

УНИФИЦИРОВАННЫЙ МЕТОД АЛГОРИТМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ГЛАВНЫМИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ УСТАНОВКАМИ ОБЪЕКТОВ МОРСКОЙ ТЕХНИКИ

А.Д. Беляев, Е.А. Бубнов (Санкт-Петербург)

Введение

Главная энергетическая установка (ГЭУ) объекта морской техники (ОМТ) – важнейший функциональный комплекс, обеспечивающий основные тактико-технические показатели ОМТ: боевую эффективность, безопасность, скорость, живучесть, маневренность, скрытность, дальность плавания и др.

Являясь объектом управления (ОУ), ГЭУ функционирует в соответствии с управляющими воздействиями, вырабатываемыми человеком-оператором и управляющей системой (УС). Совокупность ГЭУ и управляющей системы (УС) образует СУ ГЭУ (рис. 1), которая является критически важным функциональным элементом, обеспечивающим успешное выполнение ОМТ поставленных задач в течение установленного времени.

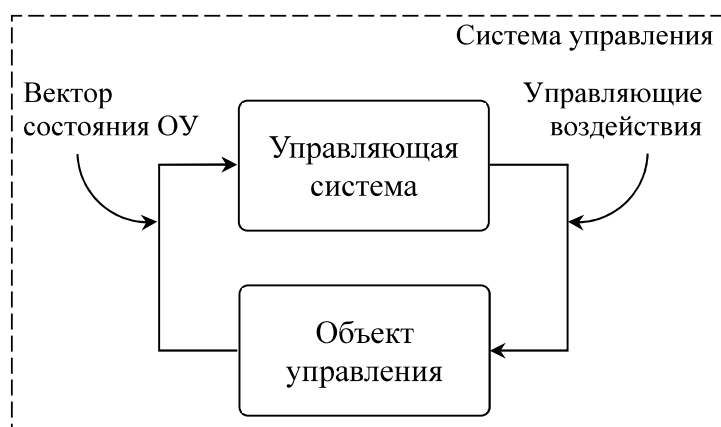


Рис 1. Обобщённая структура системы управления ГЭУ

Развитие управляющих систем и объектов управления происходило параллельно и обусловлено повышением требований к характеристикам ОМТ, совершенствованием компонентной и технологической базы, а также новыми подходами к организации управления. Для обеспечения требуемых свойств управляющих систем разработан научно-методический аппарат проведения проверок на различных стадиях жизненного цикла СУ ГЭУ.

Ретроспектива развития методов проведения испытаний СУ ГЭУ показала, что основным методом проведения испытаний СУ ГЭУ в настоящее время является статический метод, разработанный для испытаний СУ ГЭУ начального поколения. Динамический метод, разработанный для проведения испытаний СУ ГЭУ наиболее современных ОМТ, не имеет обоснованного научно-методического аппарата

Анализ состояния методов испытаний систем управления главными энергетическими установками [1] позволил выявить актуальные проблемы обеспечения необходимого объёма испытаний СУ ГЭУ ОМТ, связанные с:

- увеличением количества требуемых проверок, ввиду возросшего количества управляющих сигналов и контролируемых параметров;

- наличием дополнительных условий формирования управляющих сигналов, обусловленных современными подходами к разработке цифровых управляющих систем, приводящих к ошибкам в переходных режимах функционирования;
- возросшим количеством взаимосвязанных и взаимообусловленных алгоритмов управления, требующих комплексных режимов проверки;
- использованием современных сред разработки функционального программного обеспечения, с возможным возникновением скрытых программных отказов;
- увеличением количества межсистемных информационных связей, требующих проверок на различных режимах взаимодействия.

Указанные проблемы определяют противоречие между экспоненциальным ростом сложности СУ ГЭУ и невозможностью обеспечения требуемого качества комплексной проверки алгоритмов управления с применением существующих методических и инструментальных средств проведения испытаний.

Для повышения качества испытаний современных СУ ГЭУ ОМТ разработан унифицированный метод алгоритмических испытаний (УМАИ).

