

УДК 621.325

**П.П. Чабаненко, профессор, д-р воен. наук, Засл. деятель науки и техн. Украины,
В.А. Крынцыло**

*Севастопольский военно-морской институт имени П.С. Нахимова
ул. Дыбенко, 1-А, г. Севастополь, Украина, 99035*

E-mail: admiral@sevstar.net.ua

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ КОРАБЕЛЬНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК С УЧЕТОМ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЭКИПАЖА

Анализируются методы оценки деятельности экипажа, обслуживающего КЭУ. Приведены математические зависимости для оценки эффективности деятельности экипажа методом числовых характеристик случайных величин на графах.

За последние 10 – 15 лет требования, предъявляемые к корабельным энергетическим установкам (КЭУ), значительно повысились. Это, в первую очередь, связано со строительством многоцелевых кораблей, широким внедрением автоматизации, повышением мощностей и скоростей рабочих органов, усложнением конструкций КЭУ. Соответственно меняются и требования к специалистам, занимающимся их эксплуатацией.

В ходе научно-технической революции, связанной с автоматизацией, стало очевидным, что нельзя полностью заменить человека автоматом. Можно ставить вопрос лишь об усилении человеческих способностей с помощью технических средств. В настоящее время становится общепризнанным, что при рассмотрении эффективности техники необходимо комплексно учитывать свойства и возможности человека и техники.

В настоящее время в связи с наметившейся тенденцией к проектированию и дальнейшему строительству кораблей для ВМС Украины возникла необходимость в математическом и методологическом аппарате, позволяющем оценивать возможности и способности человека при управлении и обслуживании КЭУ.

Существующие методики оценки эффективности технических средств, в том числе и корабельных энергетических установок, слабо ориентированы на учет человеческого фактора что, на наш взгляд, снижает их адекватность.

Целью статьи является анализ существующих методов оценки эффективности эксплуатации КЭУ с учетом деятельности экипажа, определение нерешенных вопросов и постановка задач на проведение дальнейших исследований.

Будем рассматривать КЭУ как составную часть эрготехнической системы (ЭС), показанной на рисунке 1. Такую эрготехническую систему назовем **корабельной энергетической системой (КЭС)**.

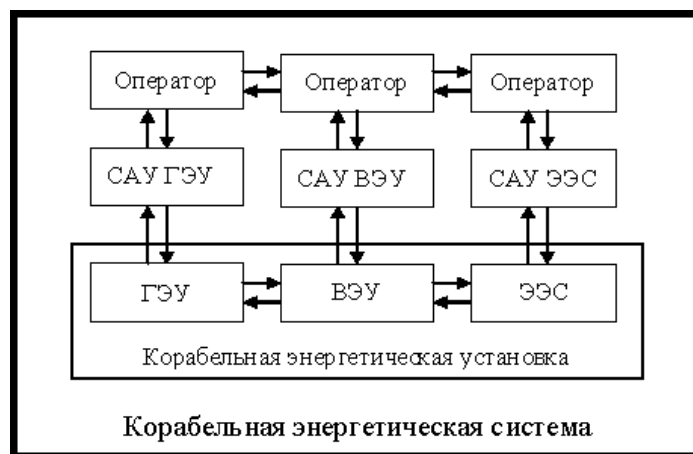


Рисунок 1 – Структурная схема корабельной энергетической системы

Условно КЭС структурно можно представить как систему, состоящую из следующих основных элементов: главная энергетическая установка (ГЭУ); вспомогательная энергетическая установка (ВЭУ); электроэнергетическая система (ЭЭС); системы автоматизированного управления соответственно ГЭУ, ВЭУ и ЭЭС; операторы пультов управления ГЭУ, ВЭУ и ЭЭС.

Деления КЭС на такие составляющие является чисто условным. В зависимости от конкретного проекта корабля состав и связи КЭС могут меняться. Поэтому при анализе КЭС конкретного корабля

данную структурную схему необходимо детализировать. Схема на рисунке 1 типовая и приведена с целью иллюстрации дальнейшего изложения.

