

УДК 004.942

Научно-методический подход к оцениванию готовности сложных технических комплексов с учетом метрологического обеспечения

Гусеница Я.Н.*, Дорожко И.В., Кочанов И.А., Петухов А.Б.**

*Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского, Ждановская ул., 13,
Санкт-Петербург, 197198, Россия.*

**e-mail: yaromir226@mail.ru*

***e-mail: Doroghko-Igor@yandex.ru*

Аннотация

В статье представлены разработанные модели, позволяющие связать вероятность успешного выполнения мероприятий по метрологическому обеспечению и коэффициент готовности сложных технических комплексов. В работе приведен расчетный пример оценивания влияния метрологического обеспечения на поддержание готовности к применению сложных технических комплексов. Предложенный научно-методический подход представляет особую актуальность для таких сложных технических комплексов, как ракетно-космические, авиационные, морские, атомной энергетики, для которых важно обеспечение и поддержание высокой технической готовности.

Ключевые слова: контроль технического состояния, метрологическое обеспечение, коэффициент готовности.

1. Введение

В настоящее время одной из основных целей метрологического обеспечения сложных технических комплексов (СТК) является поддержание их готовности к применению [1, 5]. Достижение данной цели возможно только при условии успешного выполнения определенных мероприятий по метрологическому обеспечению на всех этапах жизненного цикла СТК, начиная от формирования исходных требований к образцу и заканчивая снятием его с эксплуатации и списанием (рис. 1) [5].

