

УДК 539.431:621.891

## ОПТИМИЗАЦИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ПО КРИТЕРИЯМ НАДЕЖНОСТИ

**М. И. МИХАЙЛОВ, К. В. ЛУКЬЯНЧИК, К. М. МИХАЙЛОВ**

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

*Разработана структура робототехнического комплекса. Определены критерии оценки надежности исследуемого комплекса. Представлена методика моделирования оптимизации структуры робототехнического комплекса. Рассчитаны критерии оптимизации.*

**Ключевые слова:** робототехнический комплекс, структура, надежность, риск, вероятность безотказности, моделирование.

## OPTIMIZATION OF ROBOTICS COMPLEX ACCORDING TO RELIABILITY CRITERIA

**M. I. MIHAILOV, K. V. LUKYANCHIK, K. M. MIHAILOV**

*Sukhoi State Technical University of Gomel,  
the Republic of Belarus*

*The structure of the robotic complex has been developed. Criteria for assessing the reliability of the complex have been determined. A methodology for modeling the optimization of the robotic complex structure has been presented. Optimization criteria have been calculated.*

**Keywords:** robotic complex, structure, reliability, risk, reliability function, modeling.

### **Введение**

Переориентация промышленности на выпуск широкого ассортимента продукции малыми сериями (партиями) в совокупности с постоянным снижением трудовых ресурсов привела к изменению использованных ранее форм организации производства и применяемого оборудования, т. е. к переходу от автоматизированных систем на основе аналогового управления к системам с числовым программным управлением (ЧПУ) [1–9]. Достижения в области микроэлектроники способствовали быстрому развитию этого направления в станкостроении и расширению номенклатуры станков с ЧПУ. Из исследований, выполненных в ФРГ, США, Швейцарии и других странах, известно, 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. В структуре времени обработки деталей на основе традиционных технологий доля основного времени составляет около 30 %, а оставшаяся часть приходится на вспомогательное и подготовительно-заключительное время [1, 2] и др.

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. Производственные структуры в зависимости от степени интеграции оборудования можно разделить на участки станков с ЧПУ, гибкие производственные модули (ГПМ), робототехнические комплексы (РТК) и гибкие производственные системы (ГПС) [10–13].

Эффективным средством комплексной автоматизации производственных процессов в промышленности являются РТК. Для современных робототехнических комплексов надежность становится необходимым условием их использования. Это качество тем важнее, чем сложнее и дороже система.

К современным тенденциям обеспечения высокой надежности РТК можно отнести следующие:

- использование высоконадежных структур РТК;
- применение надежных комплектных систем ЧПУ и приводов, так как в отечественной практике наибольшую интенсивность отказов (до 60 %) имеют управляющие системы и приводы;
- органическое включение в управляющую систему подсистем автоматической диагностики функционирования узлов, элементов, а также в РТК в целом;
- повышение надежности функционирования механических элементов РТК;
- блочно-модульное построение узлов, элементов и систем.

Таким образом, работоспособность комплекса оборудования ставит остро проблему надежности элементов его работы.

Цель работы – повышение надежности робототехнических комплексов.

### Основная часть

Надежность работы РТК исследовалась поэтапно. На первом этапе формировался РТК с учетом его производительности и особенностей робота. На втором этапе обеспечивалось повышение надежности технологическими и конструкторскими методами.

Для условий ОАО «Гомсельмаш» при обработке корпусов подшипников (рис. 1) разработан РТК на базе робота RA605 и станков 16ГС32СУ и 2С132ПМФ2 (рис. 2).