Назначение и особенности УМАИ СУ ГЭУ ОМТ

Цель УМАИ СУ ГЭУ ОМТ заключается в автоматизированном проведении проверок алгоритмов автоматического управления на этапе их разработки и этапе межведомственных испытаний (МВИ) СУ ГЭУ с использованием единой методики алгоритмических испытаний.

При применении УМАИ СУ ГЭУ ОМТ последовательно решаются следующие задачи:

- 1) формирование графа пространства состояний ГЭУ;
- 2) формирование перечня режимов проверок;
- 3) алгоритмические испытания.

Основой метода является граф пространства состояний ГЭУ и метки перехода между его вершинами, которые позволяют определить оптимальный с точки зрения объема испытаний перечень режимов проверок алгоритмов автоматического управления.

Использование графа переходов в качестве способа представления пространства состояний ГЭУ аналогично методу автоматного программирования [2]. В отличие от метода автоматного программирования в унифицированном методе алгоритмических испытаний в графе пространства состояний вершины соответствуют состояниям ГЭУ (ОУ), а не состояниям автомата. Дуги обозначают переходы между состояниями.

Для проведения испытаний используется единая методика алгоритмических испытаний, основанная на оптимальном перечне режимов проверок, а также контрольные таблицы состояний для автоматизированного контроля.

Преимущество данного подхода обусловлено:

- автоматизацией и за счёт этого исключением субъективной составляющей из процесса испытаний функционального программного обеспечения системы управления;
- исключением пропусков необходимых режимов проверок при планировании и проведении испытаний;
- исключением необоснованных повторных проверок, в том числе в комплементарных режимах;
- оптимизацией последовательности режимов проверки по минимаксному критерию: при минимальном количестве режимов проверок проверяется максимальное количество алгоритмов управления без их повтора и пропусков;
- исключением ошибок в интерпретации результатов проверок.

Основные понятия

1. Алгоритмические испытания системы управления ГЭУ – упорядоченная совокупность режимов проверок алгоритмов автоматического управления техническими средствами (ТС) во всех предусмотренных условиях и состояниях ГЭУ. Алгоритмические испытания проводятся на этапе разработки исходного описания алгоритмов автоматического управления, а также на этапе межведомственных испытаний СУ ГЭУ ОМТ и обеспечиваются единой методикой алгоритмических испытаний.

2. Граф пространства состояний ГЭУ – графическое отображение перечня состояний ГЭУ с обозначением возможных переходов. Направления переходов между состояниями ГЭУ определяются физическими процессами, происходящими в оборудовании во время функционирования, и характеризуются условиями перехода и действиями на переходе, образующими метку перехода.

3. Режим проверки – совокупность действий, обеспечивающая условия выполнение кортежа проверяемых алгоритмов. Режим проверки состоит из описания исходного состояния ГЭУ и последовательности условий по переходу в заданные состояния с целью проверки необходимого объёма алгоритмов автоматического управления. Режимы проверки характеризуются количеством переходов и количеством проверяемых алгоритмов. Количество контролируемых состояний ТС при выполнении проверок неизменно и включает в себя все ТС из состава ГЭУ.

Структура метода

Метод имеет последовательную модульную структуру и включает в себя:

- 1) модуль формирования графа пространства состояний ГЭУ;
- 2) модуль формирования перечня режимов проверок;
- 3) модуль алгоритмических испытаний.

Модуль 1. Формирование графа пространства состояний ГЭУ

Задачами модуля являются:

- разработка графа пространства состояний ГЭУ (рис. 2);
- определение меток переходов между вершинами графа пространства состояний ГЭУ;
- формализацию исходного описания алгоритмов автоматического управления (выражение 6).

Этап 1.1. Определение пространства состояний ГЭУ

На основании общего перечня режимов функционирования определяется пространство состояний ГЭУ.

При определении пространства состояний ГЭУ учитываются:

- нормальные состояния – Rgn;
- особые состояния: предаварийные Rgp и аварийные Rga.

Этап 1.2. Формирование графа пространства состояний

На этапе формирования графа пространства состояний каждый режим функционирования ГЭУ ассоциируется с одним из состояний.