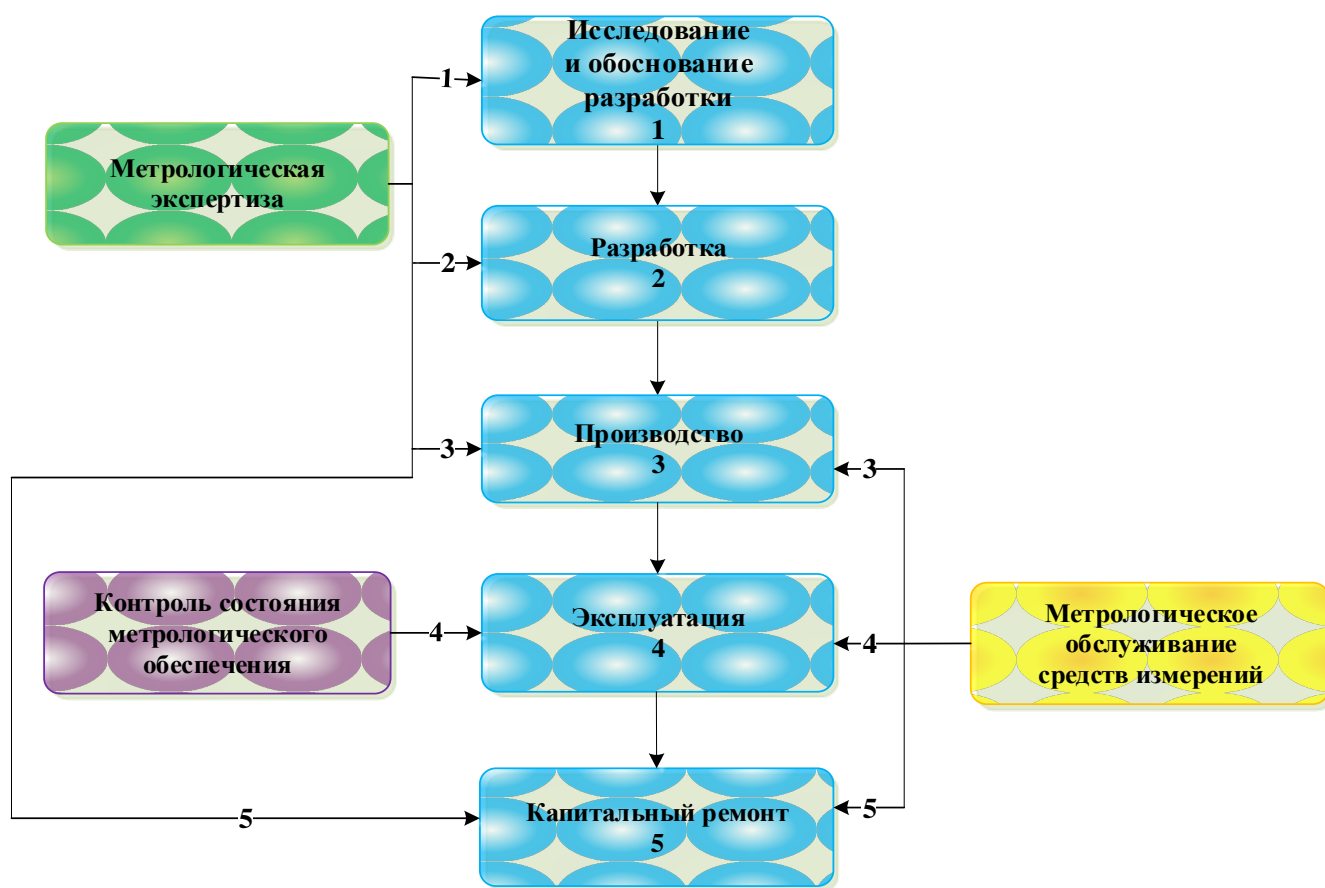


Рис. 1. Жизненный цикл СТК

Научные основы метрологического обеспечения СТК составляют историческая и теоретическая метрология (рис. 2) [5].

Развитие теоретической метрологии активно ведется в России и за рубежом, о чем свидетельствует значительное количество работ по данному направлению [3, 4, 6, 7, 9-20].



Рис. 2. Метрологическое обеспечение СТК

Вместе с тем, анализ отечественной и зарубежной литературы показывает, что вопрос формализации влияния метрологического обеспечения на поддержание готовности к применению СТК недостаточно освещен. Поэтому целью данной статьи является разработка модели для оценивания влияния метрологического обеспечения на поддержание готовности к применению СТК.

2. Математическая модель, связывающая коэффициент готовности и показатели достоверности контроля сложного технического комплекса

Предлагаемая модель является дальнейшим развитием комплексной модели, которая представлена в работе [2] и позволяющая связать коэффициент готовности и показатели достоверности контроля сложных комплексов.

Граф состояний существующей модели изображен на рис. 3.

