

REFERENCES

1. Baranov, M. V., et al. *Jelektricheskie sledjashhie privody s momentnym upravleniem ispolnitelnymi dvigateljami*. M.: Izd-vo MGTU im. N. Je. Bauman, 2006.
2. Chen, Anyuan, Robert Nilssen, and Arne Nysveen. "Performance comparisons among radial flux, multi-stage axial flux and three-phase transverse flux PM machines for downhole applications." *Electric Machines and Drives Conference, 2009. IEMDC'09. IEEE International*. IEEE, 2009: 1010–1017. DOI: 10.1109/IEMDC.2009.5075328.
3. Kalmykov, A. N., A. A. Sen'kov, A. P. Sen'kov, and A. A. Rjabov. "Ventilnyj jeлектродвигатель s poperechnym magnitnym potokom i diskovym rotorom." *Russian Electrical Engineering* 4 (2016): 24–28.
4. Lebedev, N. I., and I. E. Ovchinnikov. *Beskontaktnye dvigateli postojannogo toka*. L.: Nauka, leningradskoe otdelenie, 1979.
5. Brodovskij, V. N., E. S. Ivanov, M. I. Luzin, V. P. Petuhov, and M. I. Pjatkov. *Sinhronnyj jeлектродвигатель*. Russian Federation, assignee. Patent 2047936. 10 Nov. 1995.
6. Shevchenko, A. F. *Sinhronnyj jeлектродвигатель*. Russian Federation, assignee. Patent 2059994. 10 May 1996.
7. Meier, F. *Permanent-magnet synchronous machines with non-overlapping concentrated windings for low-speed direct-drive applications*. Stockholm: KTH, 2008.
8. Bormotov, A. V., V. V. Nikolaev, Ju. San, and A. P. Sen'kov. "Obmotochnyj koeficient ventilnyh jeлектродвигателей s zubcovymi, sosredotochennymi obmotkami statora." *Trudy VIII mezhdunarodnoj (XIX Vserossijskoj) konferencii po avtomatizirovannomu jeлектроприводу AJeP-2014*. Saransk, 2014. Vol. 2. 72–75.
9. Sen'kov, A. P., A. V. Bormotov, and D. Ju. Sedunov. "Winding coefficient and rotor losses in servo motors with stator tooth concentrated windings." *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta* 22.3 (2015): 122–131.
10. Kopylov, I. P. *Proektirovanie jelektricheskikh mashin*. M.: «Vysshaja shkola», 2002.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сан Ю — аспирант.
Научный руководитель:
Сеньков Алексей Петрович.
ФГБОУ ВО «СПбГМТУ»
kws@smtu.ru
Сеньков Алексей Петрович —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «СПбГМТУ»
senkov@smtu.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Thsan Yu — postgraduate.
Supervisor:
Sen'kov Aleksey Petrovich.
St Petersburg State Marine Technical University
kws@smtu.ru
Sen'kov Aleksey Petrovich —
Dr. of Technical Sciences, professor.
St Petersburg State Marine Technical University
senkov@smtu.ru

Статья поступила в редакцию 20 апреля 2016 года

УДК 621.311.1

**А. Б. Каракаев,
А. В. Луканин**

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ МЕЖДУ ПОКАЗАТЕЛЯМИ НАДЕЖНОСТИ И ПОКАЗАТЕЛЕМ ГЛУБИНЫ КОНТРОЛЯ СУДОВОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

В статье рассмотрены основные показатели контролепригодности, относящиеся к надежности, контролю работоспособности и поиска дефектов в элементах судовой электроэнергетической системы (СЭЭС). Обоснованы и сформулированы основные задачи синтеза контролепригодности с учетом ограничений конструктивно-технологического характера и массогабаритных особенностей по минимуму точек контроля, а также рациональному размещению компонентов объекта в конструктивных блоках, среднее количество которых определяется точностью глубины контроля, позволяющей анализировать правильность функционирования, работоспособность, а следовательно, и место обнаружения объекта.

Сформулирована и решена задача анализа контролепригодности электрооборудования при размещении функциональных компонентов в конструктивных блоках при заданной совокупности точек контроля для выбора эффективных процедур оценки технического состояния и поиска обнаруженных дефектов. Приводятся способы диагностирования СЭЭС для предотвращения возможных сбоев в их работе, связанных с неисправностями электрооборудования. Изложены факторы, оказывающие влияние на быстроту восстановления работоспособности электрических сетей. Обоснована необходимость создания и развития теоретических положений контролепригодности СЭЭС как необходимой предпосылки для разработки общей теории их безопасности и диагностирования.

Ключевые слова: судовая электроэнергетическая система, электрооборудование, контролепригодность, коэффициент глубины контроля, коэффициент готовности.

Введение

Анализ содержания различных показателей контролепригодности (КП) элементов судовой электроэнергетической системы (СЭЭС), изложенный в работах [1], [2], позволяет выдвинуть в качестве основного показателя КП, в наибольшей степени взаимосвязанного с показателями надежности, показатель глубины контроля работоспособности и поиска обнаруженных дефектов. В качестве меры глубины контроля удобно рассматривать среднее число блоков, с точностью до которых ангилируется правильность функционирования, работоспособность, а, следовательно, и место обнаруживаемого дефекта. Если n — число блоков в объекте контроля; n_r — число r -различимых столбцов матрицы проверок B_z [3], то r и есть глубина контроля; r может изменяться от 1 до n : $1 \leq r \leq n$, определяя своим конкретным значением число возможных классов различимости дефектов: $k \leq n$. Поскольку общее число блоков, подвергающихся контролю, а, следовательно, и возможное число дефектов в объекте контроля равно $\sum_{r=1}^k r n_r$ (r — число блоков), коэффициент $K_{ГК} = \frac{1}{n} \sum_{r=1}^k r n_r$ является наиболее информативным показателем глубины контроля работоспособности и поиска дефектов.

