

**МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ СИНТЕЗА КОНТРОЛЕПРИГОДНОСТИ  
РАЗМЕЩЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ ОБЪЕКТА  
В КОНСТРУКТИВНЫХ ЕДИНИЦАХ ОГРАНИЧЕННОГО ОБЪЕМА  
ПО МИНИМУМУ ТОЧЕК КОНТРОЛЯ**

**METHODICAL QUESTIONS OF CONTROLLABILITY SYNTHESIS  
IN TERMS OF OBJECT COMPONENTS PLACEMENT  
IN LIMITED VOLUME CONSTRUCTIVE UNITS  
BY CONTROL POINTS MINIMUM**

*В статье рассмотрены два подхода к синтезу контролепригодности размещения компонентов объекта, а также методические и теоретические вопросы решения задач синтеза. Изложены аспекты и составляющие системной контролепригодности. Предложено решение задачи синтеза контролепригодности объекта путем разбиения на подклассы меньшей размерности. Показано, что такое разбиение возможно только на основе выбора дополнительных точек контроля относительно выходных контрольных точек. Установлено, что при анализе схемы судовой электроэнергетической системы (СЭЭС) произвольной конфигурации первоочередной задачей является оценка состояний работоспособности и состояний отказа схемы относительно узла. Предложен формальный способ выделения в сложной многоэлементной схеме СЭЭС одно- и двухэлементных сечений как эффективный прием декомпозиции СЭЭС структурно-функциональной контролепригодности и оценки вероятности отказа системы относительно узла нагрузки и, следовательно, оценки математического ожидания коэффициента относительной потери мощности (КОПМ).*

*In the article there considered two approach of controllability synthesis in terms of the object components placement, also methodical and theoretical questions of synthesis issues solutions. Also in the article you can find aspects and components of system controllability.*

*There is suggested a solution of an object controllability synthesis by breaking into subclasses with a smaller dimensionality. There is shown that the breaking is possible only when it is based on additional control points relative to output control points.*

*There was established that at the free configuration ship electrical power system (SEPS) scheme analysis the main issue is an operability states estimation and a scheme failure (relative to a unit) states estimation. There was suggested formal approach of one or two-elements sections selection in a complicated poly-elements SEPS scheme as an effective technique of SEPS decomposition by a structural-and-functional controllability and the system failure possibility estimation relative to load unit and therefor an estimation of relative power loss factor (RPLF) expectation.*

**Ключевые слова:** судовая электроэнергетическая система, электрооборудование, контролепригодность.

**Key words:** ship electrical power system, electrical equipment, controllability.



**ОСТАНОВКА** задачи синтеза контролепригодности (КП) [1] – [3] размещения компонентов объекта в конструктивных блоках по минимуму точек контроля может быть осуществлена при наличии двух подходов: при жестком закреплении компонентов объекта за конструктивными единицами и без такого жесткого закрепления. Методические и теоретические

вопросы решения задачи без жесткого закрепления компонентов объекта за конструктивными единицами рассматриваются исходя из предпосылки существования определенного числа  $m$  конструктивных единиц объекта контроля, которым соответствуют совокупности определенных вершин граф-модели  $G(V, U)$ , образующие его подграфы, а рассматриваемую задачу можно сформулировать как задачу разбиения граф-модели  $G(V, U)$  на подграфы [2]  $G_1(V_1, U_1), \dots, G_i(V_i, U_i), \dots, G_m(V_m, U_m)$ .

Задача поиска такого разбиения графа  $Q(V, U)$  на подграфы состоит в удовлетворении ограничений по объему и минимизации точек контроля для поиска дефектов с точностью до выделенной конструктивной единицы. Для простоты рассуждений будем полагать, что ограничения по «весу» для всех конструктивных единиц одинаковы, а в объекте контроля возможны только одиночные дефекты, что в большинстве случаев подтверждается практикой эксплуатации судового электрооборудования [4]. Если принять в качестве первоначального множества контрольных точек « $U$ » только выходные вершины графа  $Q(V, U)$  и при этом допущении построить матрицу проверок, то с ее помощью известными методами можно выделить классы эквивалентности одиночных дефектов, анализируя которые можно обнаружить, что часть из них могут рассматриваться как конструктивные элементы объекта контроля, а оставшиеся классы второго типа необходимо разбить на подклассы меньшей размерности. Это разбиение возможно только на основе выбора дополнительных точек контроля относительно выходных контрольных точек. Дополнительные точки контроля необходимо выбрать так, чтобы они, с одной стороны, разбивали наибольшее число классов второго типа, а с другой стороны, чтобы новые подграфы удовлетворяли ограничению на «вес» подграфа. Для решения такой задачи наиболее удобно каждый класс второго типа разбить на двухэлементные множества построением всех возможных сочетаний по два из элементов каждого класса [5]. Затем для каждого полученного двухэлементного множества определяются нарушающие множества.

