

УДК 621.039.5:629.5.03

EDN: NGGXUR

А.А. Саматов, Б.Р. Малкаров

Военный институт (военно-морской политехнический) ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия»,
Санкт-Петербург, Россия

ШКАЛА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СУДОВЫХ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НА ОСНОВЕ РЕЖИМНО-ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ИЗБЫТОЧНОСТИ

Объект и цель научной работы. Объект исследования – судовые ядерные энергетические установки (ЯЭУ) как сложные технические системы (СТС), функционирующие в динамически изменяющихся условиях. Цели – разработка и научное обоснование метода количественной оценки эффективности судовых ЯЭУ на основе концепции режимно-потенциальной избыточности (РПИ) с созданием унифицированной шкалы интерпретации функционального состояния.

Материалы и методы. Теоретическую базу составили положения системного анализа, теории надежности и концепция РПИ профессора Г.А. Ершова. Использованы методы математического моделирования, теории вероятностей, аппроксимации функций, метод анализа иерархий. Исходные данные для апробации взяты из эксплуатационной документации системы охлаждения четвертого контура судовой ЯЭУ.

Основные результаты. Установлена аналитическая связь между коэффициентами РПИ и вероятностными характеристиками надежности, получено выражение для интегрального показателя эффективности $P_{СТС} = 1 - e^{(-K_{сумм})}$. Разработана семиуровневая шкала оценки функционального состояния с физическим обоснованием границ через коэффициент обеспеченности $K_{об} = K + 1$. Предложена поэтапная методика расчета, включающая декомпозицию, определение частных коэффициентов РПИ, весовых коэффициентов и интерпретацию по шкале. Апробация на примере системы охлаждения подтвердила работоспособность метода и возможность выявления слабых звеньев.

Закключение. Научная новизна заключается в установлении связи РПИ с вероятностными характеристиками и разработке унифицированной шкалы. Практическая значимость – создание основы для автоматизированных систем поддержки принятия решений и предиктивно-превентивного управления состоянием судовых ЯЭУ.

Ключевые слова: судовая ядерная энергетическая установка, эффективность, функциональное состояние, режимно-потенциальная избыточность, шкала оценки, идентификация, надежность, резервирование.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

UDC 621.039.5:629.5.03

EDN: NGGXUR

A.A. Samatov, B.R. Malkarov

Naval Polytechnic Institute, Military Educational & Scientific Center „Naval Academy“, St. Petersburg, Russia

A RATING SCALE TO ASSESS THE EFFICIENCY OF NUCLEAR POWER PLANTS BASED ON THE “REGIME-POTENTIAL REDUNDANCY” CONCEPT

Object and purpose of research. The object of research is ship nuclear power plants as sophisticated engineering systems functioning in dynamically changing conditions. The purpose is to develop and scientifically justify the method of quantitative evaluation of ship nuclear power system performance based on the “regime-potential redundancy” (RPR) concept using a standard scale for interpretation of the functional status.

Для цитирования: Саматов А.А., Малкаров Б.Р. Шкала оценки эффективности судовых ядерных энергетических установок на основе режимно-потенциальной избыточности. Труды Крыловского государственного научного центра. 2026; 3(417): 69–76.

For citations: Samatov A.A., Malkarov B.R. A rating scale to assess the efficiency of nuclear power plants based on the “regime-potential redundancy” concept. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2026; 3(417): 69–76 (in Russian).

Materials and methods. The theoretical grounds are based on formulations of the system analysis, reliability theory and RPR concept of professor G.A. Ershov. The study employs the methods of mathematical simulation, theory of probability, approximation of functions and the hierarchical analysis techniques. The source data for appraisal are taken from operational documentation of the fourth loop cooling circuit of ship nuclear power plants.

Main results. The study finds an analytical relationship between RPR factors and probability characteristics of reliability. A relation is established for the integral efficiency factor $P_{\text{CTC}} = 1 - e^{(-K_{\text{сумм}})}$. A seven-level rating scale is developed for assessing the functional status with physical validation of boundaries through the utilization factor $K_{06} = K + 1$. A phase-wise calculation technique is suggested including decomposition, determination of specific RPR factors, weighing coefficients and interpretation according to the scale. Tested on the cooling system, the method proved its capability and capacity to identify weak links.

