; 150 тыс. ч, то есть общее число отсчетов равно 45. На рис. 1а показан ряд деградации параметра  $U_{OL}$  ИС типа 133ЛА8 при испытаниях на долговечность в течение 150 тыс. ч с пропусками, заполненными методом интерполяции, на рис. 1б — с пропусками, заполненными прогнозами линейной регрессии.

Видно, что ряд с пропусками, заполненный методом интерполяции, соответствует нашему представлению о природе временного ряда. Ряд с пропусками, заполненный прогнозами линейной регрессии, имеет необычную форму, резко прослеживается линейный тренд в данных между опорными точками. На рис. 1в–д показаны сглаженные ряды с использованием скользящего среднего с интервалом 5 точек и скользящей медианы с интервалом 5 точек.

В данной работе предлагается использовать два метода получения недостающих значений — аппроксимация кубическими сплайнами (система Matlab) и метод интерполяции (система Statistica for Windows). Это позволяет для ряда деградации параметра  $U_{OL}$  ТТЛ ИС типа 106ЛБ1 получить 121 отсчет с интервалом 1000 ч. При этом какая-либо дополнительная проверка на адекватность использования выбранного метода получения недостающих значений ни в системе Matlab, ни в системе Statistica for Windows не проводится.

Основная идея графической верификации прогнозов заключается в том, что сначала на основе некоторого рационального критерия или критериев необходимо разделить на подмножества имеющийся массив данных о деградации контролируемых параметров ИС, полученный на основании анализа измерений экстремальных значений на интервале времени  $[0, t_u]$ , где  $t_u$  — длительность испытаний, а затем использовать одну или несколько частей этих данных для построения «пред-



**Рис. 1.** Временные ряды деградации параметра  $U_{OL}$  ТТЛ ИС типа 133ЛА8 с различными методами получения недостающих значений с использованием системы Statistica for Windows:  
 а — интерполяция;  
 б — прогнозы линейной регрессии;  
 в — сглаживание скользящим средним ряда деградации, пропуски которого заполнены методом интерполяции;  
 г — сглаживание скользящим средним ряда деградации, пропуски которого заполнены прогнозами линейной регрессией;  
 д — сглаживание медианной ряда деградации, пропуски которого заполнены методом интерполяции

сказывающей» модели процесса деградации параметров ИС, оставшуюся же часть или части использовать для «проверки» («экзамена») этой модели, то есть для оценки того, насколько хорошо предсказывает эта модель. Прогнозирование долговечности ИС до наступления параметрических отказов произведем с использованием метода Бокса-Дженкинса [7–10]. В данном случае рациональным критерием, позволяющим разбить исходный ряд деградации на части, является периодичность замеров: до 30 тыс. ч замер параметров осуществляется через 1000 ч, а после 30 тыс. ч — через каждые 10 тыс. ч. Для того чтобы при-

рода ряда деградации как можно меньше искажалась, применим методы получения недостающих значений лишь к той части временного ряда, где существуют пропуски.

С этой целью ряд деградации параметра  $U_{OL}$  ТТЛ ИС типа 106ЛБ1 разбивается на две части: от 0 до 30 тыс. ч — исходные данные, с 30 до 120 — аппроксимация кубическим сплайном. Например, между 30 и 40 тыс. ч для выбранного шага 1000 ч необходимо 9 недостающих значений.

Затем ряд продолжительностью 120 тыс. ч, составленный из исходных и аппроксимированных значений, разбивается на 4 ряда.

Для ряда 1 (30 тыс. ч испытаний) строится прогноз с 30 до 120 тыс. ч, для ряда 2 (60 тыс. ч испытаний) строится прогноз с 60 до 120 тыс. ч, для ряда 3 (90 тыс. ч испытаний) — прогноз с 90 до 120 тыс. ч, а для ряда 4 (120 тыс. ч испытаний) — прогноз со 120 тыс. ч до наступления параметрического отказа. К каждому ряду подгоняется своя АРПСС-модель, с помощью которой и осуществляется прогнозирование. На рис. 2 показана графическая верификация прогнозов модели АРПСС(0,1,2) для ряда деградации параметра  $U_{OL}$ .