Для формализованного описания режимов функционирования использованы логические функции – маски режимов [3]:

$$Rg_i = [LF_{i1} \wedge LF_{i2} \wedge \dots \wedge LF_{ik_i}] \wedge [A_{i1} \wedge A_{i2} \wedge \dots \wedge A_{ini}] \wedge tm \quad (1)$$
$$| i = 1 \dots m; m, k_i, n_i \in \mathbb{N},$$

где: LF_{iki} – логические функции состояний технических средств и арматуры;

A_{ini} – диапазоны значений технологических параметров;

tm – состояния ТС и арматуры, которые не зависят от режима функционирования и не изменяются в период использования системы по назначению.

В пространстве состояний наименование вершин приведено в соответствии с обозначением режимов ГЭУ по индексу.

На данном этапе для определения меток перехода используется метод рефлексивного управления. Для чего для каждой вершины на основании маски режима определяется вектор состояния вида:

$$Rg = \{x_1, x_2, \dots, x_i\}, |i = 1 \dots n, n| \in \mathbb{N}. \quad (2)$$

Множество управляющих коэффициентов (действий на переходе) K определяется путем суммирования по неравнозначности (по модулю два) аргументов маски нового режима $Rg_{зад}$ и элементов вектора состояния объекта управления Rg_i .

$$Rg_{зад} \oplus Rg. \quad (3)$$

Позиция каждого коэффициента в множестве K соответствует позиции элемента ОУ в маске режима и в векторе состояния, а также является действиями на переходе:

$$K = \{k_1, k_2, \dots, k_i\}, |i = 1 \dots n, n| \in \mathbb{N}. \quad (4)$$

Количество коэффициентов k_i со значением «1» является весом перехода из вершины Rg_i в вершину $Rg_{зад}$.

Также на данном этапе определяются условия перехода – исходные события для выполнения алгоритма.

Этап 1.4. Формирование дерева переходов

На основании весов переходов формируется дерево переходов между вершинами графа пространства состояний с использованием алгоритма Дейкстры [4].

Алгоритм Дейкстры, записанный с использованием математической нотации в виде рекуррентного уравнения, представляется как

$$dk[v] = \min(d(k-1)[v], \min_{u \in Sk-1, (u, v) \in E}(d(k-1)[u] + \omega(u, v))), \quad (5)$$

где $dk[v]$ – расстояние до вершины v после k -й итерации;

$Sk-1$ – множество вершин, для которых уже найдено кратчайшее расстояние после $(k-1)$ -й итерации;

$$d(0)[s] = 0, d(0)[v] = +\infty \text{ для } v \neq s.$$

Результатом применения алгоритма Дейкстры является дерево переходов между вершинами графа пространства состояний вида – $Rg_{П1} \rightarrow Rg_{П2} \rightarrow \dots \rightarrow Rg_i$.

Этап 1.5. Формализация исходного описания алгоритмов автоматического управления

На данном этапе исходное описание алгоритмов автоматического управления формализуется в виде логических функций:

$$LFi = \begin{cases} 1 & | LFi = \dots \wedge Aj = \dots; \\ 0 & | LFi = \dots \wedge Aj = \dots, i = 1 \dots n, j = 1 \dots n, n \in \mathbb{N}, \end{cases} \quad (6)$$

где LFi – обозначение ТС, алгоритм управления которым описывает выражение;

LFj – обозначение ТС, от состояния которого зависит выполнение алгоритма;

Aj – обозначение параметра, от которого зависит выполнение алгоритма;

«1» – вид управляющего воздействия – перевести арматуру из неоткрытого состояния в открытое, запустить техническое средство;

«0» – вид управляющего воздействия – перевести арматуру из незакрытого состояния в закрытое, остановить техническое средство.