Conclusion. The scientific novelty of the study consists in relating RPR to probability characteristics and development of the unified rating scale. The practical value of the study is development of the basis for computerized decision support system and predictive & preventive management of ship nuclear power plants.

Keywords: ship nuclear power plant, efficiency, functional status, regime-potential redundancy, rating scale, identification, reliability, reservation.

The authors declare no conflicts of interest.

Введение

Introduction

Современные требования к безопасности и эффективности судовых ядерных энергетических установок обуславливают необходимость перехода от пассивной регистрации отклонений параметров к активному управлению их функциональным состоянием в реальном масштабе времени.

Традиционные методы идентификации, основанные на сравнении текущих значений с уставками, констатируют уже свершившееся нарушение, не позволяя оценить степень приближения к предельным режимам и не отвечая на вопрос о запасе работоспособности системы [1, 2]. Статистические подходы, оперирующие вероятностями безотказной работы за прошедший период, также неприменимы для оперативной диагностики, т.к. нечувствительны к текущим физическим процессам и динамике изменения внешних условий [6].

Указанные обстоятельства определяют актуальность разработки нового методологического аппарата, способного обеспечить интегральную оценку функционального состояния в реальном времени.

Постановка задачи и обоснование подхода

Problem statement and validation of approach

Несмотря на многообразие методов идентификации функционального состояния сложных технических систем, их применимость к судовым ЯЭУ ограничена рядом принципиальных факторов. Традиционные подходы, основанные на прямом или косвенном контроле отдельных физических параметров, позволяют фиксировать лишь факт отклонения от уставок, но не дают интегральной оценки способности системы выполнять целевые

функции в изменяющихся условиях эксплуатации [1, 2]. Методы параметрических критериев качества требуют вывода оборудования из рабочего режима для подачи тестовых воздействий, что неприемлемо для непрерывно действующих энергетических установок [6].

Интеллектуальные системы, включая нейросетевые и экспертные модели, обладают потенциальными возможностями для решения задач диагностики, однако их применение в рассматриваемой предметной области сопряжено с существенными трудностями. Нейросетевые подходы требуют представительных обучающих выборок, включающих данные о предаварийных и аварийных состояниях, которые в силу специфики эксплуатации ЯЭУ практически недоступны. Кроме того, они страдают «проклятием размерности» при увеличении числа контролируемых параметров и проблемой «черного ящика», затрудняющей интерпретацию результатов [5]. Экспертные системы, в свою очередь, основываются на субъективных оценках и требуют формализации знаний, что для ЯЭУ приводит к экспоненциальному росту базы правил и сложности ее верификации [4, 12].

Особую сложность представляет учет взаимосвязей между элементами и подсистемами ЯЭУ, а также влияние режимов работы и внешних факторов на итоговую эффективность. Вероятностно-статистические модели, широко применяемые на этапе проектирования для оценки надежности, оперируют усредненными характеристиками и не отражают текущего физического состояния оборудования, его удаленности от предельных режимов [10]. Это делает их непригодными для оперативного управления и поддержки принятия решений в реальном масштабе времени, особенно в нештатных и аварийных ситуациях.

Альтернативой перечисленным подходам выступает концепция РПИ, предложенная профессо-

ром Г.А. Ершовым для количественной оценки запаса функциональной устойчивости корабельных энергетических установок [4, 11]. Данная концепция базируется на выделении пяти видов избыточности (нагрузочной, структурной, функциональной, параметрической и временной), каждая из которых характеризуется соответствующим коэффициентом, имеющим четкую физическую интерпретацию, и формулой расчета [4, 11]. В отличие от традиционных показателей надежности, коэффициенты РПИ могут быть непосредственно рассчитаны по текущим значениям технологических параметров и позволяют оценить, насколько далеко система находится от границы потери работоспособности. Как показано в работах [8, 9, 11], условие неотрицательности всех частных коэффициентов является необходимым и достаточным для допустимости режима, а минимальное значение среди них определяет интегральный запас.