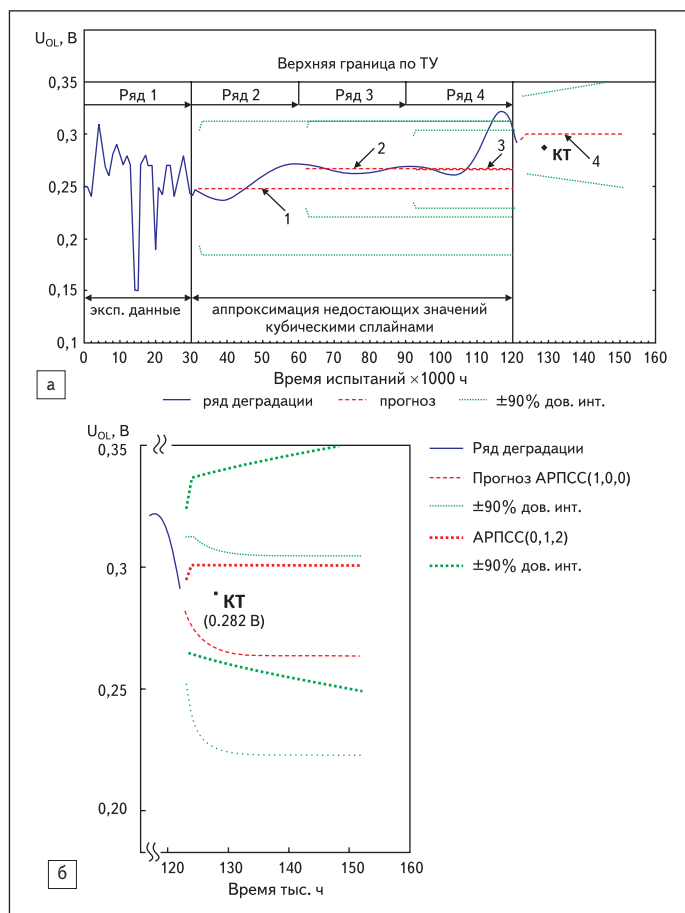
Подогнанные модели к четырем рядам процесса деградации параметра  $U_{OL}$  с учетом оценок дисперсии белого шума  $\sigma_a^2$  сведены в таблице 1. В графе «Идентифицированная модель» в скобках обозначены стандартные ошибки оцениваемых параметров АРПСС-модели. В таблице 1 также приведена сводка совокупного критерия согласия  $Q$ , примененного к остаточным ошибкам модели АРПСС(0,1,2). Сравнивая параметры  $\theta_1$  и  $\theta_2$  модели АРПСС(0,1,2) и их стандартные ошибки для рядов 1, 2 и 3, видим, что они устойчивы на временном диапазоне продолжительностью 120 тыс. ч.

Эвентуальная прогнозирующая функция модели АРПСС(0,1,2) для упреждений  $l \geq 2$  показывает, что прогнозы модели АРПСС(0,1,2) рассматриваемых временных рядов 1, 2, 3, 4 в момент времени  $t$  будут следовать прямой линии, параллельной временной оси. В соответствии с теорией временных рядов лучшими будут два первых прогнозных значения, поэтому на рис. 2а прогнозы модели АРПСС(0,1,2) представлены прямыми линиями. На рис. 2а также показан ряд деградации параметра  $U_{OL}$  с прогнозами моделей АРПСС, подогнанных к его частям (ряды 1–3) и 90%-ными доверительными интервалами. За параметрический отказ принято достижение верхней 90%-ной границы доверительного интервала отказового уровня, установленного в технических условиях (0,35 В).

Сравнение полученных прогнозов с рядом 4 (рис. 2) показало, что прогнозы, построенные с использованием моделей АРПСС, дают удовлетворительные результаты. Таким образом, анализ рис. 2а показывает, что модель АРПСС(0,1,2) адекватно описывает процесс деградации параметра  $U_{OL}$  в течение

**Таблица 1.** Сводка моделей АРПСС(0,1,2), идентифицированных для временных рядов деградации параметра  $U_{OL}$  ТТЛ ИС типа 106ЛБ1