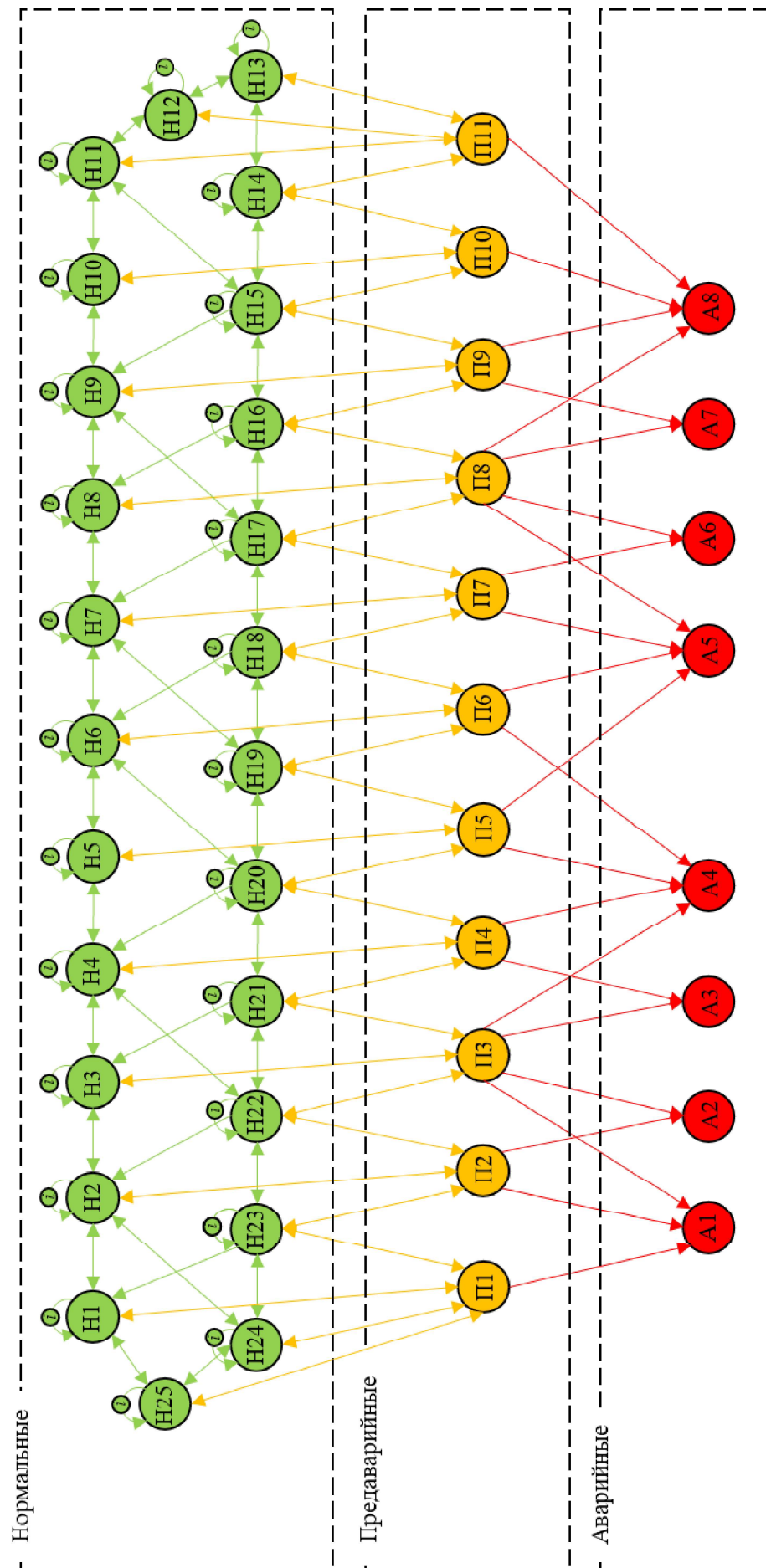


Рис. 2. Граф пространства состояний ГЭУ

Модуль 2. Определение перечня режимов проверок

Задачей модуля является определение перечня режимов проверок на основании полученных меток переходов и формализованного исходного описания алгоритмов автоматического управления.

Этап 2.1. Определение перечня режимов проверок

На данном этапе путем ассоциации меток переходов между вершинами графа функционирования с условиями выполнения алгоритмов формируются режимы проверки алгоритмов и перечень режимов проверок с использованием минимаксного метода (табл. 1).