Вместе с тем существующая методика оценки РПИ ориентирована преимущественно на анализ фиксированных режимов и не содержит процедуры агрегирования частных показателей в единую скалярную величину, пригодную для непрерывного мониторинга. Кроме того, отсутствует общепринятая шкала, позволяющая интерпретировать численные значения коэффициентов в терминах эффективности функционирования и степени близости к критическим состояниям. Указанные обстоятельства сдерживают практическую реализацию метода в автоматизированных системах управления и диагностики судовых ЯЭУ.

Таким образом, актуальной научной задачей является развитие теоретического базиса количественной оценки эффективности функционирования сложных технических систем на основе аппарата РПИ, включающее:

- обоснование связи между коэффициентами избыточности и вероятностными характеристиками безотказной работы;
- разработку процедуры свертки частных показателей в интегральный индекс функционального состояния;
- построение унифицированной шкалы, обеспечивающей однозначную интерпретацию результатов измерений в реальном времени.

Решение перечисленных задач позволит перейти от фрагментарного контроля параметров к системной оценке эффективности ЯЭУ как единого целого. Это особенно важно для обеспечения живучести и безопасности в условиях динамически изменяющейся обстановки.

Теоретические основы оценки эффективности на основе режимно-потенциальной избыточности

Theoretical basis for efficiency evaluations based on regime-potential redundancy concept

Традиционные подходы к оценке эффективности СТС, таких как судовые ЯЭУ, базируются на вероятностно-весовых моделях вида [10]:

$$P_{СТС} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i)^{\gamma_i}, \quad (1)$$

где P_i – эффективность функционирования i -й подсистемы, γ_i – весовые коэффициенты, отражающие ее критичность ($0 \leq \gamma_i \leq 1$). Данная модель позволяет получить интегральную оценку, однако обладает рядом принципиальных ограничений:

- она статична и не учитывает изменение состояния системы во времени;
- предполагает независимость отказов подсистем, что для ЯЭУ с общими причинами отказов является сильным допущением;
- оперирует вероятностными характеристиками, которые не могут быть непосредственно измерены в текущий момент эксплуатации;
- не дает ответа на вопрос о запасе работоспособности и близости к предельным режимам.

Для преодоления этих ограничений необходимо перейти к динамическим показателям, связанным с текущими физическими параметрами. В качестве теоретической основы предлагается использовать концепцию РПИ [4, 8, 9, 11]. Коэффициенты РПИ представляют собой количественную меру запаса по различным аспектам функционирования. В общем виде коэффициент избыточности по i -му параметру определяется как:

$$K_i = \frac{S_f - S_{\min}}{S_{\min}}, \quad (2)$$

где S_f – текущее значение параметра, $S_{\min}$ – минимально допустимое (предельное) значение. Положительные значения K_i свидетельствуют о наличии запаса, отрицательные – о дефиците и недопустимом состоянии [9].

Ключевая идея предлагаемого подхода заключается в установлении связи между коэффициентами РПИ и вероятностными характеристиками надежности. Если принять, что интенсивность отказов λ_i экспоненциально убывает с ростом запаса [4],

то для малых интервалов времени справедлива аппроксимация вероятности безотказной работы:

$$P_i(t) \approx 1 - \lambda_i^0 \cdot e^{-\beta_i \cdot K_i},$$

где λ_i^0 – базовая интенсивность отказов, β_i – коэффициент чувствительности. После введения весовых коэффициентов α_i (с нормировкой $\sum \alpha_i = 1$) и нормировки базовых параметров получаем интегральный показатель эффективности:

$$P_{\text{СТС}} = 1 - e^{(-\sum \alpha_i \cdot K_i)} = 1 - e^{(-K_{\text{сумм}})}. \quad (3)$$

Формула (3) является ключевым результатом теоретического анализа. Она устанавливает прямую связь между интегральным показателем эффективности $P_{\text{СТС}}$, изменяющимся в диапазоне от 0 до 1, и взвешенной суммой коэффициентов РПИ $K_{\text{сумм}}$, рассчитываемых в реальном времени по текущим

технологическим параметрам. Функция монотонно возрастает с ростом запаса, причем наибольший прирост эффективности наблюдается в области малых $K_{\text{сумм}}$, а дальнейшее увеличение запаса дает убывающую отдачу, что соответствует принципу убывающей предельной полезности.