Очевидно, если система точек контроля выбрана таким образом, что достигается однозначность вывода о работоспособности каждого блока и идентификации в нем дефекта, то $K_{ГК} = 1$. Если система контрольных точек сведена к контролю только одного входа и одного выхода (возможно заключение лишь о работоспособности или неработоспособности объекта контроля без какой-либо информации, обеспечивающей локализацию места возникновения дефекта в одном или нескольких блоках), то, очевидно, в этом случае $K_{ГК} = n$. Таким образом, $1 \leq K_{ГК} \leq n$.

Из работы [4] известно, что к числу показателей надежности восстанавливаемых объектов относятся единичные показатели таких ее свойств, как безотказность, ремонтпригодность, долговечность и сохраняемость, а также комплексный показатель — коэффициент готовности, характеризующий вероятность заставить объект в работоспособном состоянии в течение определенного периода эксплуатации. Общеизвестно, что этот комплексный показатель надежности — коэффициент готовности — представляет собой отношение среднего времени использования по прямому назначению $T_{и}$ к общему времени эксплуатации, включающему среднее время использования и среднее время восстановления работоспособности $T_{в}$, т. е. $K_{г} = \frac{T_{и}}{(T_{и} + T_{в})}$.

Как показывает анализ опыта эксплуатации сложных электросхем и электрооборудования СЭЭС, рассмотренный в работах [5] – [8], существенную долю временных затрат при восстановлении составляет не столько время проведения ремонтных операций, сколько (до 60 – 80 %) время проведения операции контроля работоспособности и поиска дефекта с глубиной до определенного числа блоков. Если представить $T_{в}$ в виде суммы среднего времени контроля работоспособности и поиска дефекта $T_{п}$ и среднего времени ремонта — $T_{р}$: $T_{в} = T_{п} + T_{р}$, то очевидно, что основная взаимосвязь уровня КП и надежности объекта контроля (особенно для сложных multifunctional-

ных электросхем автоматизированных электроприводов, систем ДАУ и т. д.) заключается в установлении зависимости между средним временем контроля и поиска дефекта $T_{\text{п}}$ и коэффициентом глубины $K_{\text{ГК}}$. Чем сложнее объект контроля по своей структуре, а также функциональным и конструктивно-технологическим связям, тем больших затрат требует обеспечение высокого уровня контролепригодности. В этой связи при принятии проектных схемно-конструкторских решений по объекту контроля, а, следовательно, и по уровню $K_{\text{р}}$, возникает задача их сравнения по уровню КП. Значит, всегда можно выбрать какое-то базовое значение $K_{\text{ГК}}^0$, при котором временные затраты на контроль составляют t_0 . При принятии новых конструктивно-схемных проектных решений коэффициент глубины контроля $K_{\text{ГК}}$ будет принимать значения, отличные от $K_{\text{ГК}}^0$.

Основная часть

Безусловно, разработка эффективной процедуры генерирования новых проектных решений и избежание при этом поиска рациональных по КП и надежности решений методом перебора в общетеоретическом плане представляет собой трудноразрешимую задачу. В этой связи можно воспользоваться подходом, изложенным в работах [5], [9], [10], где опытным путем доказывается эвристическое соотношение

$$\frac{T_{\text{п}}}{t_0} = \left(\frac{K_{\text{ГК}}^0}{K_{\text{ГК}}} \right)^{\alpha} \quad (1)$$

Здесь α — показатель конструктивно-схемной сложности объекта контроля.

Действительно, чем меньше $K_{\text{ГК}}$, чем больше различимость дефектов и тем меньше $T_{\text{п}}$. Приведенное соотношение удобно также тем, что с помощью формулы

$$\alpha = \frac{\ln \left(\frac{T_{\text{п}}}{T_0} \right)}{\ln \left(\frac{K_{\text{ГК}}^0}{K_{\text{ГК}}} \right)} \quad (2)$$

удается опытным путем или статистическим моделированием с достаточной доверительной вероятностью установить значение коэффициента сложности объекта контроля α . Для устранения методических трудностей при оценке $K_{\text{ГК}}^0$ и t_0 целесообразно их рассматривать при исходной системе точек контроля, включающих только входы и выходы объекта контроля с учетом его назначения и конструктивных особенностей.

Следует отметить, что не только временные затраты на контроль работоспособности и поиск дефекта с учетом достигнутой меры глубины контроля оказывают влияние на надежность объекта контроля, но и время ремонта при успешной идентификации обнаруженного дефекта, особенно для высокоавтоматизированных СЭЭС современных судов, когда в составе ремонтных операций преобладают операции замены кассет, элементов конструкции, а не операций восстановительного характера. Таким образом, можно выделить в общем времени ремонта временные затраты на замену блоков и кассет t_3 и среднее время проверки работоспособности после каждой замены τ до тех пор, пока не будет найдена неисправная среди общего числа «подозреваемых» элементов в соответствии с принятой глубиной контроля $K_{\text{ГК}}$. Если дефект различим до каждого блока, т. е. $K_{\text{ГК}} = 1$, то, очевидно, $T_{\text{р}} = t_3 + \tau$. Если дефект выявлен до l блоков, т. е. $K_{\text{ГК}} = l$, то τ увеличивается.

Опыт показывает, что рациональной стратегией поиска неисправного блока среди «подозреваемых» является последовательное половинное разбиение множества включенных в анализ работоспособности блоков в соответствии с достигнутой глубиной контроля. Тогда можно признать справедливым соотношение

$$T_{\text{р}} = \frac{1}{2}(t_3 + \tau)(K_{\text{ГК}} + 1). \quad (3)$$

Таким образом, в общем виде зависимость среднего времени восстановления $T_{\text{в}}$ от глубины контроля будет следующей:

$$T_b = t_0 \left(\frac{K_{ГК}^0}{K_{ГК}} \right)^\alpha + \frac{1}{2} (t_3 + \tau) (K_{ГК} + 1). \quad (4)$$

Если учесть, что $K_{ГК}$ характеризует число блоков, с точностью до которых идентифицируется дефект, то величина, обратная этому коэффициенту, будет отражать интенсивность восстановления, определяемую глубиной контроля. Обозначим $\frac{1}{K_{ГК}} = \xi_{ГК}$ и $\frac{1}{K_{ГК}^0} = \xi_{ГК}^0$. В этом случае зависимость времени восстановления T_b от показателей глубины контроля можно представить в следующем виде:

$$T_b = t_0 \gamma'_k + (t_3 + \tau) \gamma''_k, \quad (5)$$

где $\gamma'_k = \left(\frac{k_{ГК}}{k_{ГК}^0} \right)^\alpha$ и $\gamma''_k = \frac{1}{2} \frac{k_{ГК+1}}{k_{ГК}}$.