Эффективность КЭС зависит от эффективности функционирования всех входящих в нее элементов. В общем виде эффективность КЭС можно выразить зависимостью

$$\mathcal{E}_{КЭС} = f(\mathcal{E}_{ГЭУ}, \mathcal{E}_{ВЭУ}, \mathcal{E}_{ЭЭС}, \mathcal{E}_{САУГЭУ}, \mathcal{E}_{САУВЭУ}, \mathcal{E}_{САУЭЭС}, \mathcal{E}_{ОпПУГЭУ}, \mathcal{E}_{ОпПУВЭУ}, \mathcal{E}_{ОпПУЭЭС}),$$

где $\mathcal{E}_{ГЭУ}$ – эффективность ГЭУ; $\mathcal{E}_{ВЭУ}$ – эффективность ВЭУ; $\mathcal{E}_{ЭЭС}$ – эффективность ЭЭС; $\mathcal{E}_{САУГЭУ}$ – эффективность системы автоматизированного управления ГЭУ; $\mathcal{E}_{САУВЭУ}$ – эффективность системы автоматизированного управления ВЭУ; $\mathcal{E}_{САУЭЭС}$ – эффективность системы автоматизированного управления ЭЭС; $\mathcal{E}_{ОпПУГЭУ}$ – эффективность оператора пульта управления ГЭУ; $\mathcal{E}_{ОпПУВЭУ}$ – эффективность оператора пульта управления ВЭУ; $\mathcal{E}_{ОпПУЭЭС}$ – эффективность оператора пульта управления ЭЭС.

В работе [1] приведена следующая градация эффективности ЭС:

- прагматическая эффективность – когда в качестве оценки принимается степень достижения поставленной перед системой цели (оценка по достигнутому результату);
- специфическая (техническая, военная и т.д.) эффективность – когда в качестве оценки принимается эффект, получаемый благодаря достижению цели системой (оценка по эффекту);
- специфически-экономическая (техничко-экономическая, военно-экономическая и т.д.) эффективность – когда при оценке учитывается не только достигаемый системой материальный эффект, но и материальные затраты, которые необходимы для достижения этого эффекта (оценка по комплексу «эффект – затраты»).

Для каждого вида эффективности предложены следующие показатели: для прагматической эффективности – вероятность достижения определенного результата; для специфической эффективности – вероятность достижения определенного эффекта, получаемого от достижения цели; для экономической эффективности – вероятность достижения определенного соотношения «экономический эффект – затраты».

Вопросы оценки эффективности ГЭУ, ВЭУ, ЭЭС а также соответствующих систем автоматизированного управления детально разработаны, поэтому рассмотрим более подробно оценку эффективности деятельности операторов пультов управления КЭУ. В зависимости от проекта корабля, типа его энергетической установки и режимов ее использования в управлении КЭУ одновременно могут принимать участие различное количество операторов.

Известно несколько методов, позволяющих априорно или апостериорно оценить деятельность человека (оператора) при взаимодействии его со сложными техническими системами. К ним относятся следующие:

- метод функциональных сетей, основанный на подробном анализе структуры деятельности с последующим описанием алгоритмов преобразования информации человеком как совокупности дискретных операций определенного типа;
- метод статистического эталона, основанный на оценке совокупности количественных показателей (времени и вероятности безошибочного выполнения операций), получаемых при выполнении оператором конкретных операций в зависимости от факторов сложности операторской деятельности;
- операционно-психофизиологический метод, основанный на декомпозиции деятельности по критерию инвариантности психологического содержания отдельных действий и учитывающий влияние на качество работы оператора специфической и неспецифической напряженности;
- метод оценки надежности технических объектов с учетом деятельности людей (операторов и обслуживающего персонала);
- метод оценки надежности и устойчивости ЭС, основанный на концепции постоянного конфликта между человеком и машиной;
- методы, основанные на моделировании деятельности человека-оператора с использованием теории массового обслуживания, ситуационного управления, теории автоматического регулирования.

Из аналитических методов наиболее разработанным является метод функциональных сетей, развитого научной школой «Эффективность, качество и надёжность эрготехнических систем», становление которой связано с именем проф. А.И. Губинского. Существенный вклад в разработку аппарата функциональных сетей внесли его ученики – доктора наук: А. Ашеро́в (г. Харьков), В. Евграфов (г. Санкт-Петербург), Е. Лавров (г. Сумы), А. Ротштейн (г. Винница), Е. Цой (г. Новосибирск), П. Чабаненко (г. Севастополь) и другие.