Процедура разбивает все классы второго типа на классы меньшей размерности, анализ которых по ограничению на «вес» вновь выявляет допустимые по «весу» подграфы. Если снова обнаруживаются среди очередного множества разбиений недопустимые по «весу» подграфы, то процедура дальнейшей декомпозиции продолжается для оставшегося неудовлетворительного по «весу» множества подграфов до тех пор, пока не будут получены все допустимые разбиения. Если при этом останутся вершины, которые не вошли ни в один подграф, то их можно включить либо в подграфы, у которых есть допустимый «запас веса», либо сформировать из них в произвольном порядке один или несколько (с учетом ограничения) произвольных подграфов, завершающих процесс разбиения исходных подграфов.

Следует иметь в виду, что на очередном шаге разбиения подграфов может оказаться, что ни один из вновь полученных подграфов не удовлетворяет «весовому» ограничению. Тогда в процедуру разбиений на подграфы включается следующее правило: *среди всех покрытий очередного шага выбирается такое, при котором обнаруживается наименьшее число неудовлетворительных разбиений*. Повторение процедуры при новом правиле, как показал опыт [6], обеспечивает однозначное завершение декомпозиции матрицы  $R$ .

Рассмотренные положения синтеза КП определяют конструктивно-технологический аспект рационального поиска совокупности конструктивных единиц при жестком или произвольном размещении в них отдельных компонентов объекта контроля при минимальном множестве точек контроля, обеспечивающих различимость дефекта с точностью до образованных конструктивных блоков. Однако при проектировании контролепригодных объектов часто возникает ситуация, когда особенности назначения или особенности конструктивного характера вынуждают в качестве исходного рассматривать только внешние выходы как заданное число точек контроля « $U$ ». Тогда возникает задача размещения компонентов объекта в выбранных конструктивных единицах таким образом, чтобы имеющееся число контрольных точек « $U$ » могло обеспечить различимость дефектов при их произвольной кратности [7].

Если по множеству контрольных точек « $U$ » построить матрицу проверок  $B$ , в которой обнаруживаются множества совпадающих между собой столбцов, характеризующих классы эквива-

лентности одиночных дефектов, и оставить из каждого класса по одному представителю, а столбцы, соответствующие остальным элементам каждого класса, вычеркнуть, то получим усеченную по числу столбцов относительно  $B$  матрицу проверок  $B$ . Если выделить из всех строк матрицы  $B$  строку с минимальным числом ненулевых элементов и анализируя ее, затем исключить из матрицы  $B$  столбцы, содержащие в выделенной строке ненулевые элементы, то можно сформировать множество  $I$  номеров вычеркнутых столбцов. Если обнаруживается при реализации этой процедуры усечения матрицы  $B$  несколько одинаковых строк, то в качестве первой может быть взята любая из них. В оставшейся усеченной матрице вновь отыскивается строка с минимальным числом ненулевых элементов, и процедура выделения нового множества столбцов по выделенной строке повторяется. Процесс продолжается до тех пор, пока не будут исключены все столбцы матрицы  $B$ , и получены множества  $I$ . Суть процесса декомпозиции на отдельные подматрицы состоит в поиске однозначных функциональных связей различной длины по составу компонентов объекта контроля [8]. Если из элементов классов полученных подклассов образовать подграфы, то процедуру образования соответствующих им конструктивных единиц можно полагать завершенной.