Эта зависимость наглядно характеризует влияние коэффициента глубины контроля на основную составляющую коэффициента готовности, поскольку γ'_k и T_b являются, по существу, корректирующими коэффициентами. Так как $\gamma'_k < 1$ и $\gamma''_k < 1$, время восстановления уменьшается с уменьшением коэффициента глубины контроля.

Результаты, полученные в научных трудах [11] – [14], позволяют сделать вывод о том, что установившиеся значение коэффициента готовности и коэффициента простоя можно выразить через интенсивность отказа λ , интенсивность поиска дефектов μ_n и интенсивность ремонта μ_p в предположении, что функция распределения времени безотказной работы и функция распределения времени поиска дефекта и ремонта подчинены экспоненциальному закону:

$$K_{Г} = \frac{\mu_n \mu_p}{\mu_n + \mu_p + \lambda (\mu_n + \mu_p)}; \quad K_n = 1 - \frac{\mu_n \mu_p}{\mu_n + \mu_p + \lambda (\mu_n + \mu_p)}. \quad (6)$$

В окончательном виде зависимость $K_{Г}$ и K_n от $K_{ГК}$ можно записать в следующем виде:

$$K_{Г} = \frac{2K_{ГК}^\alpha}{2K_{ГК}^\alpha + \lambda [K_{ГК}^\alpha (K_{ГК} + 1)(t_3 + \tau) + 2t_0 K_{ГК}^0 \alpha]}; \quad K_n = \frac{\lambda [K_{ГК}^\alpha (K_{ГК} + 1)(t_3 + \tau) + 2t_0 K_{ГК}^0 \alpha]}{2K_{ГК}^\alpha + \lambda [K_{ГК}^\alpha (K_{ГК} + 1)(t_3 + \tau) + 2t_0 K_{ГК}^0 \alpha]}. \quad (7)$$

Вычисление производной $\frac{\gamma K_{Г}}{\gamma K_{ГК}}$ и приравнивание ее нулю дает выражение для расчета оптимального значения $K_{ГК}^{опт}$ в виде

$$K_{ГК}^{опт} = \left[\frac{2\alpha t_0 (K_{ГК}^0)^\alpha}{t_3 + \tau} \right]^{\frac{1}{\alpha+1}}. \quad (8)$$

В общем случае «выигрыш» в надежности можно оценить по отношению

$$\delta = \frac{K_n}{K_n^0},$$

где K_n — коэффициент простоя с улучшенной контролепригодностью; K_n^0 — базовое значение коэффициента простоя.

Качественно зависимости T_b , T_n , T_p от $K_{ГК}$ показаны на рис. 1.

С учетом ранее приведенных формул оптимальное значение коэффициента готовности можно рассчитать по следующей зависимости:

$$K_{\Gamma. \text{опт}} = \frac{2\alpha}{2\alpha + \lambda(t_3 + \tau) \left[\alpha \left(\frac{2\alpha t_0 (K_{\Gamma\text{К}}^0)^\alpha}{t_3 + \tau} + 1 \right)^{\frac{1}{\alpha+1}} + \left(\frac{2\alpha t_0 (K_{\Gamma\text{К}}^0)^\alpha}{t_3 + \tau} \right)^{\frac{1}{\alpha+1}} \right]}.$$

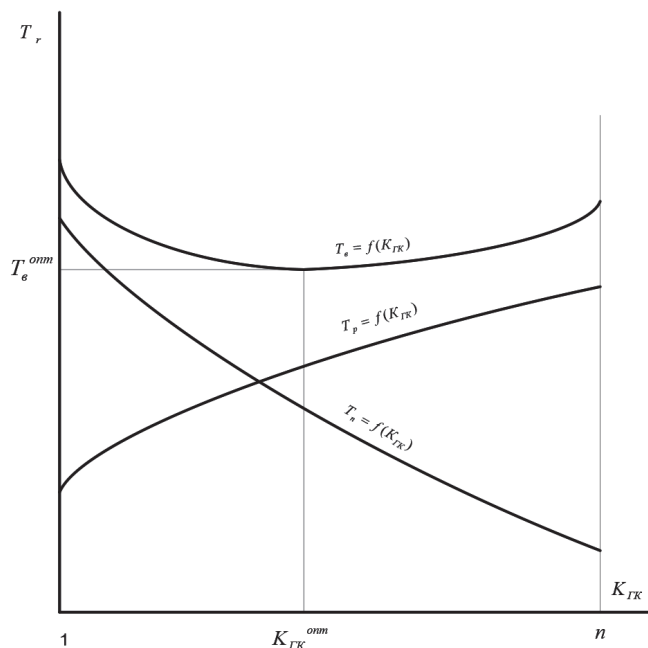


Рис. 1. Зависимости коэффициента глубины контроля $K_{\Gamma\text{К}}$ от времени ремонта $T_{\text{р}}$, времени поиска дефекта $T_{\text{п}}$ и времени восстановления $T_{\text{в}}$

На рис. 2 показаны зависимости $K_{\Gamma\text{К}}$ от объекта контроля α , анализ которых показывает, что существуют такие значения α , когда исходный коэффициент готовности становится равным оптимальному, т. е. $K_{\Gamma\text{К}}^0 = K_{\Gamma\text{К}}^{\text{опт}}$. Это означает, что повысить надежность объекта контроля за счет изменения глубины контроля не удастся при заданном значении α , которое можно считать критическим.