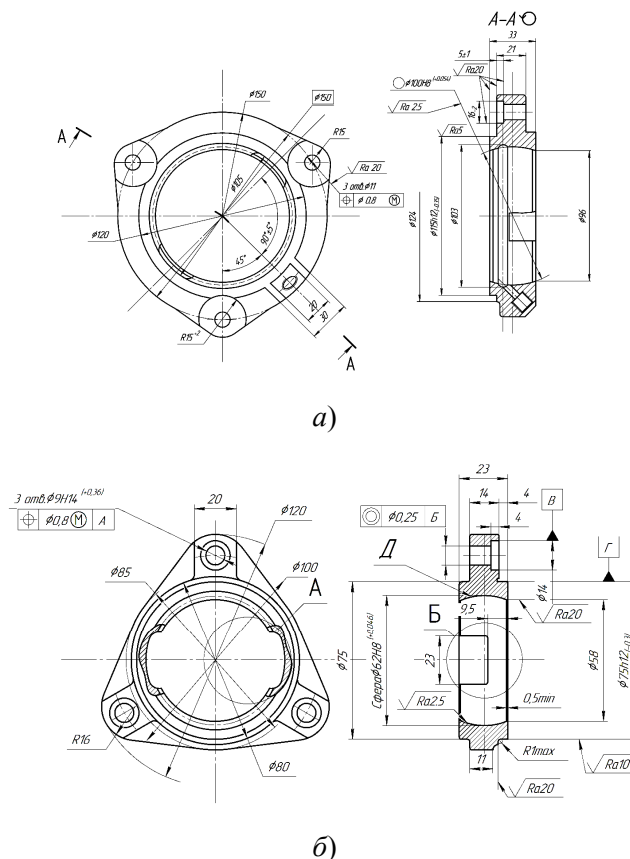


Рис. 1. Эскизы деталей КЗК-10-0290105 (а), КЗР 010105 (б)

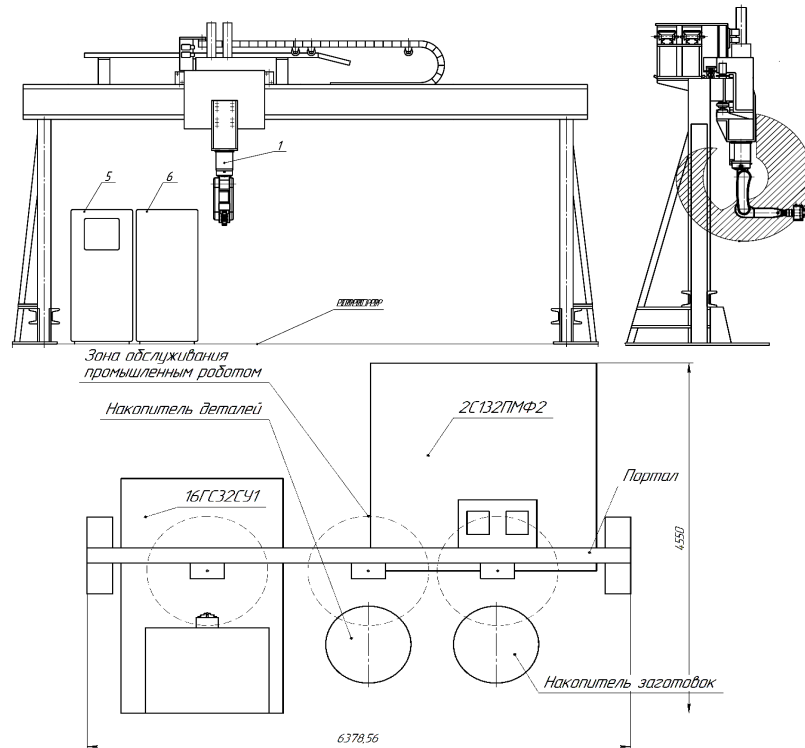


Рис. 2. Планировка робототехнического комплекса

Используя результаты эксплуатационной надежности отдельных компонентов технологического оборудования и его оснащения, определили наименее надежные составляющие системы РТК. 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	Инструмент токарного станка	200	15
2	Датчики накопителя	20	
3	Инструмент сверлильного станка	20	
4	Схват робота	400	

Так как отказ любого из выделенных компонентов приводил к отказу всей технологической системы, то риск отказа РТК 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 РТК.

Допускаемый риск при возникновении отказа определялся экспертным методом и составил 20 % от расчетного.