Этот метод применим главным образом для систем, функционирование которых представляется сетью с дифференцированной оценкой безошибочности и своевременности выполнения заданного алгоритма. При этом используется гамма-распределение времени выполнения операций. Структура деятельности в случае применения этого метода состоит из таких функциональных единиц, как

сенсорные, моторные, логические блоки, блоки задержки, блоки с обратной связью, диагностические блоки и блоки самоконтроля.

По нашему мнению, основные достоинства метода функциональных сетей (ФС) заключаются в следующем.

1. Удобство символики и методики использования функциональных структурных моделей, разгружающих мышление специалистов, пользующихся аппаратом ФС. В аксиоматику метода включено малое число типовых единиц функционирования («кирпичиков»), из которых складываются типовые функциональные структуры (блоки операций), а из них набираются процессы функционирования (ПФ) системы в целом. Оценка ПФ осуществляется поэтапным его укрупнением с пересчётом используемых характеристик по принципу «матрёшки». Такая «технология исследования» проста в своей основе и понятна специалистам различного профиля.

2. Особенность и естественность принятой взаимосвязанной системы показателей безошибочности и ресурсности, обладающих свойством агрегирования в показатели эффективности систем. Используемые в инженерной психологии иные показатели, в частности показатели стереотипности и логической сложности таким свойством не обладают.

3. Возможность описывать и оценивать не только сети операций исполнения, но и сети выработки и принятия решений с комплексным учётом свойств, присущих как технике, так и человеку. Причём, учёту специфических свойств человека уделено большое внимание.

4. Снижение трудоёмкости количественной оценки ПФ системы за счёт предварительной разработки набора математических моделей для вычисления вероятностно-временных и ресурсно-стоимостных показателей качества выполнения типовых блоков операций (ТБО). Применение таких готовых моделей сокращает статистическую часть исследования.

Решение широкого круга практических задач подтвердило достоинства метода ФС и, вместе с тем, потребовало развития его аналитической составляющей. Причины этого заключаются в следующем:

1) формулы для расчёта показателей качества выполнения ТБО были получены при бинарном подходе (рассматривались безошибочный и ошибочный исходы выполнения операций), а ресурсные (временные и стоимостные) характеристики операций и их блоков полагались независимыми от исходов;

2) формулы для оценки показателей времени и стоимости выполнения произвольного числа параллельных операций отсутствовали;

3) появилась необходимость более адекватно и точно моделировать влияние различных факторов на действия специалистов в системе.

Развитие аппарата ФС потребовало разработки более сложных моделей, чем ранее полученные, и, как следствие, разработки более удобного в применении метода вывода аналитических зависимостей для оценки показателей качества выполнения ТБО.

В качестве такого метода предлагается **метод числовых характеристик случайных величин на графах**. В этом методе описательные модели процессов функционирования представляются графом работ (ГР) с операциями в его вершинах в виде различных графических символов (для отражения семантики) и дугами, указывающими их связи. Оценочные модели удобно получать по вероятностным графам событий (ГС) с дугами-операциями (работами) и вершинами – их началами и (или) окончаниями. Пример ГР и ГС с частичным отображением семантики показан на рисунке 2.

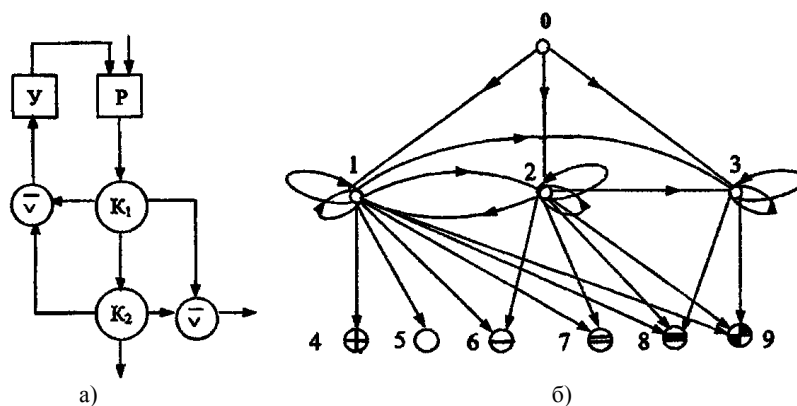


Рисунок 2 – Граф работ (а) и граф событий (б) для типового блока операций:
Р – рабочая операция, K₁, K₂ – контроль правильности выполнения рабочей операции Р,
У – устранение последствий ошибок в работе Р

Основные правила метода состоят в следующем.