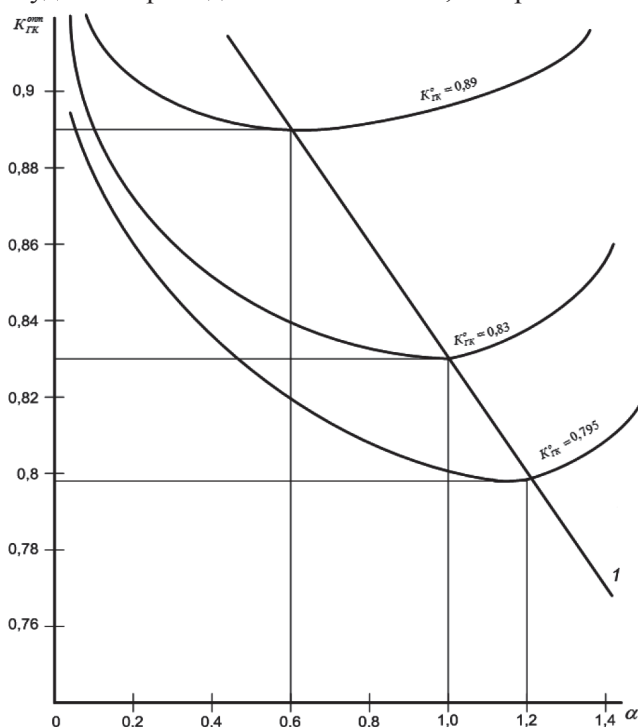


Рис. 2. Зависимости коэффициента глубины контроля $K_{\Gamma\text{К}}$ от показателя сложности объекта контроля α

Решение уравнения

$$K_{ГК} = \left[\frac{2\alpha_{кр} t_0 (K_{ГК}^0)^{\alpha_{кр}}}{t_3 + \tau} \right]^{\frac{1}{\alpha_{кр} + 1}} \quad (9)$$

позволяет оценить значение $\alpha_{кр}$ по следующей формуле: $\alpha_{кр} = K_{ГК}^0 (t_3 + \tau) / 2t_0$.

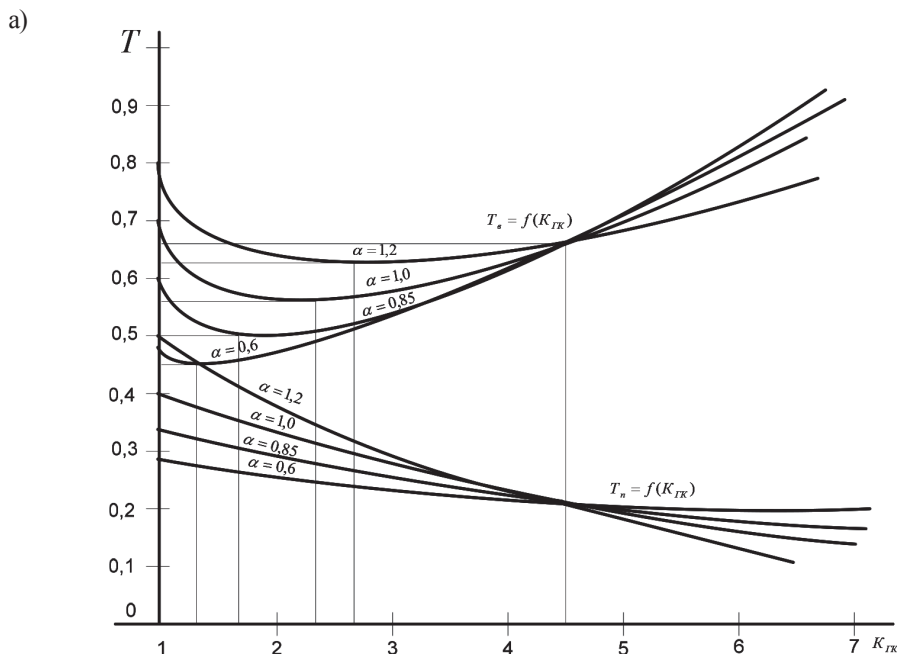
Если $\alpha \neq \alpha_{кр}$, то графики на рис. 2 определяют основные направления повышения коэффициента готовности за счет изменения коэффициента сложности α . Из графиков, приведенных на рис. 2 нетрудно заметить, что прямая 1 разделяет всю область решений на две части. Очевидно, в области, соответствующей $\alpha < \alpha_{кр}$, оптимальное значение коэффициента глубины контроля меньше исходного. Следовательно, коэффициент готовности можно повысить введением дополнительных точек контроля. Соотношению $\alpha > \alpha_{кр}$ будет соответствовать соотношение $K_{ГК}^{ОПТ} > K_{ГК}^0$. Значит, исходное множество точек контроля можно уменьшить без ущерба для эффективности оценки работоспособности и поиске дефекта.

На основании ранее изложенного можно выявить следующие параметры, определяющие взаимосвязь надежности и уровня контролепригодности электрооборудования:

- среднее время восстановления — T_v ;
- коэффициент готовности — K_r ;
- параметр сложности объекта контроля — α ;
- среднее время оценки работоспособности и поиска дефекта при исходной системе точек контроля (обычно точек контроля вход-выход) — t_0 ;
- коэффициент глубины контроля при исходной системе точек контроля — $K_{ГК}^0$;
- коэффициент простоя — K_n .

Взаимосвязь рассмотренных параметров на первом этапе анализа определяется формулами, которые позволяют построить необходимые зависимости при различных значениях параметров, обеспечивающих эффективный синтез заданного уровня КП.

Наиболее существенными для решения задач синтеза КП очевидно будут зависимости T_v от $K_{ГК}$ и K_n от $K_{ГК}$. Нетрудно установить, что при уменьшении параметра α (рис. 3, а) и связанного с этим уменьшении времени поиска дефекта T_n уменьшается и оптимальное значение глубины контроля. При этом предполагается, что параметр α не оказывает влияние на значения исходного времени восстановления и времени ремонта.



