

## АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАДЁЖНОСТИ ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ С РЕЛАКСАЦИЕЙ

к.т.н. В.И. Гридин  
(представил д.т.н., проф. В.С. Харченко)

*Предлагается аналитическая модель надёжности цифровых устройств, имеющих периодические режимы работы и восстановления работоспособности (релаксации). Рассматривается методика учёта времени переработки-недорелаксации и их влияние на интенсивность отказа и вероятность безотказной работы цифрового устройства. Моделируется наработка до отказа таких устройств с учётом различных зависимостей изменения интенсивности отказа от времени переработки. Анализируются возможные варианты работы.*

**Введение.** При длительной эксплуатации цифровых устройств (ЦУ) в условиях космической радиации возникает насыщение кристаллов больших интегральных схем (БИС), в частности, программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) остаточной радиацией, которая приводит к повышению потока сбоев и отказам бортовой аппаратуры. Одним из способов уменьшения насыщения, изложенном в [1, 2], является периодическое отключение для восстановления работоспособности (далее релаксация). Кроме того, чередование работы и «отдыха» требует ряд цифровых устройств при функционировании на предельных нагрузках, а также в случаях недостаточного отвода тепла в условиях космического вакуума и при малых габаритах бортовой аппаратуры.

Цель статьи – разработка и исследование аналитических моделей надёжности цифровых устройств, имеющих ненагруженные режимы работы с учетом их периодической релаксации.

**Аналитическая модель надёжности системы с релаксацией.** Процесс функционирования системы с релаксацией можно описать как последовательность чередующихся интервалов работы  $T_p$  и восстановления (релаксации)  $T_{рел}$ , причём за период релаксации должно происходить полное восстановление работоспособности устройства. Следовательно, существует коэффициент релаксации

$$K_{рел} = T_p / T_{рел}, \quad (1)$$

который характеризует возможность восстановления работоспособности системы. Очевидно, что при  $K_{рел} < 1$  невозможно обеспечить непрерывную работу аппаратуры с использованием двух резервных каналов ЦУ.

Существует предельное время работы устройства, которое соответствует периоду работы  $T_p$ , после которого должен наступать период релаксации  $T_{pел}$ . В случае невыполнения условия  $\Delta t_p \leq T_p$ , наступают необратимые процессы, связанные с превышением допустимой температуры, уровня насыщения, внутренних напряжений кристаллов и т.д., которые приводят к снижению надежности ЦУ. Это время (период переработки  $\Delta t_{пр}$ ) связано с периодом работы соотношением  $\Delta t_{пр} = \Delta t_p - T_p$  при выполнении условия  $\Delta t_p > T_p$ .

Аналогично надежность ЦУ снижается при уменьшении времени релаксации  $\Delta t_{пр}$  (времени недостаточной релаксации,  $\Delta t_{пр} = T_{pел} - \Delta t_{пр}$ ) при выполнении условия  $T_{pел} > \Delta t_{пр}$ . Графики функции вероятности безотказной работы (ВБР)  $P(t)$  для различных вариантов процесса представлены на рис. 1.

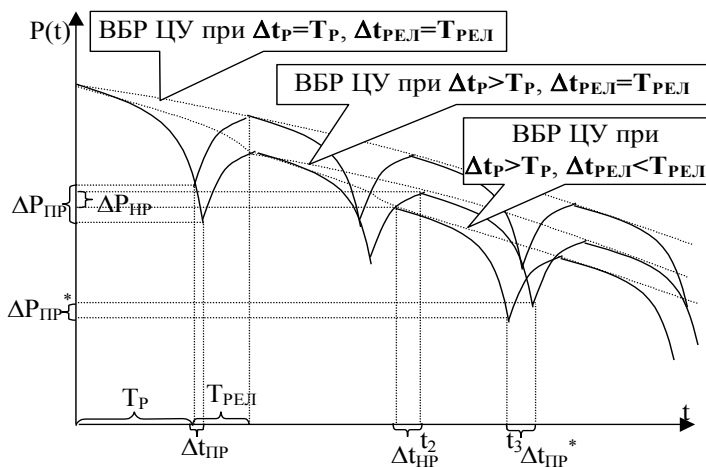


Рис. 1. Графическое представление временных зависимостей  $P(t)$  в ЦУ с релаксацией

При уменьшении времени восстановления (рис. 1) на  $\Delta t_{пр}$  и последующем нормальном цикле работы ( $t_p = T_p$ ) происходит переработка  $\Delta t_{пр}^* = \Delta t_{пр}$ , которая и уменьшает ВБР устройства на величину  $\Delta R_{пр}^* = \Delta R_{пр}$ .