Ряд	Идентифицированная модель	Совокупный критерий согласия, $Q$
1	$X_t = X_{t-1} + a_t - 0,400a_{t-1} - 0,596a_{t-2} + (0,032)^2$ (±0,169) (±0,167)	2,95
2	$X_t = X_{t-1} + a_t - 0,371a_{t-1} - 0,626a_{t-2} + (0,023)^2$ (±0,109) (±0,107)	5,74
3	$X_t = X_{t-1} + a_t - 0,360a_{t-1} - 0,638a_{t-2} + (0,019)^2$ (±0,087) (±0,084)	9,14
4	$X_t = X_{t-1} + a_t - 0,228a_{t-1} - 0,538a_{t-2} + (0,017)^2$ (±0,081) (±0,085)	11,90
Прогнозирующая функция модели АРПСС (0, 1, 2): $X_{t+l} = X_{t+l-1} + a_{t+l} - \theta_1 a_{t+l-1} - \theta_2 a_{t+l-2}$ Эвентуальная прогнозирующая функция модели АРПСС (0, 1, 2): $X_t(l) = X_t(l-1), l \geq 2, 3, \dots$		



**Рис. 2.** Графическая верификация прогнозов модели АРПС(0,1,2) для ряда деградации параметра  $U_{OL}$  ТТЛ ИС типа 106ЛБ1 при испытаниях на долговечность в течение 120 тыс. ч (недостающие значения получены аппроксимацией кубическим сплайном): а) 1 — прогноз для ряда 1; 2 — прогноз для ряда 2; 3 — прогноз для ряда 3; 4 — прогноз для ряда 4; б) сравнение прогнозов модели АРПС(0, 1, 2) и конкурирующей модели АРПС(1, 0, 0) с константой; КТ — контрольная точка (наихудшее значение параметра после 130 тыс. ч испытаний)

120 тыс. ч испытаний. Прогнозирование долговечности ТТЛ ИС типа 106ЛБ1 до наступления параметрических отказов следует вести с использованием модели АРПС(0,1,2), идентифицированной для ряда 4.

В таблице 2 приведены результаты тестирования модели АРПС(0,1,2) ряда 4 деградации параметра  $U_{OL}$  в течение 120 тыс. ч. Из таблицы 2 видно, что модель АРПС(0,1,2), построенная для ряда 4, на основании положительных результатов тестирования (Да) может быть признана адекватной.

Рассмотрим проверку на «избыточность» (перепараметризация модели) модели АРПС(0,1,2). Испытание модели АРПС(0,1,2) для ряда 4 путем введения избыточных параметров скользящего среднего  $\theta_i$ ,  $i > 2$  согласно рекомендациям работ [6–9] показало, что воспроизводимость значений ряда деградации параметра  $U_{OL}$  не улучшается. Поиск альтернативных (конкурирующих) моделей АРПС идентифицированной модели АРПС(0,1,2), связанный с тем, что малые изменения оператора скользящего среднего могут быть почти точно скомпенсиро-

ваны соответствующими изменениями оператора авторегрессии [6–9], дал положительный результат. Выявлена конкурирующая модель АРПС(1,0,0):  $X_t = 0,264 + 0,669X_{t-1} + a_t$ . Все параметры конкурирующей модели статистически значимы. Данная модель более экономична, чем основная модель АРПС(0,1,2).

Для подтверждения или опровержения достоверности прогнозов деградации параметров  $U_{OL}$  и  $U_{OH}$  ТТЛ ИС типа 106ЛБ1 АРПС-моделей был проведен контрольный замер параметров этих же ИС по прошествии еще 10 тыс. ч. Таким образом, фактическая наработка этих ИС при испытаниях на долговечность составила 130 тыс. ч. Отказов за это время не зафиксировано.

Сравнение точечного прогноза процесса деградации параметра  $U_{OL}$  на момент времени 130 тыс. ч, построенного с использованием модели АРПС(0,1,2) по наработке 120 тыс. ч, с контрольной точкой (КТ) на момент времени 130 тыс. ч показало, что прогнозное значение составило 0,300 В, и оказалось завышенным на величину 0,018 В (рис. 2б). Однако КТ укладывается в 90%-ный довери-

тельный интервал модели АРПС(0,1,2). В целом можно считать, что получено хорошее согласие точечных прогнозов с КТ.