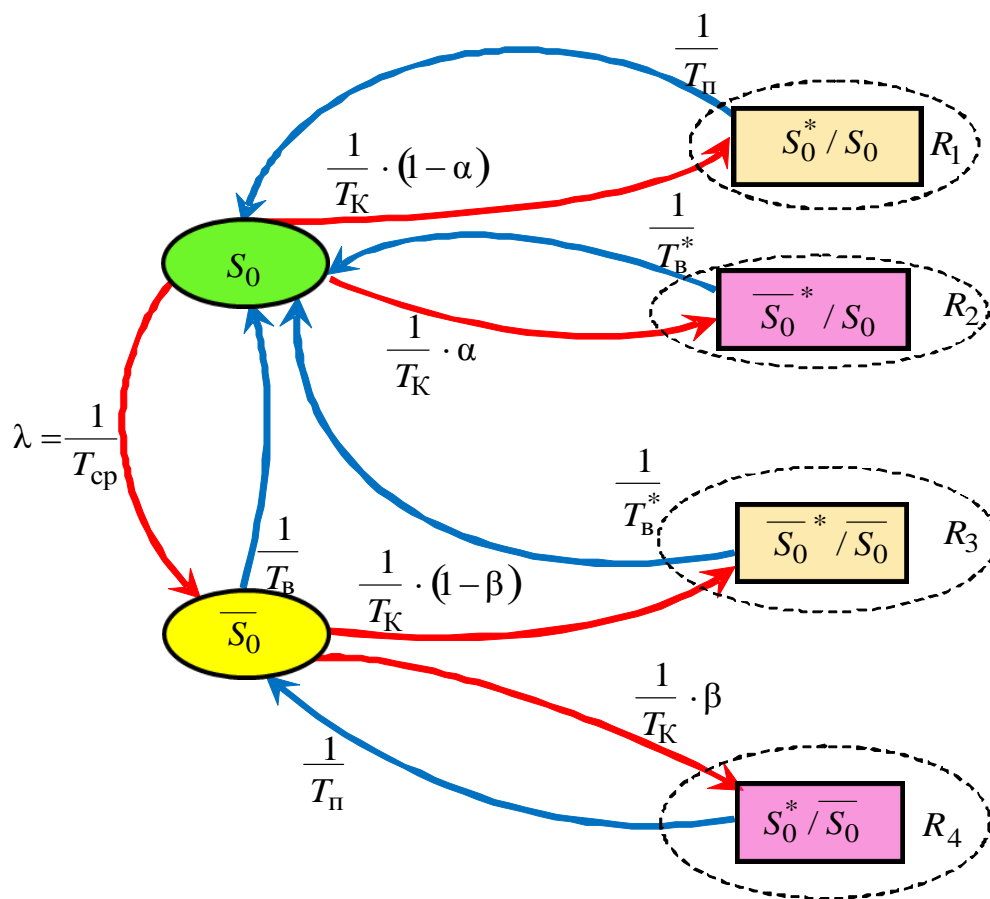


Рис. 3. Модель процесса диагностирования СТК

На рис. 3 введены следующие обозначения: S_0 , \bar{S}_0 – работоспособное и неработоспособное виды технического состояния; R_1 , R_3 – состояния, при которых проводится контроль с достоверным результатом (S_0^*/S_0 – система контроля фиксирует работоспособное состояние S_0^* , при этом объект действительно работоспособен S_0 , \bar{S}_0^*/\bar{S}_0 – система контроля обнаруживает неработоспособное состояние \bar{S}_0^* , при этом объект действительно неработоспособен \bar{S}_0); α и β – вероятности ошибок контроля (ошибок 1-го и 2-го рода соответственно); R_2 , R_4 – состояния, при которых проводится контроль с ошибочным результатом (\bar{S}_0^*/S_0 – система контроля сигнализирует о неработоспособном состоянии \bar{S}_0^* , а при этом

объект работоспособен S_0 , $S_0^*/\overline{S_0}$ – система контроля фиксирует работоспособное состояние S_0^* , а при этом объект неработоспособен $\overline{S_0}$); T_{CP} – средняя продолжительность безотказной работы; T_K – периодичность контроля; T_B^* – среднее время восстановления с учетом контроля; T_B – среднее время восстановления при отсутствии контроля (т. е. допускается, что объект может быть восстановлен даже при отсутствии или отказе средств контроля, например, с помощью последовательной замены блоков до тех пор, пока объект не станет работоспособным, правда, на это может потребоваться значительное время и ресурсы. Если без диагностирования объект не может быть восстановлен, то $T_B \rightarrow \infty$); T_{II} – средняя продолжительность перевода объекта из режима контроля в рабочий режим (если контроль происходит параллельно с работой объекта (функциональный контроль), то $T_{II}=0$, но если производится тестовый контроль, при котором объект последовательно переводится из режима контроля в рабочий режим и обратно, то необходимо учитывать T_{II}).

Для оценивания влияния метрологического обеспечения на поддержание готовности к применению сложных технических комплексов, необходимо умножить α и β на $(1 - P_{MIO})$. В результате можно описать процесс контроля сложного технического комплекса в виде марковского процесса в стационарном режиме системой алгебраических уравнений (1):