В периоды переработки ( $\Delta t_{пр}$ ) происходят необратимые процессы, вследствие которых изменяется интенсивность отказов цифровых устройств. Графически это представлено на рис. 2, а, б для цифровых устройств с линейной и нелинейной зависимостями изменения интенсивности отказов от времени соответственно.

Зная текущую суммарную переработку и недорелаксацию устрой-

ства  $\Delta t_{\text{ПР}\Sigma}$  для ЦУ с линейной зависимостью интенсивности отказов от времени, которая характерна для распределений, подчиняющихся закону распределения Рэлея, возможно получить модель надёжности системы, используя принцип суперпозиции распределений:

$$\mathbf{P}_{\Sigma}(t) = \mathbf{P}_0(t) \mathbf{P}_{\text{ПР}}(\Delta t_{\text{ПР}\Sigma}), \quad (2)$$

где  $\mathbf{P}_0(t)$  – ВБР ЦУ без учёта переработки - недорелаксации.

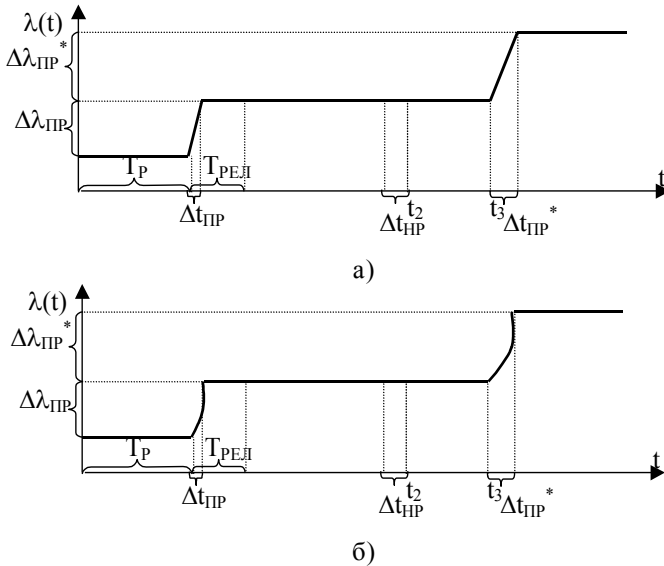


Рис. 2. График линейной (а) и нелинейной (б) зависимости изменения интенсивности отказов от времени переработки и недорелаксации

Принимая допущение об экспоненциальном законе распределения времени до отказа  $\mathbf{P}_0(t)$  с интенсивностью отказов  $\lambda_0$ , и законе Рэлея для  $\mathbf{P}_{\text{ПР}}(\Delta t_{\text{ПР}\Sigma})$ , выражение (2) принимает вид:

$$\mathbf{P}_{\Sigma}(t) = e^{-\lambda_0 t} e^{-\frac{\Delta t_{\text{ПР}\Sigma}^2}{2\sigma^2}} = e^{-\frac{\lambda_0 \sigma^2 t + 0,5 \Delta t_{\text{ПР}\Sigma}^2}{\sigma^2}}, \quad (3)$$

где  $\sigma$  – параметр распределения Рэлея.

Для ЦУ с нелинейной зависимостью интенсивности отказов (ВБР устройства  $\mathbf{P}_{\Sigma}^{\text{НЕЛ}}(t)$  при переработке соответствует распределению Вейбулла при  $k > 1$  (для интенсивности отказов  $\Delta \lambda_{\text{ПР}}(t)$  на рис.3  $k > 2$ ). Для такого распределения изменение интенсивности отказов зависит от продолжительности переработки в каждом цикле работы устройства, и поэтому показатель суммарной переработки для данного устройства не применим. Возможно только введение среднего времени переработки –

недорелаксации за цикл. Поэтому ВБР ЦУ за  $N$  циклов работы описывается формулой

$$P_{\Sigma}^{\text{НЕЛ}}(t) = P_0(t) - \sum_{i=1}^N \Delta P_{\text{ПРi}}(\Delta t_{\text{ПРi}}), \quad (4)$$

где  $\Delta P_{\text{ПРi}}(\Delta t_{\text{ПРi}})$  – снижение ВБР ЦУ за  $i$ -й цикл в результате переработки-недорелаксации.