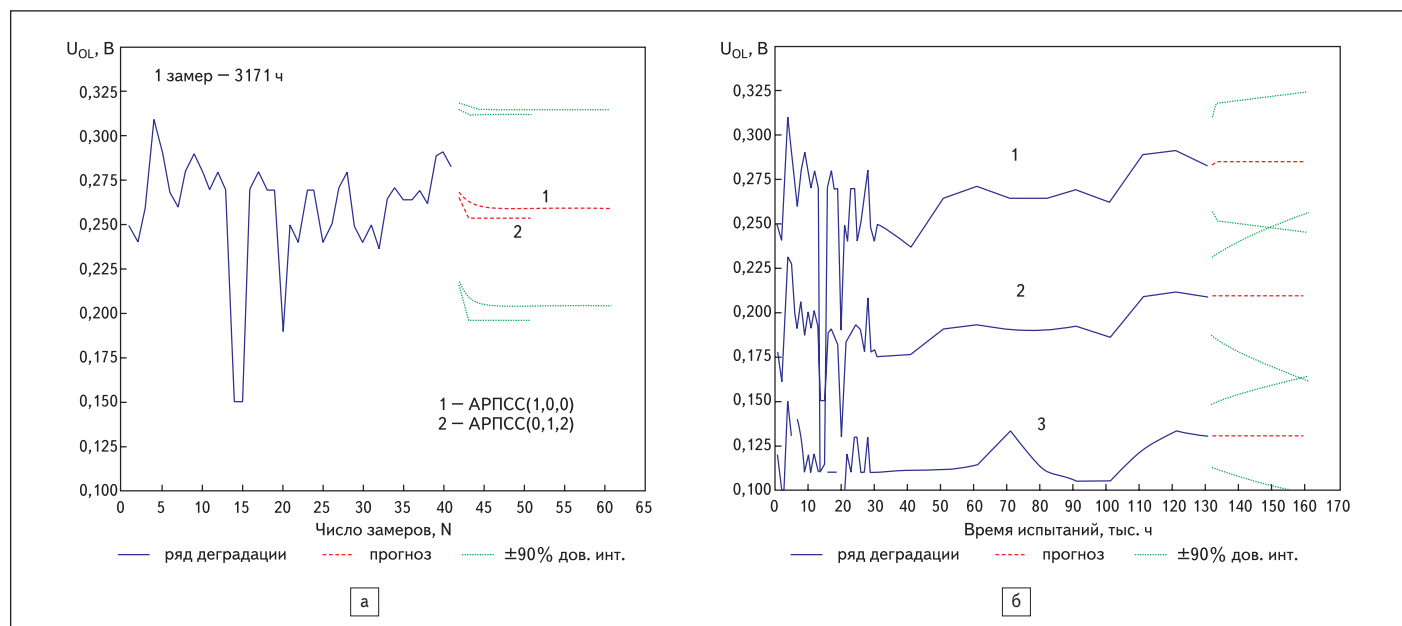
На рис. 16 показано сравнение прогнозов модели АРПС(0,1,2) с конкурирующей моделью АРПС(1,0,0):  $X_t = 0,264 + 0,669X_{t-1} + a_t$ . По точечным и вероятностным прогнозам конкурирующей модели параметрический отказ не наблюдается. Точечный прогноз с использованием конкурирующей модели на момент времени 130 тыс. ч дает величину 0,265 В, которая оказывается заниженной на величину 0,017 В относительно КТ (0,282 В). Однако если строить долгосрочные прогнозы на глубину, в 2–3 раза превышающую глубину исходного ряда деградации, то они могут стать небезопасными и противоречить нашему представлению о процессе деградации, так как точечные прогнозы начинают носить асимптотический характер, то есть прогноз-ные значения перестают изменяться.

В таблице 3 приведены результаты прогнозирования процесса деградации параметра  $U_{OL}$  по данным испытаний на долговечность ТТЛ ИС типа 106ЛБ1 в течение 130 тыс. ч

**Таблица 2.** Обобщенные результаты тестирования идентифицированной модели АРПС(0, 1, 2) для ряда 4 параметра  $U_{OL}$  ТТЛ ИС типа 106ЛБ1