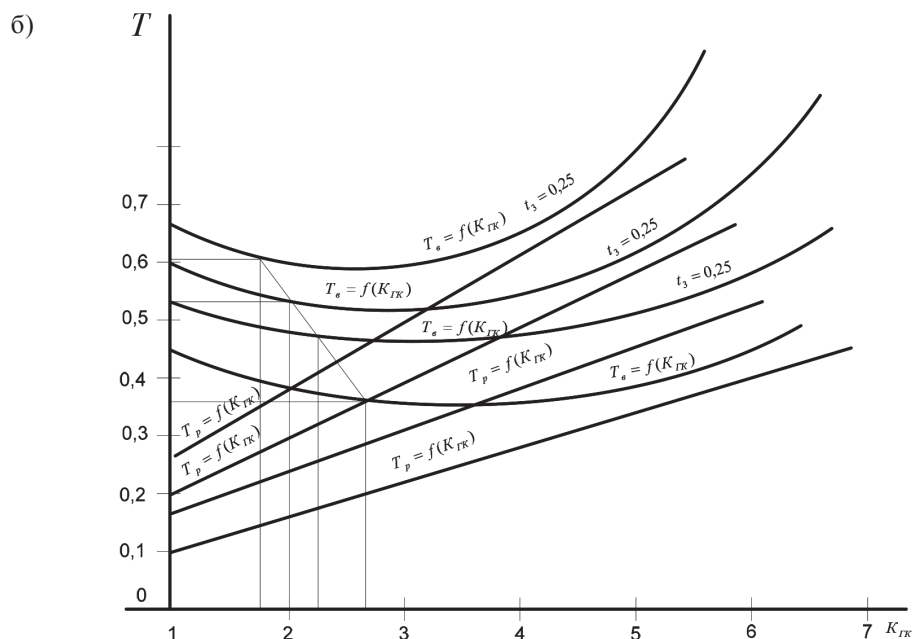


Рис. 3. Зависимости времени восстановления T и времени поиска дефектов T_n от коэффициента глубины контроля $K_{ГК}$ для различных значений параметра сложности объекта контроля α (а) и различных параметрах замены времени t_3 (б)

Если удастся сохранить время замены конструктивного блока, кассеты и элемента объекта контроля (рис. 3, б), то даже при постоянном времени поиска дефекта T_n это приведет к уменьшению времени ремонта T_p , а, следовательно, и к уменьшению оптимального времени восстановления. Тогда оптимальное значение глубины контроля будет увеличиваться. К таким же выводам можно прийти, если анализировать влияние уменьшения времени проверок τ в процессе замен блоков. Увеличить оптимальное значение глубины контроля удастся также за счёт уменьшения базового значения $K_{ГК}^0$. Очевидно, и оптимальное время восстановления в этом случае также уменьшится за счёт изменения времени поиска дефекта T_n .

Точно так же уменьшение исходного (базового) значения времени t_0 (рис. 4) позволяет увеличить оптимальное значение глубины контроля.

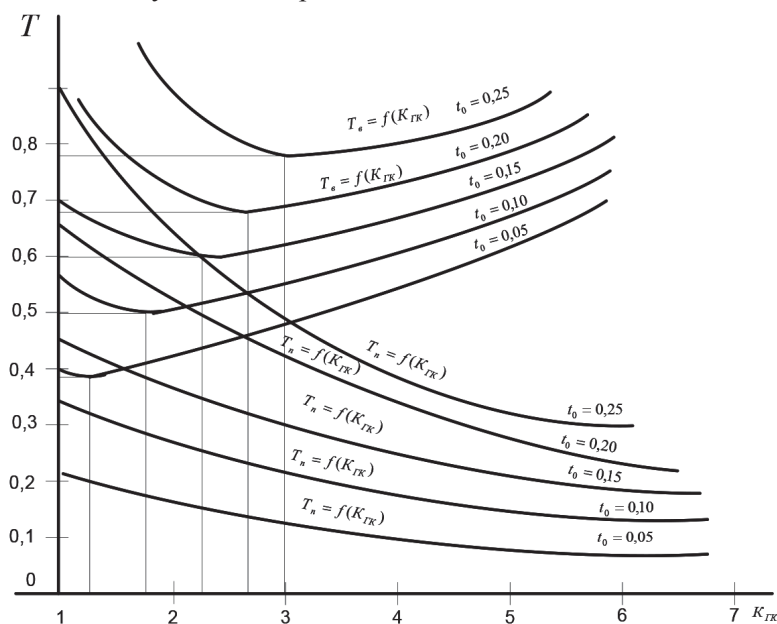


Рис. 4. Зависимости времени восстановления T и времени поиска дефектов T_n от коэффициента глубины контроля $K_{ГК}$ при различных исходных значениях базового времени t_0

Обсуждение основных результатов

Итак, для решения задач синтеза по надежности заданного уровня КП необходимо, в первую очередь, оптимизировать глубину контроля путем анализа соотношений между параметрами объекта.

Рассмотрение приведенных ранее формул (7) – (9) позволяет выделить следующие важнейшие соотношения, характеризующие исходную конструктивно-технологическую приспособленность объекта к операциям оценки работоспособности и восстановления методом замен:

$$\beta = \frac{2\alpha t_0}{t_3 + \tau}; \quad \delta = \frac{1}{(K_{ГК}^0)^\alpha}. \quad (10)$$

Если $\beta = K_{ГК}^0$, то это значит, что объект контроля спроектирован так, что повысить его надежность (коэффициент готовности) за счёт изменения глубины контроля не удастся. Если $\delta < \beta < K_{ГК}^0$, то повысить $K_{ГК}$ можно лишь за счёт уменьшения исходной глубины контроля $K_{ГК}^0$ до значения $K_{ГК}^{опт}$ организацией дополнительных точек контроля (рис. 5).