$$\left\{ \begin{array}{l} -\left(\frac{1}{T_K} + \frac{1}{T_{CP}}\right) \cdot P(S_0) + \frac{1}{T_B} \cdot P(\overline{S_0}) + \frac{1}{T_{II}} \cdot P(R_1) + \frac{1}{T_B^*} \cdot (P(R_2) + P(R_3)) = 0; \\ \frac{1}{T_{CP}} \cdot P(S_0) - \left(\frac{1}{T_K} + \frac{1}{T_B}\right) \cdot P(\overline{S_0}) + \frac{1}{T_{II}} \cdot P(R_4) = 0; \\ \frac{1 - \alpha \cdot (1 - P_{MLO})}{T_K} \cdot P(S_0) - \frac{1}{T_{II}} \cdot P(R_1) = 0; \\ \frac{\alpha \cdot (1 - P_{MLO})}{T_K} \cdot P(S_0) - \frac{1}{T_B^*} \cdot P(R_2) = 0; \\ \frac{1 - \beta \cdot (1 - P_{MLO})}{T_K} \cdot P(\overline{S_0}) - \frac{1}{T_B^*} \cdot P(R_3) = 0; \\ \frac{\beta \cdot (1 - P_{MLO})}{T_K} \cdot P(\overline{S_0}) - \frac{1}{T_{II}} \cdot P(R_4) = 0. \end{array} \right. \quad (1)$$

Для однозначного решения систем уравнений (1) заменим любое уравнение нормирующей суммой — $P(S_0) + P(\overline{S_0}) + P(R_1) + P(R_2) + P(R_3) + P(R_4) = 1$, что справедливо для полной группы событий, так как объект может находиться в шести состояниях: S_0 — объект работоспособен, диагностирование не производится, $\overline{S_0}$ — объект неработоспособен, диагностирование не производится, R_1 — объект работоспособен, диагностирование производится, технический диагноз «работоспособен», R_2 — объект неработоспособен, диагностирование производится, технический диагноз «работоспособен», R_3 — объект неработоспособен, диагностирование производится, технический диагноз «неработоспособен», R_4 — объект неработоспособен, диагностирование производится, технический диагноз «работоспособен».

Решая систему уравнений (1) в символьном виде относительно $P(S_0)$, получим аналитическое выражение для коэффициента готовности:

$$K_{\Gamma} = P(S_0) = \frac{T_{CP} \cdot T_K \cdot (T_B \cdot (1 - \beta \cdot (1 - P_{MLO})) + T_K)}{A}, \quad (2)$$

где $A = T_{CP} \cdot T_B \cdot (1 - \beta \cdot (1 - P_{MLO})) \cdot (T_B^* \cdot \alpha \cdot (1 - P_{MLO}) + T_{\Pi} \cdot (1 - \alpha \cdot (1 - P_{MLO}))) + T_{CP} \cdot T_K \times$
 $\times (T_{\Pi} \cdot (1 - \alpha \cdot (1 - P_{MLO})) + T_B \cdot (1 - \beta \cdot (1 - P_{MLO}))) + T_K \cdot (T_B \cdot T_B^* \cdot (1 - \beta \cdot (1 - P_{MLO})) +$
 $+ T_K \cdot (T_{CP} + T_B) + T_{CP} \cdot T_B^* \cdot \alpha \cdot (1 - P_{MLO}) + T_{\Pi} \cdot T_B \cdot \beta \cdot (1 - P_{MLO})).$

Если без контроля СТК не может быть восстановлен, то $T_B = \infty$. При этом система уравнений (1) будет иметь следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} -\left(\frac{1}{T_K} + \frac{1}{T_{CP}}\right) \cdot P(S_0) + \frac{1}{T_{\Pi}} \cdot P(R_1) + \frac{1}{T_B^*} \cdot (P(R_2) + P(R_3)) = 0; \\ \frac{1}{T_{CP}} \cdot P(S_0) - \frac{1}{T_K} \cdot P(\overline{S_0}) + \frac{1}{T_{\Pi}} \cdot P(R_4) = 0; \\ \frac{1 - \alpha \cdot (1 - P_{MLO})}{T_K} \cdot P(S_0) - \frac{1}{T_{\Pi}} \cdot P(R_1) = 0; \\ \frac{\alpha \cdot (1 - P_{MLO})}{T_K} \cdot P(S_0) - \frac{1}{T_B^*} \cdot P(R_2) = 0; \\ \frac{1 - \beta \cdot (1 - P_{MLO})}{T_K} \cdot P(\overline{S_0}) - \frac{1}{T_B^*} \cdot P(R_3) = 0; \\ \frac{\beta \cdot (1 - P_{MLO})}{T_K} \cdot P(\overline{S_0}) - \frac{1}{T_{\Pi}} \cdot P(R_4) = 0. \end{array} \right. \quad (3)$$