**Моделирование надёжности ЦУ с релаксацией.** Для упрощения моделирования был введен коэффициент переработки  $k_{\text{ПР}}$ , связывающий текущее время функционирования ЦУ и суммарную переработку за такт работы-релаксации:

$$\Delta t_{\text{ПР}\Sigma} = k_{\text{ПР}} \cdot t. \quad (5)$$

Тогда выражение (3) принимает вид:

$$P_{\Sigma}(t) = e^{-\frac{\lambda_0 \sigma^2 t + 0,5 \cdot k_{\text{ПР}}^2 t^2}{\sigma^2}}. \quad (6)$$

Устанавливая связь между  $\sigma$  и  $\lambda$ , как  $\sigma = 1/\lambda$  и  $\sigma = 0,1/\lambda$ , получим зависимости ВБР от  $\lambda t$  и  $k$  ЦУ с релаксацией. Результаты машинного моделирования (рис. 3, а, б) позволяют сделать вывод о том, что при незначительном увеличении интенсивности отказов в результате переработки, соизмеримой с интенсивностью отказов ЦУ без переработки, даже при  $\Delta t_{\text{ПР}\Sigma}$ , составляющем 50 % времени эксплуатации, изменения ВБР незначительны в течение всего периода эксплуатации, и составляют до 5 % ВБР цифровых устройств.

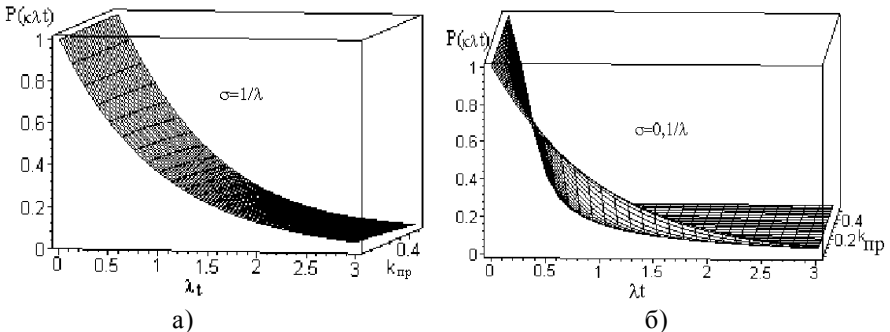


Рис. 3. Результаты моделирования надёжности ЦУ с релаксацией при линейной зависимости изменения интенсивности отказов от времени переработки при  $\sigma = 1/\lambda$  (а) и  $\sigma = 0,1/\lambda$  (б)

При изменении интенсивности отказов в 10 раз, при малых  $\Delta t_{\text{ПР}\Sigma}$ , изменений практически нет, а при увеличении  $\Delta t_{\text{ПР}\Sigma}$  наблюдается значи-

тельное снижение ВБР ЦУ в начальный период эксплуатации.

**Выводы.** Полученная аналитическая модель надёжности ЦУ применима для систем с линейной зависимостью изменения интенсивности отказов от времени переработки, что согласно [3] соответствует надёжности аппаратуры, имеющей элементы с выраженным эффектом старения при тепловых перегрузках.

Предложенная методика учёта переработки - недорелаксации ЦУ, связывающая  $\Delta R_{ПР}^* = \Delta R_{НР}$ , позволяет сделать рекомендации по применению такого устройства, позволяющие минимизировать потери безотказности. Их суть состоит в том, что при уменьшении времени релаксации  $\Delta t_{НР}$  в одном такте, в следующем на такую же величину необходимо уменьшить  $\Delta t_{р}$  время работы.

Применение ЦУ с выраженным изменением интенсивности отказов при переработке, составляющей свыше 10 % от времени эксплуатации недопустимо, поскольку приводит к значительному уменьшению вероятности безотказной работы устройства по сравнению со структурами с обычным режимом работы.

При аналитическом моделировании надёжности с нелинейной зависимостью изменения интенсивности отказов элементов от времени переработки возникают сложности, связанные с необходимостью учёта снижения ВБР ЦУ в каждом такте. Для решения этой задачи [4] необходимо построение специальной имитационной модели.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Neil W. Bergmann, Anwar S. Dawood. *Reconfigurable Computers in Space: Problems, Solutions and Future Directions // Proceedings of MAPLD 1999.*
2. *Commercial Microelectronics Technologies for Applications in the Satellite Radiation Environment / Kenneth A. LaBel, Michaele M. Gates, Amy K. Moran, Paul W. Marshall, Janet Barth, E.G. Stassinopoulos, Christina M. Siedleck, Cheryl J. Dale. – <http://radhome.gsfc.nasa.gov/radhome/papers> .*
3. Половко А.М. *Основы теории надёжности.* – М.: Наука, 1964. – 448 с.
4. Советов Б.Я., Яковлев С.А. *Моделирование систем.* – М.: Высш. шк., 1985. – 272 с.

Поступила 1.07.2002

**ГРИДИН Владимир Иванович**, канд. техн. наук, старший научный сотрудник научного центра при ХВУ. Область научных интересов – исследование надёжности многоверсионных систем с различными режимами работы резерва.

---