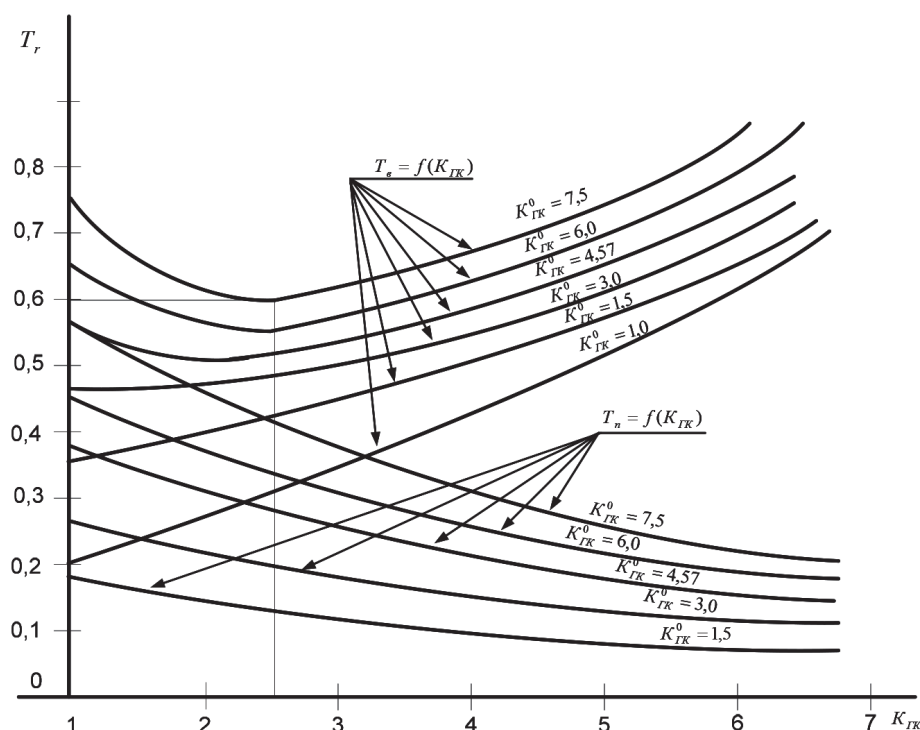


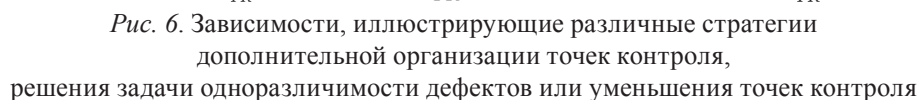
Рис. 5. Зависимости времени восстановления T_v от коэффициента глубины контроля $K_{ГК}$ при различных значениях исходной системы точек контроля $K_{ГК}^0$

Совершенно очевидно, если уровень КП обеспечивает одноразличимость дефектов в объекте контроля (рис. 6), т. е. $K_{ГК}^{опт} = 1$, то $K_{ГК}$ будет иметь максимальное значение, что соответствует соотношению $\beta \leq \delta$.

При избыточном числе точек контроля значение оптимальной глубины контроля находится в пределах $K_{ГК}^0 < K_{ГК}^{опт} < n$, где n — число блоков в объекте контроля. Нетрудно показать, что стратегия, связанная с уменьшением избыточного числа точек контроля, определяется соотношением

$$K_{ГК}^0 < \beta < \frac{n^{\alpha+1}}{(K_{ГК}^0)^\alpha}. \quad (11)$$

Таким образом, анализ соотношений параметров КП объекта контроля и его надежности (коэффициентов готовности и простоя) позволяет выбрать стратегии дополнительной организации точек контроля, решения задачи одноразличимости дефектов или уменьшения числа точек контроля.



188

Пусть параметры схемы автоматического распределения активных нагрузок имеют следующие значения: $t_0 = 0,2$ ч; $t_3 = 0,25$ ч; $\tau = 0,1$ ч; $\alpha = 0,85$; $\lambda = 2 \cdot 10^{-3}$ 1/ч. При этих параметрах для вычисления среднего времени восстановления по формуле $T_{\text{в}} = t_0 + \frac{K_{\text{ГК}}^0 + 1}{2}(t_3 + \tau)$ необходимо вычислить $K_{\text{ГК}}^0$. Полагая, что исходная система контрольных точек выбрана по сигналам вход-выход вершин 1, 2, 13, 14, матрицу проверок можно представить в виде:

$$\tilde{B}^* =$$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$b(1, 13)$	1		1		1	1	1	1		1	1	1	1	
$b(2, 13)$		1		1		1	1	1		1	1	1	1	
$b(1, 14)$	1		1		1	1	1	1		1	1	1		1
$b(2, 14)$		1		1		1	1	1		1	1	1		1

Нетрудно по B_z установить, что $D_1 = \{1, 3, 5\}$, $D_2 = \{2, 4\}$, $D_3 = \{6, 7, 8, 9, 11, 12\}$ образуют классы эквивалентности дефектов.

Таким образом, исходная глубина диагностирования равна

$$K_{ГК}^0 = \frac{1}{n} \sum_{r=1}^K m_r = 1 \cdot \frac{2}{14} + 2 \cdot \frac{2}{14} + 3 \cdot \frac{3}{14} + 7 \cdot \frac{7}{14} = 4,57.$$

Значения оптимального коэффициента глубины контроля

$$K_{ГК}^{опт} = \left(\frac{2 \cdot 0,85 \cdot 0,2 \cdot 4,57^{0,85}}{0,25 + 0,1} \right)^{\frac{1}{1,85}} = 1,04 \cdot 10^{-3}.$$

Если реализовать дополнительные контрольные точки на выходах блоков 10 и 12, то расчеты показывают, что при этом достигается глубина контроля.

Заключение

Основой математической модели контролепригодности СЭЭС как объекта контроля является логическая модель функционирования, включающая блоки, определяющие уровень структурной декомпозиции, и вход-выходные связи, характеризующиеся одним или несколькими параметрами функционирования блоков.