Разработка шкалы оценки функционального состояния

Development of functional status scale

На основе выражения (3) и соотношения $K = -\ln(1 - P_{\text{СТС}})$ разработана унифицированная шкала качественных состояний (табл. 1). Для обоснования границ шкалы введем коэффициент обеспеченности $K_{\text{об}} = K + 1$, который показывает, во сколько раз

Таблица 1. Шкала оценки функционального состояния на основе режимно-потенциальной избыточности

Table 1. Scale for functional status evaluation based on regime-potential redundancy concept

№ п/п	Режим функционирования	$P_{\text{СТС}}$	K	Диагностика состояния и физическая интерпретация	Рекомендуемые управляющие воздействия
1	Аварийный (отказ)	0	≤ 0	Полная потеря работоспособности. Истощение расчетных запасов по критическим параметрам	Немедленная аварийная остановка. Внешнее вмешательство
2	Предельный (критический)	(0; 0,095)	(0; 0,1)	Запас отсутствует, любое возмущение ведет к отказу. Высокий уровень напряжений	Допустим только для кратковременного парирования внештатной ситуации. Требует управления оператором высшей квалификации
3	Предельный (допустимый)	[0,095; 0,63]	[0,1; 1,0]	Минимальный оперативный резерв (10–100 % нагрузки). Устойчивость только в штатных условиях	Допустим для кратковременного маневрирования. Непрерывный мониторинг. Подготовка к переходу
4	Нормальный (номинальный)	[0,63; 0,87]	[1,0; 2,0]	Двукратный запас, устойчивость к стандартным возмущениям. Нормативный уровень нагрузок	Режим выполнения плановых задач. Рутинный контроль. Оптимален по соотношению «ресурс/эффективность»
5	Нормальный (оптимальный)	[0,87; 0,95]	[2,0; 3,0]	Трехкратный запас, устойчивость к совмещенным отклонениям. Минимальный риск отказа	Целевой режим для длительной автономной эксплуатации. Максимальная живучесть
6	Повышенной эффективности	[0,95; 0,99]	[3,0; 4,6]	Значительный избыточный запас, компенсация отказов отдельных элементов	Режим для выполнения ответственных задач (боевое дежурство, действия в сложных условиях)
7	Гарантированной эффективности	[0,99; 1)	$\geq 4,6$	Практически абсолютная надежность (экономически избыточна)	Режим для критически важных систем безопасности на ограниченное время

текущее значение параметра превышает минимально допустимое.

Граница $K = 0,1$ ($K_{об} = 1,1$) соответствует 91%-й загрузке оборудования относительно предельных значений. При дальнейшем увеличении нагрузки начинается нелинейный рост механических и тепловых напряжений, ускоренная ползучесть материалов, возрастает риск выхода на критические режимы теплообмена [2]. Данная граница является эксплуатационным «красным» рубежом и отделяет критический режим от допустимого.

Граница $K = 1,0$ ($K_{об} = 2,0$) означает, что система использует не более 50 % своего расчетного предела. Это порог гарантированной устойчивости, при котором система обладает достаточным динамическим диапазоном для компенсации внутренних деградационных процессов и внешних возмущений без приближения к критическим пределам.

Граница $K = 2,0$ ($K_{об} = 3,0$) соответствует трехкратному запасу относительно точки $K = 0$. Данный уровень обеспечивает оптимальный баланс между надежностью и экономичностью для длительной эксплуатации, соответствуя принципу глубоко эшелонированной защиты.

Граница $K = 3,0$ ($K_{об} = 4,0$) – классический инженерный стандарт для систем высокой доступности (high availability). Четырехкратный общий запас позволяет системе сохранять функциональность при возникновении единичных отказов элементов.

