

УДК 621.9.02-192

ТЕХНИЧЕСКОЕ РЕЗЕРВИРОВАНИЕ – ОСНОВА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

М. И. Михайлов

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого, Республика Беларусь*

Приведена методика оптимизации робототехнической системы с различными видами резервирования.

Ключевые слова: робототехнические системы, эффективность, техническое резервирование.

TECHNICAL REDUNDANCY – THE BASIS FOR ENSURING THE EFFICIENCY OF ROBOTIC SYSTEMS

M. I. Mikhailov

Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

A methodology for optimizing a robotic system with various types of redundancy is presented.

Keywords: robotic systems, efficiency, technical redundancy.

Анализ исследований, выполненных в ФРГ, США, Швейцарии и других странах, позволил заключить, что эффективное время обработки на традиционных металлорежущих станках и станках с ЧПУ в случае участия человека (оператора) составляет только 6–10 % годового фонда рабочего времени [1–13]. Известно также, что в структуре времени обработки деталей на основе традиционных технологий доля основного времени составляет только около 30 %, а оставшаяся часть приходится на вспомогательное и подготовительно-заключительное время [1, 2] и др.

Кроме того, эффективность работы автоматизированного производства зависит от организации технологического процесса, т. е. от формирования и реализации потоков деталей и инструментов, а также от степени согласованности их взаимодействия. В свою очередь эти потоки формируются в зависимости от степени интеграции оборудования и их можно разделить на участки станков с ЧПУ, гибкие производственные модули (ГПМ), робототехнические системы (РТС) и гибкие производственные системы (ГПС) [10–13].

Для современных робототехнических систем надежность является необходимым условием их использования. Это качество тем важнее, чем сложнее и дороже система.

Современные тенденции обеспечения высокой надежности РТС следующие:

- использование высоконадежных структур РТС;
- использование надежных комплектных систем ЧПУ и приводов;
- применение подсистемы автоматической диагностики функционирования узлов, элементов, а также РТС в целом;
- использование высоконадежных механических элементов РТС;
- блочно-модульное построение узлов, элементов и систем.

Цель работы – повышение надежности робототехнических систем.

Надежность работы РТС исследовалась поэтапно. На каждом этапе обеспечивалось повышение надежности техническими методами.

Используя результаты эксплуатационной надежности отдельных компонентов технологического оборудования и его оснащения, определили наименее надежные составляющие системы РТС. Результаты анализа влияния работоспособности каждого элемента (среднее время безотказной работы i -го элемента T_i ; r_i – риск отказа i -го элемента в рассматриваемый момент времени t) представлены в таблице.

Исходные данные

Номер элемента	Компоненты технологической системы	r_i у. е.	t , мин
1	Накопитель инструмента на станке	200	15
2	Датчики накопителя	20	
3	Инструментальные блоки	20	
4	Схват робота-манипулятора	400	

Так как отказ любого из выделенных компонентов приводил к отказу всей системы, то риск отказа РТС определялся по следующей зависимости:

$$R_c = r_1 \int_0^t Q_1'(t) P_2(t) P_3(t) P_4(t) dt + r_2 \int_0^t Q_2'(t) P_1(t) P_3(t) P_4(t) dt + \\ + r_3 \int_0^t Q_3'(t) P_1(t) P_2(t) P_4(t) dt + r_4 \int_0^t Q_4'(t) P_1(t) P_2(t) P_3(t) dt,$$

где Q_i , P_i – соответственно вероятность отказа и безотказности i -го элемента РТС.

На первом этапе оптимизации исследовали функции вероятности безотказности и риска РТС при общем постоянном резервировании.

Вероятность безотказности всей системы определялась по уравнению [2]:

$$P_{ci} = 1 - \left(1 - \prod_{i=1}^m P_i \right)^{n+1},$$

где n , m – количество резервных подсистем.

Графики вероятности безотказности и риска отказа в относительных единицах времени представлены на рис. 1.