Оптимизация исходной структуры выполнялась для различных способов резервирования: постоянное общее резервирование; постоянное поэлементное резервирование; общее резервирование замещением и поэлементное резервирование замещением.

На первом этапе оптимизации исследовали функции вероятности безотказности и риска РТК без резервирования. Результаты расчетов даны на рис. 3.

На рис. 3 были введены следующие обозначения:  $P_1(t)$ ,  $P_2(t)$ ,  $P_3(t)$ ,  $P_4(t)$   $P_c(t)$  – вероятность безотказности каждого отдельного элемента и РТК в целом;  $R_1(t)$ ,  $R_2(t)$ ,  $R_3(t)$ ,  $R_4(t)$ ,  $R_c(t)$  – риск отказа каждого отдельного элемента и РТК.

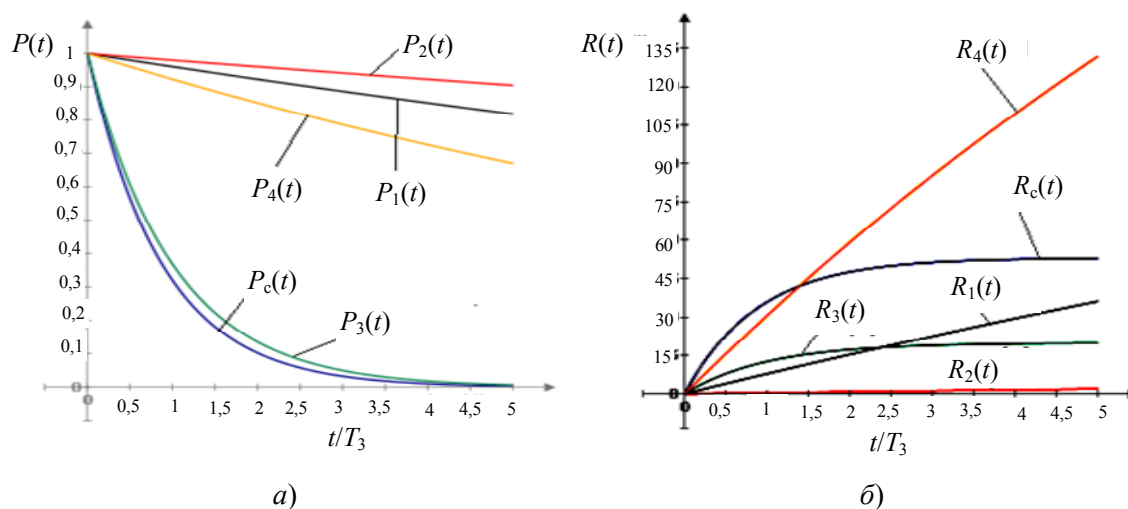


Рис. 3. Графики вероятности безотказности (а) и риска отказа (б)

Результаты исследований позволяют заключить, что при экспоненциальном законе распределения наибольшей надежностью обладают датчики накопителя. Как видно на рис. 3, надежность РТК – ниже надежности самого ненадежного элемента – инструмента сверлильного станка. Вероятность безотказности РТК при  $t = T_3$  составляет 0,32, а риск отказа –  $R_c = 36$  у. е.

Если время работы будет равно  $2T_3$ , то риск составит 42 у. е., а вероятность безотказности – 0,09.

На втором этапе оптимизации вероятность безотказности и риск РТК рассчитывались 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. 4.