Граница $K = 4,6$ ($K_{об} = 5,6$) соответствует уровню, при котором эффективность системы становится практически идеальной ($P_{СТС} \approx 0,99$). Дальнейшее увеличение запаса дает незначительный прирост эффективности, но требует существенных экономических и массогабаритных затрат.

Методика количественной оценки эффективности сложных технических систем

Method of quantitative efficiency evaluation for sophisticated engineering systems

Предлагаемая методика оценки эффективности $P_{СТС}$ базируется на следующих этапах:

1. Декомпозиция системы и определение критических параметров. Для каждой подсистемы (элемента) выбирается параметр, характеризующий работоспособность (расход, давление, температура и т.п.), устанавливаются его номинальное $\omega_i^{ном}$ и минимально допустимое ω_i^{min} значе-

ния в соответствии с эксплуатационной документацией [2].

2. Расчет частных коэффициентов РПИ K_i . Для текущего режима вычисляются пять видов избыточности (нагрузочная K_N , структурная K_S , функциональная K_V , параметрическая K_P и временная K_t) по формулам, детально описанным в [11]. Обобщенный коэффициент для i -й подсистемы определяется как минимальное значение:

$$K_i = \min(K_N, K_S, K_V, K_P, K_t). \quad (4)$$

При этом отрицательные значения K_i обнуляются для корректности вероятностной модели.

3. Определение весовых коэффициентов α_i . Веса, отражающие важность каждой подсистемы для выполнения общей функции, назначаются экспертным или аналитическим методом (например, методом анализа иерархий [7]) с последующей нормировкой $\sum \alpha_i = 1$.
4. Расчет интегрального показателя. Суммарный запас $K_{сумм} = \sum \alpha_i \cdot K_i$ подставляется в выражение (3), давая значение $P_{СТС}$.
5. Интерпретация результата. Полученное $P_{СТС}$ сопоставляется со шкалой (табл. 1) для определения режима функционирования и выработки рекомендаций.

Практические примеры расчета и интерпретация результатов

Practical examples of calculation and interpretation of results

Рассмотрим гидравлическую систему (аналог системы четвертого контура для ЯЭУ), которая состоит из насоса и теплообменника, соединенных последовательно (рис. 1а). Исходные параметры для расчетного режима [11]: фактический расход по четвертому контуру $G_k = 120$ кг/ч, температура заборной воды на входе $T_1^k = -2$ °С, на выходе $T_2^k = 25$ °С, температура охлаждаемой среды на выходе из теплообменника $T_2^{ТО3-4} = 25$ °С, расход по третьему контуру $G_k^{ТО3-4} = 36$ кг/ч, скорость нагрева $V_T^k = 1,75$ °С/ч. Подробный вывод формул для коэффициентов РПИ приведен в [11].

Подстановка данных дает следующие значения частных коэффициентов: $K_N = 1,219$; $K_S = 0$ (отсутствие структурного резерва); $K_V = 2,219$; $K_P = 0,846$; $K_t = 0,870$. Минимальное значение $K_i = 0$, следовательно, по (3) $P_{СТС} = 0$. Система работает на пределе – режим аварийный.

При включении насоса на большую скорость структурная избыточность становится $K_S = 0,5$,