$$P(S_0) + P(\overline{S_0}) + P(R_1) + P(R_2) + P(R_3) + P(R_4) = 1.$$

Решая систему уравнений (3) в символьном виде относительно $P(S_0)$, получим аналитическое выражение для коэффициента готовности (4) объекта, который не может быть восстановлен без контроля:

$$K_{\Gamma} = P(S_0) = \frac{T_{CP} \cdot T_K \cdot (1 - \beta \cdot (1 - P_{MLO}))}{B}, \quad (4)$$

где $B = T_{CP} \cdot (1 - \beta \cdot (1 - P_{MлO})) \cdot (T_B^* \cdot \alpha \cdot (1 - P_{MлO}) + T_{II} \cdot (1 - \alpha \cdot (1 - P_{MлO}))) +$
 $+ T_K \cdot ((T_{CP} + T_B^*) \cdot (1 - \beta \cdot (1 - P_{MлO})) + T_{II} \cdot \beta \cdot (1 - P_{MлO}) + T_K).$

3. Сетевая математическая модель для получения вероятности успешного выполнения мероприятий по метрологическому обеспечению СТК

Для определения вероятности успешного выполнения мероприятий по метрологическому обеспечению СТК ($P_{MлO}$) разработана модель метрологического обеспечения СТК, которая базируется на подходе к количественному оцениванию работоспособности сложной системы, предложенном в работе [8].

Согласно данному подходу строится сетевая математическая модель для получения вероятности успешного выполнения мероприятий по метрологическому обеспечению СТК (рис. 4).

Узлы «0» и «4» являются стоком и истоком сетевой математической модели. Остальные узлы соответствуют мероприятиям по метрологическому обеспечению СТК, которые следуют одно за другим, вероятности успешного выполнения которых обозначены через $P_1 = P_{MЭ}$, $P_2 = P_{MO}$ и $P_3 = P_{КС}$. Узел «1» соответствует метрологической экспертизе, которая проводится на ранних стадиях жизненного цикла объекта с вероятностью m_{01} и во время капитального ремонта с вероятностью m_{21} . Узел «2» соответствует метрологическому обслуживанию средств измерений,

установленных на СТК в качестве составной части. Данное мероприятие проводится после производства образца с вероятностью m_{12} и в течение всей эксплуатации образца с вероятностями m_{22} и m_{32} . Узел «3» соответствует контролю состояния метрологического обеспечения, которое также проводится в течение всей эксплуатации образца, но с вероятностью m_{23} .

На вероятности переходов накладываются следующие ограничения: $m_{01} = 1$, $m_{12} = 1$, $m_{21} + m_{22} + m_{23} + m_{24} = 1$, $m_{32} = 1$.

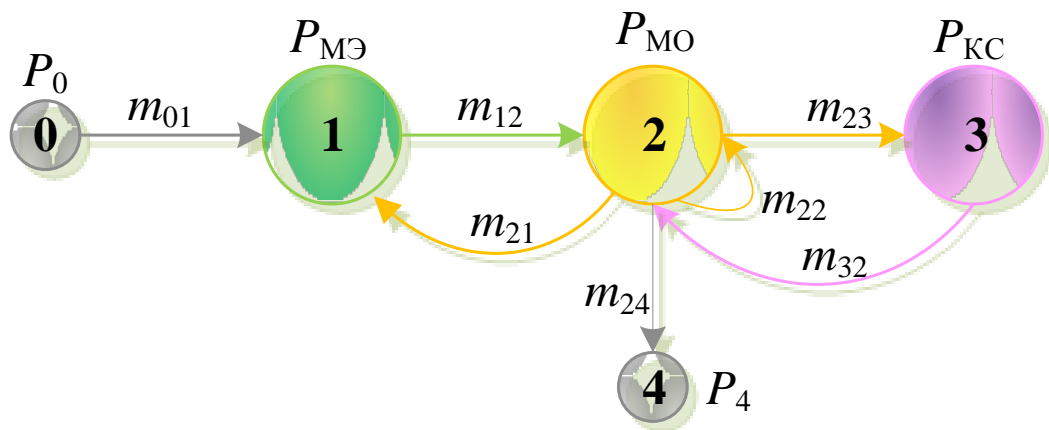


Рис. 4. Математическая модель для получения вероятности успешного выполнения мероприятий по метрологическому обеспечению СТК