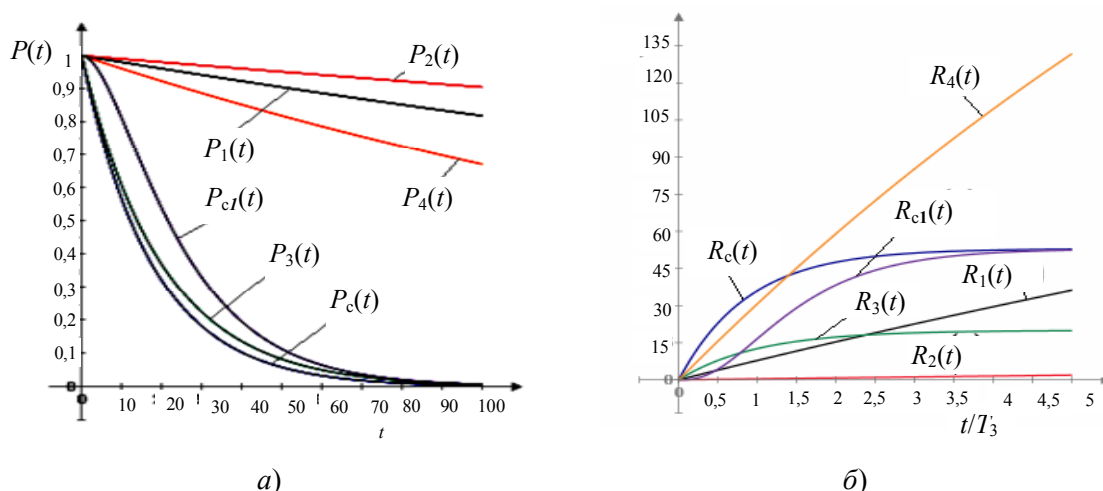


Рис. 4. Графики вероятности безотказности (а) и риска отказа (б)

Анализ результатов, приведенных на рис. 4, показал, что резервирование быстроизнашивающихся элементов приводит к росту вероятности безотказности РТК при  $t = T_3$  – до 0,42, а риск отказа составит  $R_c = 37$  у. е. Если время работы будет  $2T_3$ , то риск составит 47 у. е., а вероятность безотказности – 0,18.

На третьем этапе оптимизации вероятность безотказности и риск РТК анализировались при поэлементном постоянном резервировании низконадежных составляющих.

При этом вероятность безотказности подсистем и всей системы РТК может быть определена следующим образом:

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

где  $n$  и  $m$  – количество резервных элементов.

Вероятность отказа подсистемы и всей системы получена из выражения

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

В результате риск всей системы рассчитывался по уравнению

$$R_c = r_1 \int_0^t Q'_{nc1}(t) P_{nc2}(t) P_{nc3}(t) P_{nc4}(t) dt + r_2 \int_0^t Q'_{nc2}(t) P_{nc1}(t) P_{nc3}(t) P_{nc4}(t) dt +$$

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

Результаты расчетов данных, представленных на рис. 4, позволили заключить, что дальнейшее резервирование наиболее эффективно при одном резервном элементе 4 и остальных элементах 3.

Графики вероятности безотказности и риска отказа в относительных единицах времени приведены на рис. 5.