Проверяемая гипотеза	Критерий	Результат
Выполнение условия стационарности и обратимости	$\theta_1 = 0,228 < 1, \theta_2 = 0,538 < 1$	Да
Статистическая значимость параметров	$t_3(118) = 2,818 > t_{0,05}(118) = 1,98; \theta_1$ $t_3(118) = 6,361 > t_{0,05}(118) = 1,98; \theta_2$	Да
Корреляция параметров	$ r(\theta_1, \theta_2)  = 0,440 < 0,5$	Отсутствует (Да)
Автокорреляция в остаточных ошибках	$ r_k(a_k)  < \pm 2/\sqrt{n}$	Отсутствует (Да)
Совокупный критерий согласия. Q приближенно распределено как $\chi^2$	$Q = (n-1) \sum_{k=1}^p r_k^2(a_k) = 11,90 < \chi^2_{17;0,1} = 24,8$ $Q = (n-1) \sum_{k=1}^p r_k^2(a_k) = 11,90 < \chi^2_{17;0,05} = 27,6$	Да
Сумма квадратов остатков (СКО), % Отношение дисперсий $(1 - \frac{\sigma_a^2}{\sigma_{\epsilon^2}}) \times 100\%$	75,37 13,433	
Качественное исследование остаточных ошибок	Отсутствие тренда в остаточных ошибках	Да
Нормальный закон распределения остаточных ошибок	Остатки модели АРПС(0, 1, 2) не удовлетворительно ложатся на прямую; тест Колмогорова-Смирнова: $d = 0,233 > k_{121;0,01} = 0,161$	Нет
Испытание модели	Введение избыточных параметров не улучшает качество подгоняемой модели. Альтернативная модель АРПС(1, 0, 0): $X_t = 0,264 + 0,669X_{t-1} + a_t$	Нет
Оптимальность модели АРПС для временного ряда по сравнению с моделью линейного тренда	$\sigma_a(\text{АРПС}(0, 1, 2)) = 0,0174 < \sigma(f(t) + \epsilon) = 0,026$ (экспоненциальное сглаживание)	Да

Примечание:  $K_{n,\alpha}$  — критическая точка распределения Колмогорова-Смирнова;  $X^2_{k-y-1}$  — критическая точка распределения  $\chi^2$ ;  $\alpha$  — уровень значимости;  $n$  — число наблюдений;  $k$  — число интервалов;  $\gamma$  — число оцениваемых параметров.



**Рис. 3.** Прогнозирование процесса деградации параметра  $U_{OL}$  ТТЛ ИС типа 106ЛБ1 при испытаниях на долговечность в течение 130 тыс. ч на глубину 30 тыс. ч: а) ряд деградации без пропусков; б) недостающие значения ряда получены методом интерполяции: 1 — наихудшие значения; 2 — средние значения; 3 — наилучшие значения

на глубину 30 тыс. ч с использованием АРПСС-моделей. В случае аппроксимации кубическими сплайнами используются только наилучшие значения параметра  $U_{OL}$  в выборке, а для метода интерполяции используются наихудшие, средние и наилучшие значения.

На рис. 3а показано прогнозирование процесса деградации параметра  $U_{OL}$  ТТЛ ИС типа 106ЛБ1 на глубину 30 тыс. ч для ряда деградации без пропусков, составленного из наихудших значений с использованием основной модели АРПСС(0,1,2):  $\nabla^1 X_t = a_t - 0,379a_{t-1} - 0,599a_{t-2}$  и конкурирующей модели АРПСС(1,0,0):  $X_t = 0,260 + 0,403X_{t-1} + a_t$ . Обе модели дают приемлемый результат. На рис. 3б показано прогнозирование процесса деградации параметра  $U_{OL}$  по наихудшим, средним и наилучшим значениям в выборке. Недостающие значения ряда заполнены методом интерполяции. Все прогнозы носят асимптотический характер.

Анализируя таблицу 3, можно сделать вывод, что общий вид модели АРПСС(0,1,q) для рядов деградации параметра  $U_{OL}$ , составленных из наихудших, наилучших и минимальных значений параметра, в выборке не изменился, меняется лишь число параметров скользящего среднего. Разница между последним точечным прогнозным значением на глубину 30 тыс. ч для ряда деградации без пропусков с использованием модели АРПСС(0,1,2):  $\nabla^1 X_t = a_t - 0,379a_{t-1} - 0,599a_{t-2}$  и для ряда деградации с пропусками, заполненными методом интерполяции с использованием модели АРПСС(0,1,2):  $\nabla^1 X_t = a_t - 0,291a_{t-1} - 0,557a_{t-2}$  составляет 0,025 В.