Матрица переходов между узлами графа G имеет следующий вид:

$$\mathbf{G} = \begin{pmatrix} 0 & m_{01} \cdot P_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{12} \cdot P_{\text{МЭ}} & 0 & 0 \\ 0 & m_{21} \cdot P_{\text{МО}} & m_{22} \cdot P_{\text{МО}} & m_{23} \cdot P_{\text{МО}} & m_{24} \cdot P_{\text{МО}} \\ 0 & 0 & m_{32} \cdot P_{\text{КС}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Как и в работе [8], используется понятие шага, отражающего единичный переход между мероприятиями по метрологическому обеспечению СТК. Для того чтобы найти вероятность успешного выполнения мероприятий по метрологическому обеспечению СТК за два шага, необходимо просуммировать с соответствующими вероятностями произведения вероятностей по всем путям, содержащим два узла. Это достигается путем возведения матрицы \mathbf{G} в квадрат. Возводя матрицу \mathbf{G} в куб, можно получить вероятность успешного выполнения мероприятий по метрологическому обеспечению СТК за три шага и т.д.

Далее необходимо построить матрицу:

$$\mathbf{T} = \mathbf{I} + \mathbf{G}(t) + \mathbf{G}^2(t) + \dots = \mathbf{I} \cdot (\mathbf{I} - \mathbf{G}(t))^{-1},$$

где \mathbf{I} – единичная матрица.

Теперь необходимо построить матрицу $(\mathbf{I} - \mathbf{G})$:

$$(\mathbf{I} - \mathbf{G}) = \begin{pmatrix} 1 & -m_{01} \cdot P_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -m_{12} \cdot P_{MЭ} & 0 & 0 \\ 0 & -m_{21} \cdot P_{MO} & 1 - m_{22} \cdot P_{MO} & -m_{23} \cdot P_{MO} & -m_{24} \cdot P_{MO} \\ 0 & 0 & -m_{32} \cdot P_{KC} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Тогда в соответствии с работой [8] вероятность успешного выполнения всех мероприятий по метрологическому обеспечению СТК и будет равна:

$$P_{MлO} = \frac{Q}{R},$$

где Q – алгебраическое дополнение элемента с номером $(4, 0)$ матрицы $(\mathbf{I}-\mathbf{G})$;
 R – главный определитель этой матрицы.

Для получения конкретных результатов вероятность P_1 принимается равной единице, а значения вероятностей $P_{МЭ}$, $P_{МО}$, $P_{КС}$ могут быть получены, например, на основе использования модели, представленной в работе [6]. Однако при проведении различных исследований могут применяться и другие методы и модели расчета вероятностей успешного выполнения тех или иных мероприятий по метрологическому обеспечению.

4. Пример оценивания влияния метрологического обеспечения на поддержание готовности к применению СТК

Далее представлен расчетный пример оценивания влияния метрологического обеспечения на поддержание готовности к применению СТК.

Исходные данные.

1. Требования к СТК:

- средняя наработка на отказ не менее $T_{CP}=1\ 000$ ч;
- среднее время восстановления работоспособного состояния при использовании результатов контроля не более $T_B^*=0,1$ ч;
- среднее время восстановления работоспособного состояния без использования контроля не более $T_B=24$ ч;
- периодичность контроля $T_K=8$ ч;

- коэффициент готовности не менее $K_{\Gamma}=0,98$;
- время перевода из режима контроля в рабочий режим не более $T_{\Pi}=0,1$ ч;
- вероятности ошибок 1-го и 2-го рода контроля $\alpha=0,01$ и $\beta=0,02$.