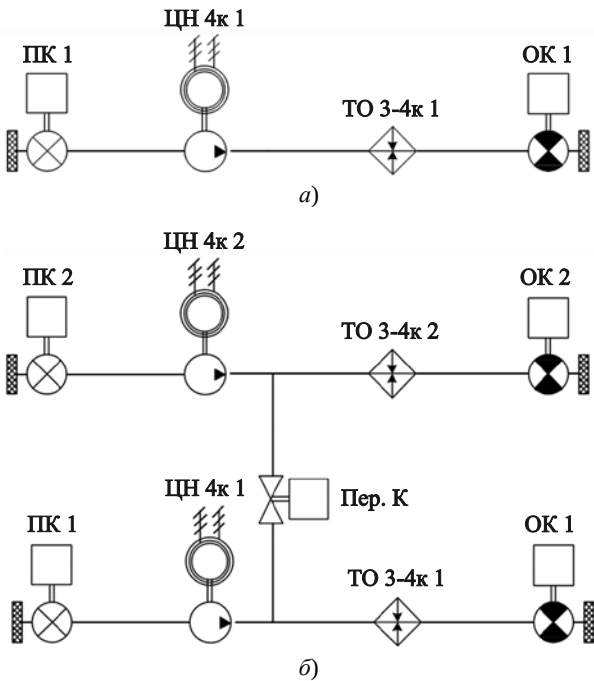


Рис. 1. Расчетные гидравлические системы: а) последовательная; б) мостиковая

Fig. 1. Hydraulic system designs: а) series type; б) bridge type

тогда $K_i = 0,5$ и $P_{СТС} \approx 0,39$. Согласно шкале, это предельный (допустимый) режим, близкий к критическому. Система работоспособна, но требует повышенного внимания.

Заменим последовательную схему на мостиковую (перекрестную), позволяющую взаимно резервировать насосы и теплообменники (рис. 1б). При тех же исходных данных получаем $K_i = 0,846$ (лимитирующим становится параметрический запас) и $P_{СТС} \approx 0,57$. Эффективность возросла на 32 % по

сравнению с последовательной схемой при работе на большой скорости, однако система все еще находится в предельном (допустимом) режиме.

Рассмотрим случай, когда гидравлическая система является надсистемой, состоящей из двух подсистем: последовательной (вес $\alpha_1 = 0,6$) и мостиковой ($\alpha_1 = 0,4$). Используя полученные значения $P_{СТС}$ для каждой подсистемы, найдем соответствующие коэффициенты запаса из (3): $K_1 = 0,5$ и $K_2 = 0,846$. Тогда:

$$K_{\text{сумм}} = \alpha_1 \cdot K_1 + \alpha_2 \cdot K_2 = 0,6 \cdot 0,39 + 0,4 \cdot 0,57 = 0,638;$$

$$P_{СТС} = 1 - e^{(-0,638)} \approx 0,47.$$

Итоговая эффективность (0,47) соответствует предельному (допустимому) режиму. Несмотря на наличие резервирования в одной из подсистем, общий показатель просел из-за доминирования слабого звена – последовательной подсистемы с большим весовым коэффициентом. Это наглядно демонстрирует действие принципа слабого звена и корректность предложенной процедуры агрегации через взвешенную сумму запасов. Полученный результат указывает на необходимость комплексного подхода: повышение эффективности должно начинаться с наиболее критичных элементов.

Сравнение с существующими подходами

Comparison with existing approaches

Разработанная шкала и методика в целом выгодно отличаются от традиционных подходов (табл. 2).

Разработанный подход:

- динамичен и прогностичен – позволяет оценивать изменение состояния при смене режима в реальном времени;

Таблица 2. Сравнительная характеристика шкал оценки технического состояния

Table 2. Comparative characteristics of scales for status appraisal

Критерий	Разработанная шкала	Шкала готовности (MIL-STD-721)	Балльная шкала (ГОСТ 27.002)	Шкала Харрингтона	Бинарная логика
Основа оценки	РПИ K_i , физические параметры	Статистика отказов	Экспертное мнение	Субъективная желательность	Пороговая логика
Прогностическая способность	Высокая	Отсутствует	Отсутствует	Ограниченная	Отсутствует
Учет запаса	Прямой, количественный	Косвенный	Качественный	Опосредованный	Нет
Динамичность	Высокая	Низкая	Низкая	Нет	Низкая

- строго формализован – исключает субъективизм экспертных оценок;
- ориентирован на оперативное управление – дает оператору однозначные рекомендации;
- измеряет степень приближения к отказу – реализует принципы предиктивно-превентивного управления.

Заключение

Conclusion

В работе решена актуальная научная задача разработки теоретического базиса и методики количественной оценки функционального состояния судовых ЯЭУ на основе концепции РПИ.