Таблица 1

Перечень режимов проверок алгоритмов

1 Наименование режима проверки		
$Rg_{H1} \rightarrow Rg_{H2} \rightarrow Rg_i$		
Обозначение перехода	Условия перехода	Проверяемые алгоритмы ТС
1.1 $Rg_{H1} \rightarrow Rg_{H2}$	$LF_j, A_j, \dots$	$LF_i \dots$
1.2 $Rg_{H2} \rightarrow Rg_{Hi}$	$LF_j, A_j, \dots$	$LF_i \dots$

Модуль 3. Алгоритмические испытания

Задачами модуля являются:

- проверка исходного описания алгоритмов управления для последующей разработки функционального программного обеспечения (ФПО);
- проверка ФПО в рамках МВИ СУ ГЭУ ОМТ.

Проверки проводятся с использованием единой методики алгоритмических испытаний, основанной на перечне режимов проверки алгоритмов управления.

Этап 3.1. Проверки исходного описания алгоритмов управления

На данном этапе осуществляется проверка исходного описания алгоритмов автоматического управления в формате программной реализации с использованием компьютерной модели ГЭУ.

Проверка алгоритмов автоматического управления осуществляется путём суммирования по неравнозначности векторов состояний результирующего режима, полученного в результате моделирования, и эталонного режима функционирования ($Rg_{эт} \oplus Rg_{рез}$).

Процесс проверки автоматизирован за счёт применения контрольных таблиц корректности перехода в ПО Microsoft Excel (табл. 2).

Таблица 2

Контрольная таблица проверки корректности перехода

Обозначение ТС	Состояние ТС $Rg_{эт}$	Состояние ТС $Rg_{рез}$	$Rg_{эт} \oplus Rg_{рез}$
LF1	1	1	0
LF2	1	1	0
LF_i	1	0	1

Этап 3.2. Проверки ФПО СУ ГЭУ ОМТ

На данном этапе осуществляется проверка ФПО СУ ГЭУ ОМТ. Проверка проходит в рамках межведомственных испытаний с использованием КМ ГЭУ и виртуального стенда СУ ГЭУ ОМТ. Процесс проверки аналогичен этапу 3.1.

Выводы

Полученные результаты позволили уменьшить противоречие между экспоненциальным ростом сложности СУ ГЭУ и невозможностью обеспечения требуемого качества комплексной проверки алгоритмов управления с применением существующих методических и инструментальных средств проведения испытаний, что обеспечивается:

- математическим аппаратом, позволяющим учесть при проверке все алгоритмы автоматического управления за счёт свойств связности;
- автоматизированным контролем состояний всех ТС при проведении проверок;
- использованием единой компьютерной модели ОУ и методики алгоритмических испытаний.

У предложенного метода имеется недостаток – необходимость разработки компьютерной модели ГЭУ, что является дорогостоящим и длительным процессом. Данный недостаток возможно минимизировать путем разработки базовой компьютерной модели ГЭУ, дорабатываемой для конкретных проектов, с дальнейшей разработкой библиотеки математических моделей.

Рекомендуется продолжить развитие методов проведения испытаний СУ ГЭУ ОМТ в части увеличения уровня автоматизации проверок.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на разработку метода автоматизированной проверки алгоритмов автоматического управления с автоматической выдачей условий переходов в режимах проверок.

Литература

1. **Бубнов Е.А., Беляев А.Д.** Унифицированный метод проверки алгоритмов для проведения цифровых испытаний систем управления // Системы управления и обработки информации: науч.-техн. сб. Вып. 4 (67) / АО «Концерн «НПО «Аврора». СПб., 2024. С. 68-74.
2. **Поликарпова Н.И., Шалыто А.А.** Автоматное программирование. СПб.: Изд-во ИТМО, 2008. 167 с.
3. **Бубнов Е.А.** Основы теории информационной поддержки корабельных операторов технических средств: науч. изд. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2021. 160 с.
4. **Новиков Ф.А.** Дискретная математика: Учебник для вузов. 2-е изд. Стандарт третьего поколения. СПб.: Питер, 2013. 432 с.