Представляет интерес рассмотрение достоверности «грубых» прогнозов АРПСС-модели (долгосрочных прогнозов до наступления параметрического отказа), построенные к ряду деградации параметра  $U_{OL}$  ТТЛ ИС типа

**Таблица 3.** Результаты прогнозирования процесса деградации параметра  $U_{OL}$  ТТЛ ИС типа 106ЛБ1 (130 тыс. ч испытаний на долговечность) на глубину 30 тыс. ч

Вид модели АРПСС	Асимптотические точечные прогнозы на глубину 30 тыс. ч
Ряд деградации без пропусков	
Наихудшие значения (0, 1, 2): $\nabla^1 X_t = a_t - 0,379a_{t-1} - 0,599a_{t-2}$ (1, 0, 0): $X_t = 0,260 + 0,403X_{t-1} + a_t$	0,260 0,254
Пропуски заполнены методом интерполяции	
Наихудшие значения (0, 1, 2): $\nabla^1 X_t = a_t - 0,291a_{t-1} - 0,557a_{t-2}$	0,285
Средние значения (0, 1, 1): $\nabla^1 X_t = a_t - 0,656a_{t-1}$	0,209
Наилучшие значения (0, 1, 1): $\nabla^1 X_t = a_t - 0,722a_{t-1}$	0,131

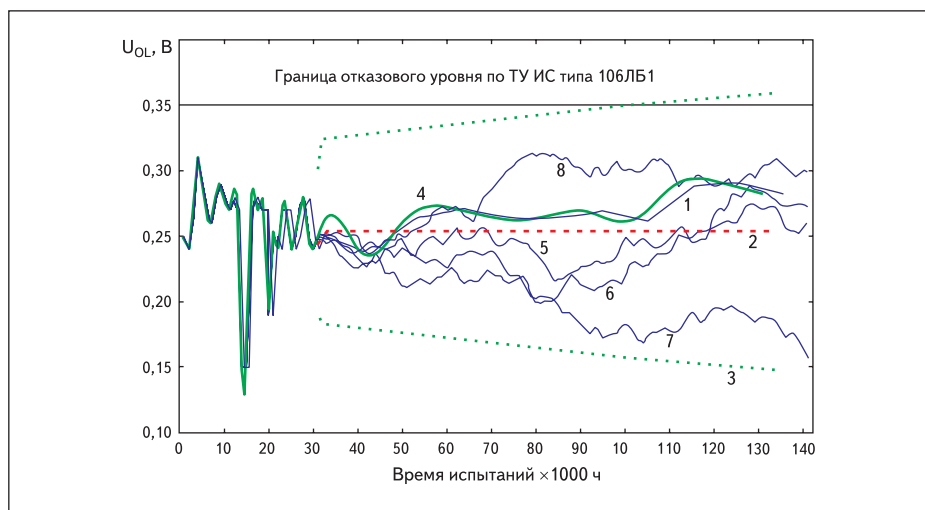
106ЛБ1 при испытаниях на долговечность. На рис. 4 показано поведение параметра  $U_{OL}$  ТТЛ ИС типа 106ЛБ1 при испытаниях на долговечность (наихудшие значения). Ряд деградации с пропусками заполняется методом интерполяции (кривая 1) и аппроксимацией кубическим сплайном (кривая 4). Подбирается адекватная модель АРПСС(0,1,2) к ряду деградации с пропусками, заполненными методом интерполяции, параметры модели оцениваются методом максимального правдоподобия. Далее осуществляется построение прогноза к части ряда с 30 до 130 тыс.ч, прогнозирование назад (кривая 2) с использованием модели АРПСС(0,1,2), подогнанной по целому ряду (кривая 1). Видим, что точечный прогноз (кривая 2) модели АРПСС(0,1,2) достаточно хорошо отражает поведение ряда в будущем.

Для сравнения качества прогнозов модели АРПСС(0,1,2), построенных с 30 до 130 тыс. ч, то есть на 100 тыс. ч вперед (глубина прогнозирования почти в 3 раза превышает исходную глубину ряда), рассмотрим статистически воз-

можные траектории (кривые 5, 6, 7, 8) модели АРПСС(0,1,2)  $\nabla^1 X_t = a_t - 0,291a_{t-1} - 0,557a_{t-2}$ , полученные методом Монте-Карло, путем генерации значений белого шума  $a_t$  с нормальным законом распределения ( $\mu = 0$ ,  $\sigma^2 = 0,005$ ).