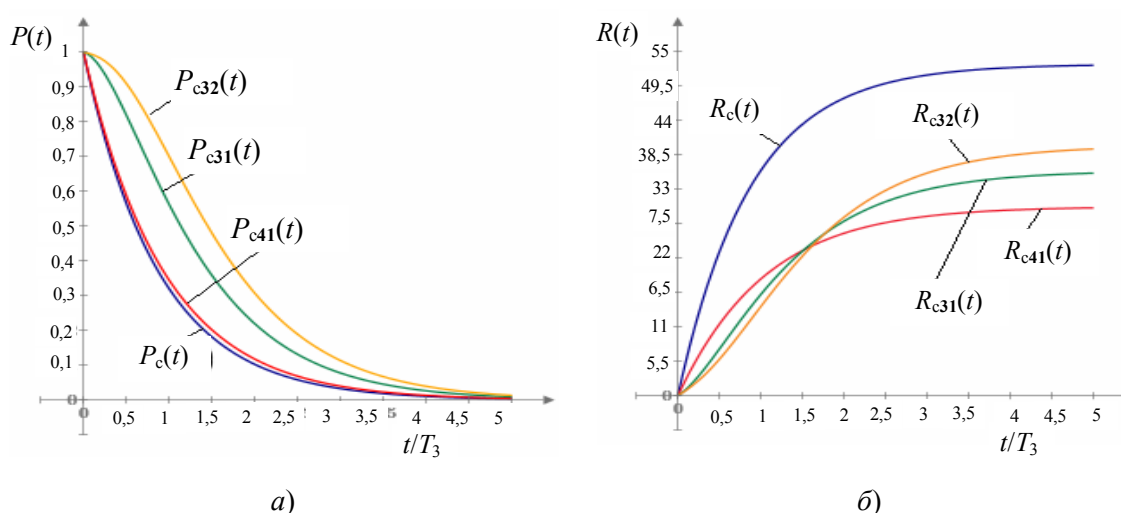


Рис. 5. Графики поэлементного резервирования:  
 а – вероятности безотказности; б – риска отказа

На рис. 5 кроме графика вероятности безотказности по исходной структурной схеме без резервирования  $P_c(t)$  также приведены графики:  $P_{c41}(t)$  – с одним резервным схватом робота;  $P_{c31}(t)$ ,  $R_{c31}(t)$  – с одним резервным схватом робота и одним резервным инструментом сверлильного станка;  $P_{c32}(t)$ ,  $R_{c32}(t)$  – с одним резервным схватом робота и двумя резервными инструментами сверлильного станка.

Проанализировав данные на рис. 5, можно сделать вывод, что принятый вид резервирования элементов обеспечит вероятность безотказности РТК при  $t = T_3 = 0,32$ , а риск отказа составит  $R_c = 35$  у. е. Если время работы увеличится в 2 раза ( $2T_3$ ), то риск составит 46 у. е., а вероятность безотказности – 0,1.

На четвертом этапе оптимизации исследовали функции вероятности безотказности и риска РТК при общим резервированием замещением.

При этом вероятность безотказности всей системы определялась по уравнению

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

где  $m$  – количество резервных подсистем;  $k$  – номер резервного элемента.

Тогда вероятность отказа всей системы рассчитывалась по выражению

$$Q_{ci} = 1 - P_{ci}.$$

Риск отказа подсистемы определялся по уравнению

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

Тогда выражение для риска отказа всей системы имеет вид:

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

Графики вероятности безотказности и риска отказа в относительных единицах времени приведены на рис. 6.

Результаты анализа данных, представленных на рис. 6, показывают, что приня-

тый вид резервирования элементов обеспечит вероятность безотказности РТК при  $t = T_3 - 0,32$ , а риск отказа составит  $R_c = 37$  у. е. Если время работы будет равно  $2T_3$ , то риск составит 47 у. е., а вероятность безотказности – 0,1.

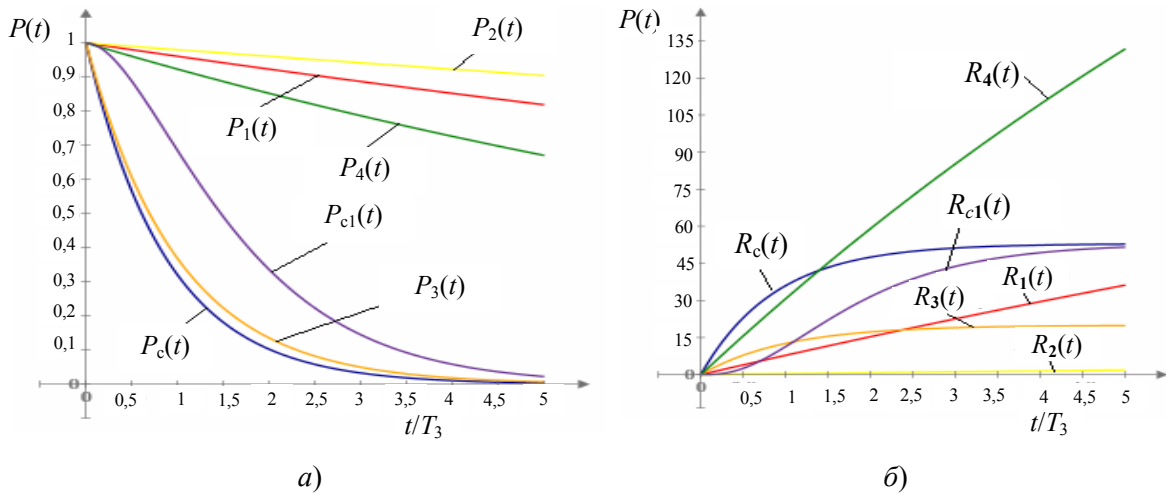


Рис. 6. Графики общего резервирования замещением:  
 а – вероятности безотказности; б – риска отказа

На пятом этапе оптимизации проанализирована система при поэлементном резервировании замещением.