Наиболее рациональной моделью для анализа контролепригодности СЭЭС и её элементов является упорядоченный ориентированный граф $G(V, U)$, множеству вершин которого V соответствуют блоки логической модели, а дуги U отражают функциональные взаимосвязи между блоками объекта контроля. Граф $G(V, U)$ позволяет строить матрицы достижимости и проверок, используемые в дальнейшем для анализа и синтеза необходимого уровня контролепригодности объекта контроля.

Введение понятия *кратность дефекта* позволяет формировать процедуры и алгоритмы оценки уровня контролепригодности с помощью коэффициента глубины контроля. На основе анализа матрицы проверок B_z разработана эффективная процедура поиска одиночных дефектов, а также определены основные принципы и этапы построения алгоритма поиска дефектов произвольной кратности. Работоспособность алгоритмов проиллюстрирована конкретными расчётами по оценке уровня контролепригодности релейно-контакторных электросхем и электрических сетей СЭЭС.

Анализ конструктивных особенностей судового электрооборудования и процессов его функционирования позволяет сделать вывод о том, что для оценки и анализа КП целесообразно комплексное использование методов выбора рациональной системы контрольных точек и управляемых разрывов электрических коммуникаций с целью обеспечения высокого уровня различимости дефектов произвольной кратности.

Обоснованы и сформулированы основные задачи синтеза КП с учетом ограничений конструктивно-технологического характера и массогабаритных особенностей по минимуму точек контроля, рациональному размещению компонентов объекта в конструктивных блоках, с точностью до которых осуществляется контроль технического состояния, а также с учетом стоимости ввода дополнительных точек съема контрольно-диагностической информации.

Разработана методическая база синтеза конструктивных единиц-блоков объекта контроля при минимальном множестве точек контроля на основе граф-модели объекта контроля, формирования и анализа матриц проверок с помощью специальных процедур выбора и компоновки точек контроля. Сформулирована и решена задача анализа контролепригодности электрооборудования при размещении функциональных компонентов в конструктивных блоках на заданной совокупности точек контроля для выбора эффективных процедур оценки технического состояния и поиска обнаруженных дефектов.

Уделено существенное внимание методическим аспектам вероятностного анализа контролепригодности СЭЭС в интересах оценки эффективности ее функционирования в двух аспектах: вещественно-энергетическом и структурно-функциональном для прогноза структурных и режимных нарушений. При сформулированном методическом подходе предложено выделить две составляющие КП СЭЭС в целом: структурно-функциональную КП и режимную КП. Несмотря на определенную условность такой декомпозиции КП СЭЭС, это позволяет определить в качестве перспективных вероятностный анализ данных составляющих КП СЭЭС, обоснование эффективных приемов декомпозиции сложных структур, способов выделения в сложной многоэлементной схеме одно- и двухэлементных сечений. В конечном итоге, это обеспечивает расчет вероятности отказа системы относительно нагрузки системы и определения коэффициента относительной потери мощности как показателя режимно-функциональной КП СЭЭС.

В основе анализа вероятностных моделей СЭЭС и ее активных параметров для анализа режимно-функциональной КП СЭЭС целесообразно использовать интегральные вероятностные характеристики режимов и по ним определять параметры законов распределения, вид которых устанавливается по результатам анализа физического существа исследуемых процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данцевич И. М. Обеспечение контролепригодности электрических сетей, схем и электрооборудования судовых электроэнергетических систем на основе управляемых разрывов функциональных сигналов / И. М. Данцевич, А. Б. Каракаев, А. В. Луканин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 3 (25). — С. 45–54.
2. Каракаев А. Б. Методические вопросы синтеза контролепригодности размещения компонентов объекта в конструктивных единицах ограниченного объема по минимуму точек контроля / А. Б. Каракаев, А. В. Луканин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 6 (28). — С. 44–48.
3. Каракаев А. Б. Теоретические основы анализа контролепригодности судовой электроэнергетической системы и ее элементов / А. Б. Каракаев, А. В. Луканин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 3 (22). — С. 54–58.
4. Литвинов В. В. Методы построения имитационных систем / В. В. Литвинов, Т. П. Марьянович. — Киев: Наукова думка, 1991. — 120 с.
5. Михалевич В. С. Вычислительные методы исследования и проектирования сложных систем / В. С. Михалевич, В. Л. Волкович. — М.: Наука, 1982. — 286 с.
6. Дудник Б. Я. Надежность и живучесть систем связи / Б. Я. Дудник, В. Ф. Овчаренко, В. К. Орлов [и др.]. — М.: Радио и связь, 1984. — 216 с.
7. Гнедусо Б. В. Надежность и эффективность в технике: справочник / Б. В. Гнедусо. — М.: Машиностроение, 1987. — 280 с.
8. Герман Г. В. Надежность судовых электроэнергетических систем и систем судовой автоматики / Г. В. Герман, Ю. Н. Киреев, Е. А. Мельницкая. — СПб.: СПбГМТУ, 2004. — 92 с.
9. Проников А. С. Надежность машин / А. С. Проников. — М.: Машиностроение, 1978. — 592 с.
10. Дедков В. К. Основные вопросы эксплуатации сложных систем / В. К. Дедков, Б. С. Северцев. — М.: Высш. шк., 1976. — 406 с.
11. Цикарев В. Е. Модели надежности и эффективности систем / В. Е. Цикарев. — Киев: Наукова думка, 1989. — 124 с.

12. Зеленцов В. А. Надежность, живучесть и техническое обслуживание сетей связи / В. А. Зеленцов, А. А. Гагин. — М.: Изд-во МО СССР, 1991. — 170 с.

13. Власов А. Б. Оценка показателей надежности корабельного электрооборудования, их влияние на безопасность мореплавания и вероятность страховых рисков / А. Б. Власов, С. А. Буев // Вестник Мурманского государственного технического университета. — 2013. — Т. 16. — № 4. — С. 672–680.