Научная новизна заключается в следующем:

1. Установлена аналитическая связь между коэффициентами РПИ и вероятностными характеристиками надежности, что позволило получить интегральный показатель эффективности $P_{\text{СТС}} = 1 - e^{(-K_{\text{сумм}})}$.
2. Теоретически обоснована и разработана унифицированная семиуровневая шкала оценки функционального состояния с физической интерпретацией границ через коэффициент обеспеченности.
3. Предложена методика агрегации частных показателей, учитывающая весовые коэффициенты подсистем и позволяющая выявлять слабые звенья.

Практическая значимость результатов подтверждена апробацией на примере системы охлаждения ЯЭУ. Показано, что методика:

- чувствительна к изменению структуры (последовательная/мостиковая схема) и режимов работы;
- позволяет количественно оценить эффект от введения резервирования (повышение $P_{\text{СТС}}$ на 32 %);
- выявляет критические элементы, лимитирующие общую эффективность.

Предложенный подход создает основу для создания автоматизированных систем поддержки принятия решений, способных в реальном времени оценивать запас функциональной устойчивости и предупреждать о приближении к критическим режимам. Дальнейшие исследования будут направлены на автоматизацию расчетов, интеграцию метода в существующие системы управления судовыми ЯЭУ и его адаптацию для других классов СТС.

Список использованной литературы

1. Арзамасцев Д.А., Липес А.В., Мызин А.Л. Модели оптимизации развития энергосистем. Москва : Высшая школа, 1987. 272 с.

2. Деев В.И., Щукин Н.В., Черезов А.Л. Основы расчета судовых ЯЭУ : учеб. пособие. Москва : НИЯУ МИФИ, 2012. 254 с. (Библиотека ядерного университета).
3. Еременко В.А. Пути обеспечения безопасного управления атомными энергетическими установками. Киев : Тэхника, 1988. 254, [3] с.
4. Ершов Г.А. Автоматизированное моделирование и расчет показателей качества функционирования корабельных АЭУ : дис. ... д-ра техн. наук. Санкт-Петербург : ВВМИОЛУ, 1997. 326 с.
5. Колесник В.А., Промыслов Л.А. Вероятностно-информационная модель с иерархической организацией системы контроля корабельной энергетической установки // Вопросы эксплуатации и надежности : сборник науч. трудов. Ленинград : СПМБМ «Малахит», 1991. № 80. С. 12–18.
6. Перегудов Ф.И., Тарасенко Ф.П. Введение в системный анализ. Москва : Высшая школа, 1989. 367 с.
7. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Пер. с англ. Р.Г. Вачнадзе. Москва : Радио и связь, 1993. 314, [1] с.
8. Саматов А.А. Использование метода количественной оценки величины режимно-потенциальной избыточности для идентификации функционального состояния сложных технических систем // Научная дискуссия: вопросы технических наук. 2017. № 4(44). С. 28–35.
9. Саматов А.А., Винокуров В.А., Ларин П.С. Методика количественной оценки режимно-потенциальной избыточности корабельной ядерной паропроизводящей установки // Труды Крыловского государственного научного центра. 2017. Вып. 1(379). С. 110–114.
10. Саматов А.А., Малкаров Б.Р. Иерархически агрегативная модель оценки эффективности судовой ядерной энергетической установки как сложной технической системы // Наука России : сборник статей V Всерос. науч.-практ. конф. Пенза : Наука и просвещение, 2026. С. 29–35.
11. Саматов А.А., Малкаров Б.Р. Количественная оценка функционального состояния судовых ядерных энергетических установок на основе режимно-потенциальной избыточности // Фундаментальные и прикладные научные исследования в современном мире : сборник научных статей по материалам X Междунар. науч.-практ. конф. Уфа : Вестник науки, 2026. С. 102–111.
12. Шканов О.В., Березин С.Н., Титаренко А.П. Оценка состояния судовых технических средств // Судостроение. 1992. № 3. С. 23–25.

References

1. Arzamastsev D.A., Lipes A.V., Myzin A.L. Optimization models for development of power systems. Moscow : Vysshaya Shkola, 1987. 272 p. (in Russian).