1. ГС разрабатывается по ГР (с учетом состава исходных данных) по уровням: компактный укрупненный ГС с числом промежуточных вершин по учитываемым состояниям системы («норма – не

норма», «бездефектна – с обычным устраняемым дефектом – с аварийно-опасным дефектом» и т.д.); детализированные одношаговые ГС на уровне операций ГР.

При необходимости разрабатываются ГС на промежуточных уровнях представления ПФ системы.

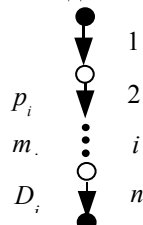
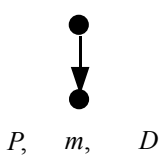
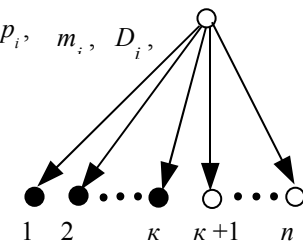
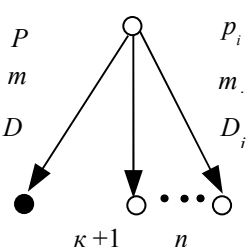
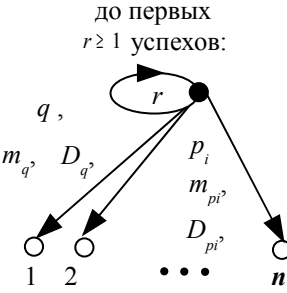
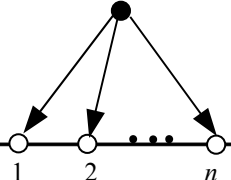
2. Укрупненный ГС поэтапно преобразуется к простому вероятностному ветвлению с начальной и висящими вершинами (без промежуточных) по числу учитываемых итогов функционирования системы.

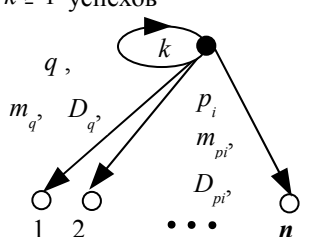
3. При преобразовании ГС в первую очередь укрупняются параллельные операции, сложные контуры выделяются и приводятся к петлям при вершине и затем к одной петле с последующим ее исключением.

4. Преобразование ГС сопровождается аналитическими преобразованиями характеристик их дуг по простым формулам, представленным в таблице 1 для типовых соединений вершин: последовательных путей, ветвлений в вершинах, петель при вершинах.

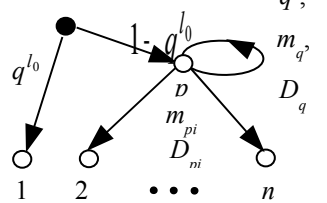
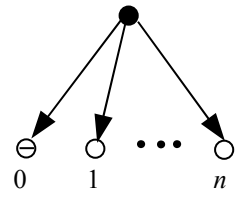
5. Все этапы разработки и преобразования ГС выполняются только при выводе показателей безошибочности, так как в структуре формул для них содержится полная информация о путях из начальной вершины в каждую из поглощающих. Формулы для показателей ресурсных затрат записываются по формулам для показателей безошибочности с использованием этой информации.