Резервирование выполнялось для наименее надежных элементов в технологической системе.

Вероятность безотказности подсистемы и всей системы определялась по уравнению

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

где  $m$  – количество резервных элементов.

Тогда выражение для расчета вероятности отказа подсистемы и всей системы имеет вид:

$$Q_{nci} = 1 - P_{nci}; \quad Q_{ci} = 1 - P_{ci}.$$

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. 7.

Анализ результатов (рис. 9) указывает на то, что принятый вид резервирования элементов обеспечит вероятность безотказности РТК при  $t = T_3 - 0,32$ , а риск отказа составит  $R_c = 35$  у. е. Если время работы равно  $2T_3$ , то риск будет равен 46,5 у. е., а вероятность безотказности составит 0,1.

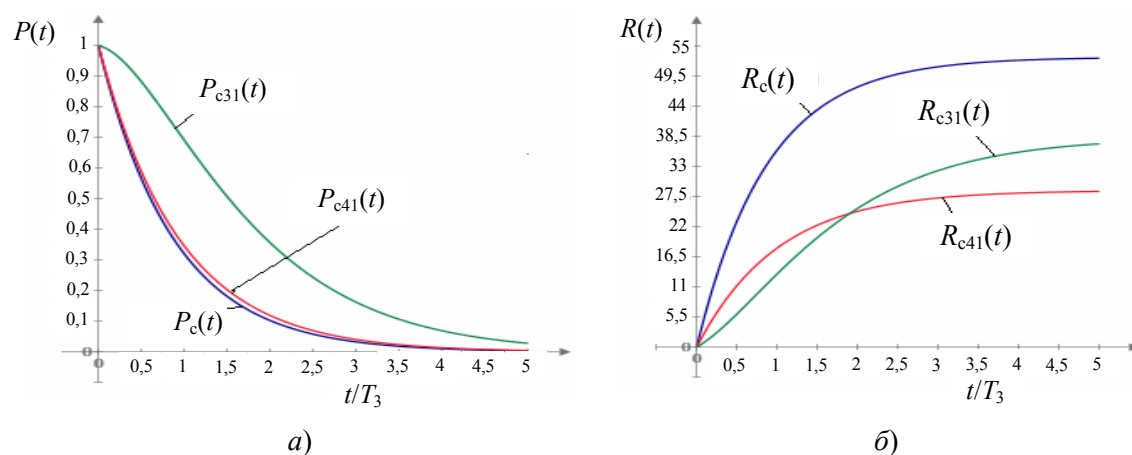


Рис. 7. Графики общего резервирования замещением:  
а – вероятности безотказности; б – риска отказа

### Заключение

На основании полученных результатов исследования можно сделать вывод, что наименьший риск отказа технологической системы возникает для системы с общим резервированием замещением, а наименьшее количество резервных элементов в системе – в случае поэлементного резервирования замещением, при этом необходим один резервный хват работа и два резервных инструмента сверлильного станка. В обоих случаях риск отказа не превышает допустимый. Однако во втором случае оптимизация технологической системы будет наиболее эффективна и экономически выгодна, так как резервируется наименьшее количество элементов.