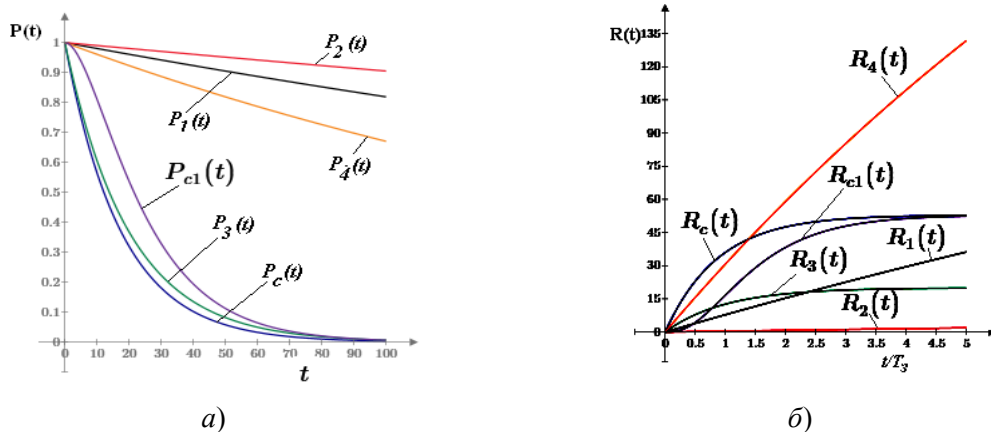


Рис. 1. Графики вероятности безотказности (а) и риска отказа (б)

Анализ результатов, представленных на рис. 1, позволяет заключить, что резервирование быстроизнашивающихся элементов приводит к росту вероятности безотказности РТС при $t = T_3$ – до 0,42, а риск отказа составил $R_c = 37$ у. е. Если время работы составит $2T_3$, то риск составит 47 у. е., а вероятность безотказности составит 0,18.

На втором этапе оптимизации исследовали функции вероятности безотказности и риска РТС при поэлементном постоянном резервировании низконадежных составляющих.

Вероятность безотказности подсистем и всей системы РТК определялась по уравнению

$$P_{pci} = 1 - (1 - P_i)^{n+1}; P_c = \prod_{i=1}^m P_{pci},$$

где n, m – количество резервных элементов.

Тогда вероятность отказа подсистемы и всей системы определялась:

$$Q_{pci} = 1 - P_{pci}; Q_c = 1 - P_c.$$

В результате риск всей системы рассчитывался по уравнению

$$R_c = r_1 \int_0^t Q'_{pc1}(t) P_{pc2}(t) P_{pc3}(t) P_{pc4}(t) dt + r_2 \int_0^t Q'_{pc2}(t) P_{pc2}(t) P_{pc3}(t) P_{pc4}(t) + \\ + r_3 \int_0^t Q'_{pc3}(t) P_{pc1}(t) P_{pc2}(t) P_{pc4}(t) dt + r_4 \int_0^t Q'_{pc4}(t) P_{pc1}(t) P_{pc2}(t) P_{pc3}(t) dt.$$

Результаты расчетов и графики вероятности безотказности и риска отказа в относительных единицах времени представлены на рис. 2.

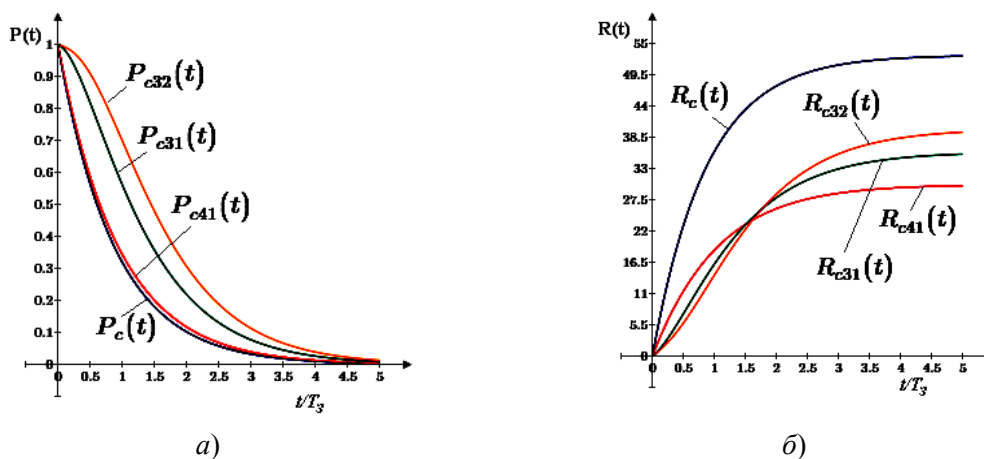


Рис. 2. Графики поэлементного резервирования:
а – вероятности безотказности; б – риска отказа

На рис. 2 приведен график вероятности безотказности исходной структурной схеме без резервирования ($P_c(t)$); $P_{c41}(t)$ – с одним резервным схватом робота; $P_{c31}(t)$, $P_{c41}(t)$ – с одним резервным схватом робота и одним резервным инструментом; $P_{c32}(t)$, $P_{c32}(t)$ – с одним резервным схватом робота и двумя резервными инструментами.