2. Вероятности переходов мероприятий по метрологическому обеспечению СТК на стадиях жизненного цикла СТК: $m_{21}=0,1$; $m_{22}=0,4$; $m_{23}=0,3$; $m_{24}=0,2$.

3. Вероятность успешного выполнения мероприятий по метрологическому обслуживанию средств измерений СТК $P_{MO}=0,85$.

4. Вероятность успешного выполнения мероприятий по контролю состояния метрологического обеспечения СТК $P_{КС}=0,95$.

Необходимо оценить влияние метрологического обслуживания средств измерений на поддержание готовности к применению СТК.

С помощью представленных выше моделей проведено исследование зависимости коэффициента готовности от вероятности успешного выполнения метрологической экспертизы СТК. На рис. 5 изображен график коэффициента готовности от вероятности успешного выполнения метрологической экспертизы СТК. Анализ графика на рис. 5 показывает, что коэффициент готовности удовлетворяет требованиям лишь при высокой ($\geq 0,9$) вероятности успешного выполнения метрологической экспертизы СТК.

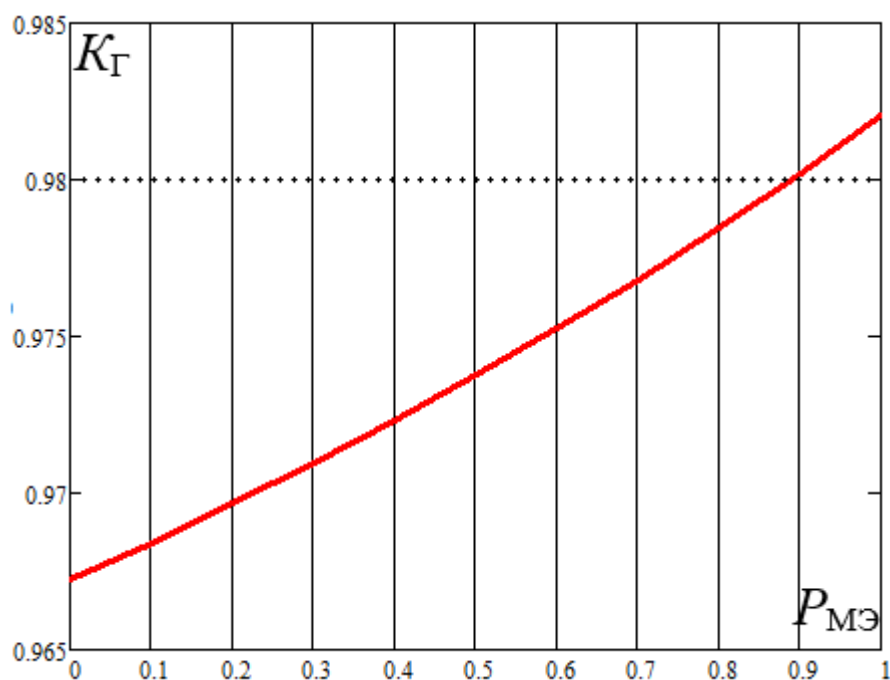


Рис. 5 . График зависимости коэффициента готовности СТК от вероятности успешного выполнения метрологической экспертизы

Аналогичным образом могут быть получены графики зависимостей коэффициента готовности от вероятности успешного выполнения остальных мероприятий по метрологическому обеспечению СТК.

5. Заключение

Таким образом, разработанные модели, в отличие от имеющихся, позволяют оценить влияние метрологического обеспечения на поддержание готовности к применению СТК. Предлагаемый научно-методический аппарат может быть использован при разработке СТК, обосновании характеристик технических средств

метрологического обеспечения, метрологического сопровождения жизненного цикла и метрологической экспертизы.