### Литература

1. Теоретические основы проектирования технологических комплексов / А. М. Русецкий [и др.] ; под общ. ред. А. М. Русецкого. – Минск : Беларус. навука, 2012. – 239 с.
2. Автоматизация и управление в технологических комплексах / А. М. Русецкий [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 [и др.] ; под ред. Ю. М. Соломенцева. – М. : Высш. шк., 1999. – 312 с.
5. Технологические основы гибких производственных систем / В. А. Медведев [и др.]. – 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. / под ред. Б. В. Гнеденко. – М. : Машиностроение, 1987. – Т. 2: Математические методы в теории надежности и эффективности. – 280 с.
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 [и др.] ; под общ. ред. П. А. Витязя. – Минск : Беларус. наука, 2012. – 452 с.

### References

1. Ruseckij A. M., Vityaz' P. A., Hejfec M. L., Akulovich L. M., Borodavko V. I., Averchenkov V. I., Bez"yazychnyj V. F., Vasil'ev A. S., Gajko V. A., Danilov V. A., Zeveleva E. Z., Klimenko S. A., Popok N. N., Smolencev V. P., Sheleg V. K. *Teoreticheskie osnovy proektirovaniya tekhnologicheskikh kompleksov*. Ed. A. M. Ruseckogo. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2012. 239 p. (in Russian).
2. Ruseckij A. M., Vityaz' P. A., Hejfec M. L., Svirskij D. N., Akulovich L. M., Averchenkov A. V., Averchenkov V. I., Barashko O. G., Kashtal'yan I. A., Rodionova O. L., Pyn'kin A. M., Terekhov M. V., Sheleg V. K. *Avtomatizaciya i upravlenie v tekhnologicheskikh kompleksah*. Ed. A. M. Ruseckogo. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2014. 375 p. (in Russian).
3. Mihajlov M. I. *Nadezhnost' i diagnostika tekhnologicheskikh sistem*. Minsk, RIVSh Publ., 2022. 360 p. (in Russian).
4. Koval'chuk E. R., Kosov M. G., Mitrofanov V. G., Solomencev Yu. M., Sultan-Zade N. M., Skhirtladze A. G. *Osnovy avtomatizacii mashinostroitel'nogo proizvodstva*. Ed. Yu. M. Solomenceva. Moscow, Vysshaja shkola Publ., 1999. 312 p. (in Russian).
5. Medvedev V. A., Voronenko V. P., Bryuhanov V. N., Mitrofanov V. G., L. M. Chervyakov, Skhirtladze A. G. *Tekhnologicheskie osnovy gibkih proizvodstvennykh sistem*. Ed. Yu. M. Solomenceva. Moscow, Vysshaja shkola Publ., 2000. 255 p. (in Russian).
6. Kashtal'yan I. A. *Povyshenie effektivnosti ispol'zovaniya stankov s CHPU v usloviyah nestacionarnogo rezaniya*. Minsk, BNTU, 2008. 311 p. (in Russian).
7. Ivanov A. A. *Modernizaciya promyshlennykh predpriyatij na baze sovremennykh sistem avtomatizacii i upravleniya*. Moscow, FORUM, INFRA-M Publ., 2015. 384 p. (in Russian).
8. Kozyrev Yu. G. *Primenenie promyshlennykh robotov*. Moscow, KNORUS Publ., 2021. 488 p. (in Russian).
9. Bulgakov A. G. *Promyshlennye roboty: Kinematika, dinamika, kontrol' i upravlenie*. Moscow, SOLON-Press Publ., 2018. 484 p. (in Russian).
10. Bolotin V. V. *Prognozirovanie resursa mashin i konstrukcij*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984. 312 p. (in Russian).
11. Ed. B. V. Gnedenko. *Nadezhnost' i effektivnost' v tekhnike*. vol. 2. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987. 280 p. (in Russian).
12. Mihajlov, M. I. *Povyshenie nadezhnosti sbornogo rezhushchego instrumenta*. Gomel', Sukhoi State Technical University of Gomel, 2016. 272 p. (in Russian).
13. Vityaz' P. A., Zhornik V. I., Belocerkovskij M. A., Levancevich M. A. *Povyshenie resursa tribosopryazhenij aktivirovannymi metodami inzhenerii poverhnosti*. Ed. P. A. Vityazyu. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2012. 452 p. (in Russian).