Анализ результатов, представленных на рис. 2, позволяет заключить, что принятый вид резервирования элементов обеспечит вероятность безотказности РТС при $t = T_3$ – до 0,32, а риск отказа составит $R_c = 35$ у. е. Если время работы составит $2T_3$, то риск составит 46 у. е., а вероятность безотказности составит 0,1.

На третьем этапе оптимизации исследовали функции вероятности безотказности и риска РТС при общем резервировании замещением.

Вероятности безотказности всей системы определялось по уравнению

$$P_{ci}(t) = e^{-\lambda_{ci} \sum_{k=0}^m \frac{\lambda_c^k t^k}{k!}},$$

где m – количество резервных подсистем.

Риск отказа подсистемы определялся по уравнению

$$P_{nci}(t) = \sum r_i \lambda_i \frac{1 - e^{-\lambda_c t}}{\lambda_c}.$$

Риск отказа всей системы рассчитывался по уравнению

$$R_{ci} = R_{nci} Q_{ci}.$$

Графики вероятности безотказности и риска отказа в относительных единицах времени представлены на рис. 3.

Анализ результатов, представленных на рис. 3, позволяет заключить, что принятый вид резервирования элементов обеспечит вероятность безотказности РТС при $t = T_3$ – до 0,32, а риск отказа составит $R_c = 37$ у. е. Если время работы составит $2T_3$, то риск составит 47 у. е., а вероятность безотказности составит 0,1.

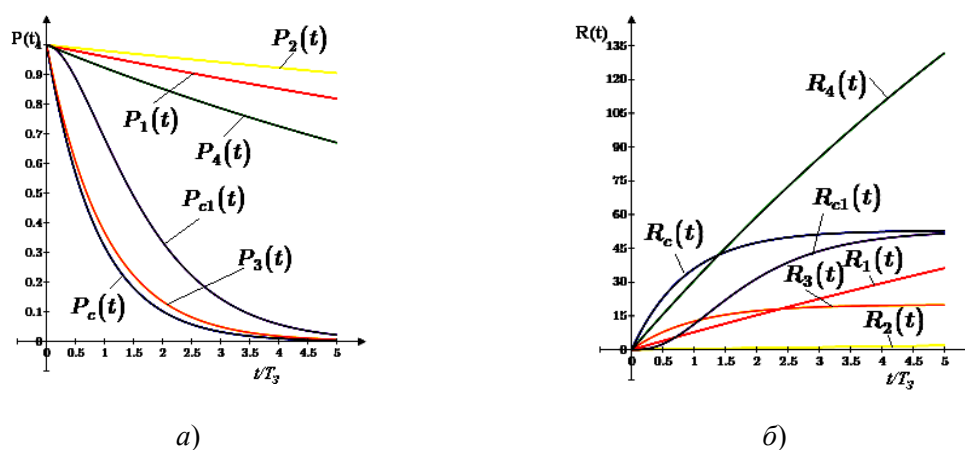


Рис. 3. Графики общего резервирования замещением:
а – вероятности безотказности; б – риска отказа

На четвертом этапе оптимизации исследовали функции вероятности безотказности и риска РТС при поэлементном резервировании замещением.

Резервирование выполнялось для наименее надежных элементов в системе.

Вероятность безотказности подсистемы и всей системы определялось по уравнению

$$P_{pci} = e^{-\lambda_i t \sum_{k=0}^n \frac{\lambda_i^k t^k}{k!}}; P_c = \prod_{i=1}^m P_{pci},$$

где m – количество резервных элементов.

В результате риск всей системы рассчитывался по уравнению

$$R_{ci} = r_1 \int_0^t Q'_{nc1}(t) P_{nc2}(t) P_{nc3}(t) P_{nc4}(t) dt + r_2 \int_0^t Q'_{nc2}(t) P_{nc1}(t) P_{nc3}(t) P_{nc4}(t) dt + \\ + r_3 \int_0^t Q'_{nc3}(t) P_{nc1}(t) P_{nc2}(t) P_{nc4}(t) dt + r_4 \int_0^t Q'_{nc4}(t) P_{nc1}(t) P_{nc2}(t) P_{nc3}(t) dt.$$

Графики вероятности безотказности и риска отказа в относительных единицах времени представлены на рис. 4.

Анализ результатов, представленных на рис. 4, позволяет заключить, что принятый вид резервирования элементов обеспечит вероятность безотказности РТК при $t = T_3$ – до 0,32, а риск отказа составит $R_c = 35$ у. е. Если время работы составит $2T_3$, то риск составит 46,5 у. е., а вероятность безотказности составит 0,1.