2. Deyev V.I., Shchukin N.V., Cherezov A.L. Fundamentals for design of ship nuclear power systems. Moscow : NIYU MIFI, 2012. 254 p. (Nuclear University Library) *(in Russian)*.
3. Eremenko V.A. Ways to ensure safe control of nuclear power installations. Kiev : Tekhnika, 1988. 254, [3] p. *(in Russian)*.
4. Ershov G.A. Computer-aided modeling and calculation of quality parameters for ship nuclear power plants : Dr. Sci. (Eng.) Thesis. St. Petersburg : VVMIOU, 1997. 326 p. *(in Russian)*.
5. Kolesnik V.A., Promyslov L.A. Probability information model with hierarchal control system of ship power plant // Issues of operation and reliability. Collection of research papers. Leningrad : SPMBM Malachite, 1991. No. 80. P. 12–18 *(in Russian)*.
6. Peregudov F.I., Tarasenko F.P. Introduction to system analysis. Moscow : Vysshaya Shkola, 1989. 367 p. *(in Russian)*.
7. Saaty T. The Analytic Hierarchy Process / Translated from English by R.G. Vachnadze. Moscow : Radio and communication, 1993. 314, [1] p. *(in Russian)*.
8. Samatov A.A. Use of quantitative evaluation based on the regime-potential redundancy to identify functional status of sophisticated engineering systems // Scientific discussion: issues of technical sciences. 2017. No. 4(44). P. 28–35 *(in Russian)*.
9. Samatov A.A., Vinokurov V.A., Larin P.S. Method of quantitative evaluation based on the regime-potential redundancy of ship nuclear steam-generating installation // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2017. Vol. 1(379). P. 110–114 *(in Russian)*.
10. Samatov A.A., Malkarov B.R. The hierarchical aggregate model for assessing the efficiency of the ship nuclear power plant as a sophisticated engineering system // Science of Russia : Proceedings of V All-Russian Science & Practice Conference. Penza : Nauka i prosveshchenie, 2026. P. 29–35 *(in Russian)*.
11. Samatov A.A., Malkarov B.R. Quantitative evaluation of functional status for ship nuclear power plants based on regime-potential redundancy // Fundamental and applied research in modern world : Proceedings of X International Science & Practice Conference. Ufa : Vestnik Nauki, 2026. P. 102–111 *(in Russian)*.
12. Shkanov O.V., Berezin S.N., Titarenko A.P. Condition monitoring of ship systems // Sudostroenie. 1992. No. 3. P. 23–25 *(in Russian)*.

Сведения об авторах

Саматов Артем Анатольевич, к.т.н., доцент, заместитель начальника кафедры ядерных энергетических установок Военного института (военно-морского политехнического) ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия». Адрес: 196602, Россия, Санкт-Петербург, Пушкин, Кадетский бул., д. 1. Тел.: +7 (812) 312-56-76. E-mail: artem_samatov@inbox.ru.

Малкаров Булат Расулович, адъюнкт кафедры ядерных энергетических установок Военного института (военно-морского политехнического) ВУНЦ ВМФ «Военно-морская академия». Адрес: 196602, Санкт-Петербург, Пушкин, Кадетский бул., д. 1. Тел.: +7 (812) 312-56-76. E-mail: bulatmalkarov@mail.ru.

About the authors

Artem A. Samatov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Deputy Head of Nuclear Power Plants Dept., Naval Polytechnic Institute, Military Educational & Scientific Center „Naval Academy“. Address: 1, Kadetsky bul., Pushkin, St. Petersburg, Russia, post code 196602. Tel.: +7 (812) 312-56-76. E-mail: artem_samatov@inbox.ru.

Bulat R. Malkarov, Postgraduate student of Nuclear Power Plants Dept., Naval Polytechnic Institute, Military Educational & Scientific Center „Naval Academy“. Address: 1, Kadetsky bul., Pushkin, St. Petersburg, Russia, post code 196602. Tel.: +7 (812) 312-56-76. E-mail: bulatmalkarov@mail.ru.

Поступила / Received: 18.03.26
Принята в печать / Accepted: 27.07.26
© Саматов А.А., Малкаров Б.Р., 2026