Библиографический список

1. Бородин В.В. Оценка надежности обслуживаемых устройств орбитальной космической станции // Труды МАИ. 2012. № 58. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=33036>
2. Бутырин А.В. Дорожко И.В., Кочанов И.А., Осипов Н.А. Комплексная модель надежности и диагностирования сложных технических систем // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2016. № 652. С. 137 - 146.
3. Гузенко В.Л. Миронов А.Н., Миронов Е.А., Шестопалова О.Л. Оценивание влияния точности определения значений границ контрольных допусков на качество функционирования оборудования непрерывного применения // Современные наукоемкие технологии. 2016. № 5 - 2. С. 232 - 238.
4. Гусеница Я.Н. Малахов А.В., Пестун У.А. Модель динамики парка военной измерительной техники // Известия Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ». 2017. № 9. С. 84 - 88.
5. Гусеница Я.Н. Новиков А.Н., Малахов А.В., С.А. Шерстобитов. Метрология, стандартизация и сертификация / Под ред. А.Н. Дорохова. – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2016. – 153 с.
6. Малахов А.В. Гусеница Я.Н. Имитационное моделирование реконфигурируемых метрологических комплексов // I Всероссийская научно-

практическая конференция «Актуальные вопросы развития вооружения, военной и специальной техники противовоздушной и противоракетной обороны, Космических войск Воздушно-космических сил». Сборник трудов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. С. 102 - 116.

7. Малахов А.В. Методика расчета производительности метрологических комплексов в условиях неопределенности информации о степени автоматизации рабочих мест // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2017. Т. 1. № 3 (31). С. 19 - 27.

8. Смагин В.А., Шерстобитов С.А. Оценивание длительности и количества информационной работы в цикле управляющей сети // Информация и космос. 2016. № 1. С. 75 - 79.

9. Шерстобитов С.А. Методика формирования требований к системе контроля функционирования автоматизированного рабочего места по поверке средств измерений // Информатика и системы управления. 2017. № 1 (51). С. 95 - 99.

10. Чернов И.В. Совершенствование методики определения азимутов с использованием лазерных гироскопов // Информация и космос. 2016. № 4. С. 121 - 126.

11. Kumar U.P., Somasundaram U., Kothiyal M.P., Mohan N.K. Microscopic TV Holography and Interferometry for Surface Profiling and Vibration Amplitude Measurement in Microsystems // Defence Science Journal, 2011, vol. 61, no. 5, pp. 491 - 498.

12. Sign R., Nagarajan R., Poonia K., Mohan H., Mangalhari J.P. High Temperature Calibration of Thermal Imagers for Infrared Measurements on Military Platforms // Defence Science Journal, 2017, vol. 67, no. 2, pp. 188 - 192.
13. Decker R., Duca M., Spickert-Fulton S. Measurement of bullet impact conditions using automated in-flight photography system // Defence Technology, 2017, vol. 13, pp. 288 - 294.
14. Chiribella G. Optimal networks for quantum metrology: semidefinite programs and product rules // New Journal of Physics, 2012, vol. 14, pp. 19. Doi: 10.1088/1367-2630/14/12/125008
15. DoD automatic test systems executive directorate. DoD automatic test systems master plan, 2012, pp 31, available at: <https://jteg.ncms.org/wp-content/gallery/AutomatedTestSystems/ATS%20JTEG%20Forum%2028%20Oct%202014%20%28Full%20Brief%29.pdf>
16. Errea S., Grigor J., King D.F., Matis G., McHugh S., McKechnie J., Nehring B. Advanced E-O Test Capability for U.S. Army Next Generation Automatic Test System // Proc. of SPIE, 2015, vol. 9452, pp. 1 - 10.
17. Knott P.A. A search algorithm for quantum state engineering and metrology // Journal of Physics, 2016, vol. 18, pp. 10.
18. Lazzarin A., Orsi E., Sanfilippo U. Statistical analysis on experimental calibration data for flowmeters in pressure pipes // Journal of Physics: Conference Series, 2017, vol. 882, pp. 10.
19. Milton A.F., Barone F.B., Kruer M.R. Influence of nonuniformity on infrared focal plane array performance // Optical Engineering, 1985, vol. 24(5), pp. 855 - 862.

20. O'Connell J. Metrology: The Creation of Universality by the Circulation of Particulars // *Social Studies of Science*, 1993, vol. 23, pp. 129 - 173.