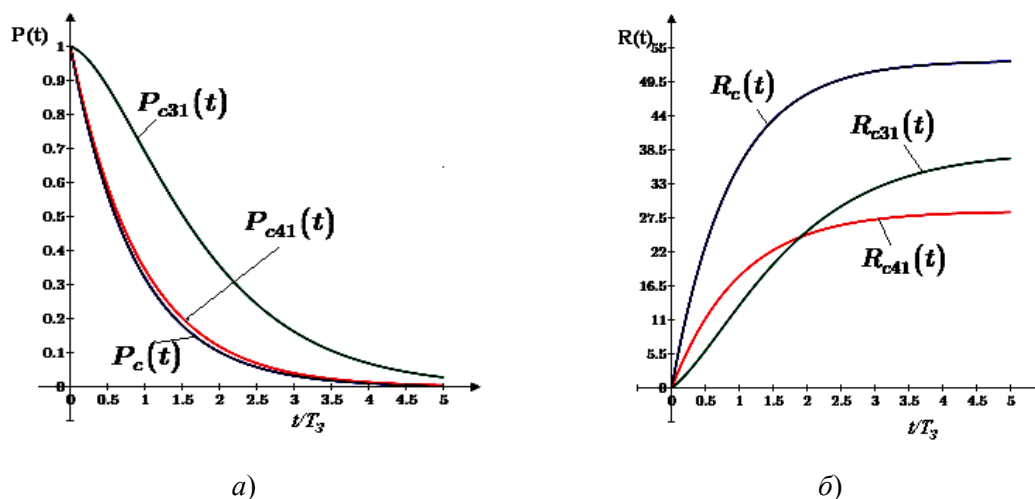


Рис. 4. Графики общего резервирования замещением:
а – вероятности безотказности; б – риска отказа

Полученные результаты позволяют заключить, что наименьший риск отказа РТС при общем резервировании замещением, а наименьшее количество резервных элементов в системе содержит поэлементное резервирование замещением, при котором необходим один резервный схват робота и два резервных инструмента. В обоих случаях риск отказа не превышает допустимый. Однако во втором случае оптимизация системы будет наиболее эффективна и экономически выгодна, так как резервируется наименьшее количество элементов.

Литература

1. Теоретические основы проектирования технологических комплексов / А. М. Русецкий, П. А. Витязь, М. Л. Хейфец [и др.] ; под общ. ред. А. М. Русецкого. – Минск : Беларус. навука, 2012. – 239 с.
2. Автоматизация и управление в технологических комплексах / А. М. Русецкий, П. А. Витязь, М. Л. Хейфец [и др.] ; под общ. ред. А. М. Русецкого. – Минск : Беларус. навука, 2014. – 375 с.

3. Михайлов, М. И. Надежность и диагностика технологических систем / М. И. Михайлов. – Минск : РИВШ, 2022. – 360 с.
4. Основы автоматизации машиностроительного производства / Е. Р. Ковальчук, М. Г. Косов, В. Г. Митрофанов [и др.] ; под ред. Ю. М. Соломенцева. – М. : Высш. шк., 1999. – 312 с.
5. Технологические основы гибких производственных систем / В. А. Медведев, В. П. Вороненко, В. Н. Брюханов [и др.] ; под ред. Ю. М. Соломенцева. – М. : Высш. шк., 2000. – 255 с.
6. Каштальян, И. А. Повышение эффективности использования станков с ЧПУ в условиях нестационарного резания / И. А. Каштальян. – Минск : БНТУ, 2008. – 311 с.
7. Иванов, А. А. Модернизация промышленных предприятий на базе современных систем автоматизации и управления / А. А. Иванов. – М. : Форум: ИНФРА-М, 2015. – 384 с.
8. Козырев, Ю. Г. Применение промышленных роботов / Ю. Г. Козырев. – М. : КНОРУС, 2021. – 488 с.
9. Булгаков, А. Г. Промышленные роботы: Кинематика, динамика, контроль и управление / А. Г. Булгаков, В. А. Воробьев. – М. : СОЛОН-Пресс, 2018. – 484 с.
10. Болотин, В. В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций / В. В. Болотин. – М. : Машиностроение, 1984. – 312 с.
11. Надежность и эффективность в технике : справочник : в 10 т. – М. : Машиностроение, 1987. Т. 2 : Математические методы в теории надежности и эффективности / под ред. Б.В. Гнеденко.
12. Михайлов, М. И. Повышение надежности сборного режущего инструмента / М. И. Михайлов. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2016. – 272 с.
13. Повышение ресурса трибосопряжений активированными методами инженерии поверхности / П. А. Витязь, В. И. Жорник, М. А. Белоцерковский, М. А. Леванцевич ; под общ ред. П. А. Витязя. – Минск : Беларус. навука, 2012. – 452 с.