Таблица 1 – Преобразования типовых соединений вершин в графах событий

Тип соединения	Преобразования характеристик	Укрупнённая структура
1	2	3
последовательное 	– вероятностных: $P = \prod_{i=1}^n p_i, \quad (1)$ – ресурсных: $m = \sum_{i=1}^n m_i, \quad D \equiv \sum_{i=1}^n D_i. \quad (2)$	
ветвление дуг (путей) 	– вероятностных: $P = \sum_{i=1}^k p_i; \quad (3)$ – ресурсных: $\left. \begin{aligned} m &= P^{-1} \sum_{i=1}^k p_i m_i \\ D &= P^{-1} \sum_{i=1}^k p_i (D_i + m_i^2) - m^2 \end{aligned} \right\} \quad (4)$	
петля с выходами (цикл)		
до первых $r \geq 1$ успехов: 	– вероятностных: $P_i = p_i / p, \quad p = 1 - q; \quad (5)$ – ресурсных: $\left. \begin{aligned} m_i &= \bar{l} m_q + m_{p_i} \\ D_i &= \bar{l} D_q + m_q^2 D_l + D_{p_i} \end{aligned} \right\} \quad (6)$ $\bar{l} = r / p - 1$ $D_l = r q / p^2$ (при $r=1$ – до первого успеха).	

до первой серии $k \geq 1$ успехов 	– вероятностных: $P_i = p_i / p^* , \quad (7)$ – ресурсных: по формулам (6) при $\left. \begin{aligned} \bar{l} &= k - 2 + 1 / p^* \\ D_l &= q^* / (p^*)^2 \end{aligned} \right\} , \quad (8)$ p^* определена в (1...), $q^* = 1 - p^*$	
--	---	--

Продолжение таблицы 1

1	2	3
не более l_0 раз 	– вероятностных: $P_0 = q^{l_0}, P_i = (1 - q^{l_0}) p_i / p , \quad (9)$ – ресурсных по формулам (6) при: $\bar{l} = \begin{cases} l_0 - 1 & \text{для } i = 0, \\ q / p - l_0 q^{l_0} / (1 - q^{l_0}) & \text{для } i > 0 \end{cases} \quad (10)$ $D_l = \begin{cases} 0 & \text{для } i = 0, \\ q / p^2 - l_0^2 q^{l_0} / (1 - q^{l_0})^2 & \text{для } i > 0. \end{cases}$	 (при $l_0 = \infty$ $i = 1, n$)

К настоящему времени разработаны модели оценки безошибочности и ресурсности выполнения ряда ТБО, составляющих библиотеку моделей аппарата функциональных эргосетей. В этих моделях рассматриваются, как правило, бинарные состояния исследуемого объекта [3,5]. Для ТБО «диагностирование с восстановлением» и «диагностирование с восстановлением при ограничении на цикличность» методом числовых характеристик случайных величин на графах разработаны модели, в которых уже учитываются три состояния объекта: работоспособное, с обычным дефектом и аварийно-опасным дефектом, т.е. ошибочные исходы подразделяются на 2 типа – с опасной ошибкой или аварийно-опасной ошибкой [4].

Современная КЭУ состоит из большого числа разнообразных узлов (элементов). Отказ каждого из них переводит КЭУ в неисправное состояние число которых, в общем случае, равно числу возможных отказов КЭУ. Практика показала, что для точной оценки эффективности функционирования КЭУ с учетом деятельности экипажа необходим переход к математическим моделям, позволяющим учитывать все множество возможных состояний КЭУ. В разработанных ранее математических моделях ТБО это множество состояний не учитывалось.

В связи с этим была сформулирована **задача исследований** – разработать математические модели для оценки безошибочности и затрат ресурсов выполнения ТБО, учитывающих множество возможных состояний КЭУ, с помощью которых будет производиться оценка эффективности ее функционирования с учетом деятельности экипажа.

Библиографический список

1. Губинский А.И. Надежность и качество функционирования эргатических систем / А.И. Губинский. — Л.: Наука, 1982. — 270 с.
2. Информационно-управляющие человеко-машинные системы: Исследование, проектирование, испытания. Справочник / А.Н. Адамов [и др.]; под ред. Губинского А.И., Евграфова В.Г. — М.: Машиностроение, 1993. — 528 с.
3. Гаршин О.Ю. Оцінка імовірності аварійно-небезпечного дефекту у корабельного технічного об'єкта після впливу на нього небезпечних чинників пожежі і затоплення / О.Ю. Гаршин // Зб. наук. праць СВМІ ім. П.С. Нахімова. — Севастополь, 2001. — Вип. 2. — С. 148–153.
4. Эргономика информационных технологий в примерах и задачах / А.Т. Ашероф [и др.]. — Харьков: ЧП «Видавництво Ліхтар», 2007. — 214 с.

Поступила в редакцию 13.11.2007 г.