14. Головкин С. В. Алгоритмическое обеспечение судовых систем управления с упреждающей диагностикой отказов / С. В. Головкин // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2011. — № 1. — С. 28–31.

INVESTIGATION MAIN DEPENDENCES BETWEEN INDICATORS OF RELIABILITY AND INDICATOR OF SHIP ELECTROEQUIPMENT CONTROL DEPTH

There are considered basic controllability indicators, related to a reliability, operability control and defects searching in the ship power system (SPS) in the article. There are justified and formulated basic controllability synthesis goals, taking in account constructional limitation and mass-and-overall features, with minimum control points, object components rational placement in constructional blocks (the technical control is being realized with accuracy to the them), the average number of which is determined by the precision depth control that allows you to analyze the correct functioning, performance, and hence position detection of the object. There is formulated and solved a task of elector equipment controllability analysis at functional components placement in constructional blocks at defined control points set for a chosen of technical condition assessment effective procedures and a discovered defects search. In the article there are given ways of ship electrical power systems diagnosis (troubleshooting) to prevent possible operation failures in the systems, related to electrical equipment malfunction. There are given ways of ship electrical power systems diagnosis (troubleshooting) to prevent possible operation failures in the systems, related to electrical equipment malfunction. There are given factors which affects restoration speed of electrical grids functionality. There is proved a need of creation and development of theoretical regulations of electrical power system controllability as a required precondition for common theory of modern ship electrical power system safety.

Keywords: Ship electrical power system, electrical equipment, controllability, control depth factor, readiness factor.

REFERENCES

1. Dancevich, I. M., A. B. Karakaev, and A. V. Lukanin. “Controllability ensuring of electrical grids, schemes and equipment of ship electrical power systems on basis of under-control breakings of functional signals.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 3(25) (2014): 45–54.

2. Karakaev, A. B., and A. V. Lukanin. “Methodical questions of controllability synthesis in terms of object components placement in limited volume constructive units by control points minimum.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 6(28) (2014): 44–48.

3. Karakaev, A. B., and A. V. Lukanin. “Theoretical basis of analysis of ship electrical power system controllability and its elements.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 3(22) (2013): 54–58.

4. Litvinov, V. V., and T. P. Marjanovich. *Metody postroyeniya imitacionnykh sistem*. Kiev.: Naukova dumka, 1991.

5. Mihalevich, V. S., and V. L. Volkovich. *Vychislitelnye metody issledovaniya i proektirovaniya slozhnykh sistem*. M.: Nauka, 1982.

6. Dudnik, B. Ja., V. F. Ovcharenko, V. K. Orlov, et al. *Nadezhnost i zhivuchest sistem svyazi*. M.: Radio i svyaz, 1984.

7. Gnedjuso, B. V. *Nadezhnost i jeffektivnost v tehnike: Spravochnik*. M.: Mashinostroenie, 1987.

8. German, G. V., Ju. N. Kireev, and E. A. Melnickaja. *Nadezhnost sudovykh jelektrojenergeticheskikh sistem i sistem sudovoj avtomatiki*. SPb.: SPbGMTU, 2004.

9. Pronikov, A. S. *Nadezhnost mashin*. M.: Mashinostroenie, 1978.
10. Dedkov, V. K., and B. S. Severcev. *Osnovnye voprosy jekspluatacii slozhnyh sistem*. M.: Vysshaja shkol, 1976.
11. Cikarev, V. E. *Modeli nadezhnostii jeffektivnosti sistem*. Kiev.: Naukova dumka, 1989.
12. Zelencov, V. A., and A. A. Gagin. *Nadezhnost, zhivuchest i tehicheskoe obsluzhivanie setej svyazi*. M.: izd-vo MO SSSR, 1991.
13. Vlasov, A. B., and S. A. Buev. "Estimation of indicators of ship electrical equipment reliability, influence on the marine safety and probability of insurance risks." *VESTNIK OF MSTU* 16.4 (2013): 672–680.
14. Golovko, Sergey Vladimirovich. "Algorithmic support of ship control systems with anticipatory failure diagnosis." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 1 (2011): 28–31.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Каракоев Александр Бахтыреевич —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
aleksandr.karakaev@list.ru, kaf_ose@gumrf.ru
Луканин Андрей Владимирович —
кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
andrey.lukanin@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Karakaev Aleksandr Bahtireevich —
Dr. of Technical Sciences, professor.
Admaral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
aleksandr.karakaev@list.ru, a.karakaev@gumrf.ru
Lukanin Andrey Vladimirovich —
PhD, associate professor.
Admaral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
andrey.lukanin@mail.ru

Статья поступила в редакцию 25 апреля 2016 г.

УДК621.314.69

**И. А. Сакович,
А. И. Черевко,
Е. В. Лимонникова**

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРАВЛЯЕМЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ, ПОСТРОЕННЫХ НА БАЗЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ С ВРАЩАЮЩИМСЯ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Описан новый метод параметрического математического моделирования управляемых выпрямителей, построенных на базе трансформатора с вращающимися магнитными полями с любым числом секций вторичной круговой обмотки. Для расчета взаимоиндуктивных связей внутри полуобмоток круговой обмотки и между ними предлагается использование диагонально-постоянной матрицы Тейлица. Приводятся выражения, позволяющие упростить описание электромагнитных процессов и составляющие суть нового метода математического описания данных выпрямителей. Представлены результаты математического моделирования работы управляемого выпрямителя в MATLAB для известных классических и новых импульсно-фазовых способов управления: для способа управления, дающего удвоенное число пульсаций, для случая, когда круговая обмотка содержит четное число секций, и для ступенчато-хордового способа управления. Сделаны выводы о перспективности применения данного способа математического моделирования при исследовании других типов преобразователей энергии, построенных на базе трансформаторов с вращающимися магнитными полями, а также различных способов управления преобразователями с использованием широких возможностей MATLAB.

Ключевые слова: трансформатор с вращающимся магнитным полем, математическое моделирование, способ управления, выпрямитель, полупроводниковый преобразователь, круговая обмотка.