Из рис. 4 видно, что вероятностные траектории ряда укладываются в 90%-ный доверительный интервал модели АРПСС(0,1,2). Кроме того, видно, что чем на большую глубину будем прогнозировать, тем сильнее отстоят друг от друга вероятностные траектории, и тем быстрее будут раскрываться 90%-ные доверительные интервалы АРПСС-модели. Из рис. 4 также видно, что в районе 100 тыс. ч по верхней границе 90%-ного доверительного интервала модели АРПСС(0,1,2) фиксируется параметрический отказ, тогда как по экспериментальным данным он не фиксируется (кривая 1).

Эвентуальная прогнозирующая функция модели АРПСС(0,1,2) для ряда деградации параметра  $U_{OL}$  ТТЛ ИС типа 106ЛБ1 показывает, что модель вычисляет «точно» только первые два прогнозных значения, далее прогнозы будут следовать прямой линии, параллельной временной оси. Графическая верификация показывает, что «долгосрочные» точечные прогнозы модели АРПСС(0,1,2) для ряда деградации параметра  $U_{OL}$  ТТЛ ИС типа 106ЛБ1 вполне состоятельны. Сравнение с экспериментальными данными показывает, что пересечение доверительным интервалом границы параметрического отказа, фиксируемое как параметрический отказ, показывает, что степень доверия к точечным прогнозам упала до некоего критического уровня, а долгосрочные точечные прогнозы не могут быть признаны состоятельными. Для ТТЛ ИС типа 106ЛБ1 для параметра  $U_{OL}$  по рядам деградации без пропусков парамет-



**Рис. 4.** Поведение параметра  $U_{OL}$  ТТЛ ИС типа 106ЛБ1 при испытаниях на долговечность:

1 — ряд деградации с пропусками, заполненными методом интерполяции, и прогноз с использованием модели АРСС(0,1,2), построенный к части ряда (от 30 до 130 тыс. ч) прогнозированием назад (2) с 90%-ным доверительным интервалом (3); 4 — аппроксимация ряда кубическим сплайном; 5, 6, 7, 8 — статистически возможные траектории ряда 1, полученные методом Монте-Карло путем генерации значений белого шума модели АРСС(0,1,2)

рический отказ не фиксируется; по 120 тыс. ч испытаний в случае заполнения пропусков аппроксимацией кубическими сплайнами прогнозируемое время составляет 150 тыс. ч, а по 130 тыс. ч испытаний в случае использования метода интерполяции для заполнения пропусков прогнозируемое время составляет более 1000 тыс. ч. По уравнению линейной регрессии параметрический отказ так же не фиксируется. ■

*Работа выполнена по программе гранта РФФИ 05-08-01225-а.*

## Литература

1. Строгонов А. Прогнозирование деградации выходных параметров ТТЛ ИС. Часть I // Компоненты и технологии. 2005. № 8.
2. Строгонов А. Прогнозирование деградации выходных параметров ТТЛ ИС. Часть II // Компоненты и технологии, 2005, № 9.
3. Строгонов А. Использование цифровых фильтров для моделирования деградации выходных

параметров ТТЛ ИС в системе Matlab/Simulink // Компоненты и технологии. 2005. № 8.

4. Строгонов А. Использование нейронных сетей для прогнозирования деградации выходных параметров ТТЛ ИС в системе Matlab/Simulink // Компоненты и технологии. 2006. № 1.
5. Строгонов А. Использование линейной нейронной сети в задачах прогнозирования деградации выходных параметров ИС // Компоненты и технологии. 2006. № 2.
6. Боровиков В. STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере: Для профессионалов. 2-е изд. (+CD). СПб.: Питер. 2003.
7. Справочник по прикладной статистике. В 2-х т. Т. 2: Пер. с англ. М.: Финансы и статистика. 1990.
8. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов. Прогноз и управление. М.: Мир. 1974.
9. Боровиков В. П., Ивченко Г. И. Прогнозирование в системе STATISTICA в среде Windows. Основы теории и интенсивная практика на компьютере: Учеб. пособие. М.: Финансы и статистика. 1999.
10. Грешилов А. А., Стакун В. А., Стакун А. А. Математические методы построения прогнозов. М.: Радио и связь. 1997.