Использование полученной структуры объекта контроля при исходном заданном множестве точек контроля для поиска дефектов с точностью выделенных конструктивных блоков основывается на следующих предпосылках. Проведение декомпозиции по матрице проверок  $B$  с контролем работоспособности и формированием дополнительного к  $B$  столбца, содержащего «0» и «1» в зависимости от результатов проверок, с последующим отысканием строк, соответствующих положительным результатам проверки (отсутствию дефектов), т.е. содержащих в дополнительном столбце единицу, и вычеркиванием их из матрицы  $B$ , а затем вычеркиванием столбцов, содержащих в вычеркнутой строке единицу, т.е. удалением из матрицы элементов, не входящих в множество компонентов объектов контроля, имеющих отношение к возникновению дефекта, позволяет во вновь полученной матрице  $B$  оставить только те элементы, которые так или иначе связаны с существованием дефекта. Поскольку задача состоит в отыскании дефекта в пределах одного конструктивного элемента, в матрице  $B$  необходимо отыскать такую строку, ненулевые элементы которой принадлежат только одному конструктивному блоку. Следовательно, эта конструктивная единица и содержит искомый дефект. После замены неисправного блока и проведения новой проверки вновь получается дополнительный столбец с результатами проверки. Повторный анализ матрицы проверок по данным вновь полученного дополнительного столбца позволит обнаружить очередной дефектный конструктивный блок. Процедура продолжается до тех пор, пока все дефектные конструктивные блоки не будут полностью обнаружены. Поиск завершается единичным вектором-столбцом результатов очередной проверки.

Синтез контролепригодности электрооборудования, электросхем систем управления, защиты и сигнализации СЭЭС при размещении компонентов объекта в конструктивных единицах по минимуму стоимости поиска дефектов рассматривается также как задача декомпозиции графамодели объекта контроля и его подграфов, при которой, с одной стороны, удовлетворяются «весовые» (по объему) ограничения, а с другой – обеспечивается поиск одиночных и кратных дефектов при совокупности проверок минимальной стоимости.

Процедура декомпозиции матрицы  $B$  остается такой же, как и ранее рассмотренная [2], когда по матрице  $B$  определяются все классы эквивалентности одиночных дефектов с разбиением их на два класса, первый из которых удовлетворяет ограничениям на «вес» конструктивных единиц, а второй не удовлетворяет. Очевидно, что выбор дополнительных точек контроля связан с анализом второго класса эквивалентности одиночных дефектов. Для этого каждый из классов второго типа разбивается на двухэлементные множества путем построения всех возможных сочетаний по два из элементов каждого класса. Затем уже для каждого из вновь образованных двухэлементных множеств определяются нарушающие множества. При этом нахождение минимального покрытия системы множеств сводится к минимальному покрытию матрицы из «0» и «1». Если раньше в качестве оценки эффективности покрытия использовалось количество столбцов матрицы  $R$ , вошедших в покрытие, то при новой постановке задачи целесообразно отыскивать те покрытия, которые приводят к минимальной

стоимости матрицы **R**. Однако при таком критерии оценки эффективности покрытия матриц второго класса могут возникать ситуации, когда на очередном шаге процедуры обнаруживается хотя бы один класс, не удовлетворяющий ограничению по весу и поэтому требующий дальнейшего разбиения, а также в процессе декомпозиции графа-модели на классы и подграфы возникает вариантность из-за наличия одинаковых столбцов или строк в матрице проверок **B**. В этой связи выбор очередного варианта из совокупности одинаковых по «весу» нужно выбирать по минимуму стоимости порожденных ими проверок [9]. При разбиении с учетом поиска кратных дефектов выбор точек контроля осуществляется таким образом, чтобы порождаемые ими проверки имели минимальную стоимость.

Процедуры и алгоритмы разбиения множества компонентов объекта контроля на конструктивные единицы на определенных стадиях их реализации, связанных с выбором дополнительных точек контроля, могут быть увязаны с поиском минимума стоимости не только в связи с реализацией порождаемых ими проверок, но и с внедрением дополнительных точек контроля.

Поскольку уровень КП системы в целом определяется эффективностью проверки правильности функционирования, оценки работоспособности и поиска обнаруженных при контроле дефектов, при оценке эффективности функционирования следует различать два аспекта: вещественно-энергетический и структурно-функциональный. Первый аспект обусловлен балансом генерируемой и потребляемой электроэнергии, второй – неизменностью структуры и ее реакций на внешние дестабилизирующие воздействия. Для современных централизованных, концентрированных, с высоким уровнем автоматизации управления процессами генерирования и распределения электроэнергии СЭЭС второй аспект является определяющим.

Совершенствование систем автоматического контроля и управления СЭЭС имеет непосредственное отношение к оценке состояний работоспособности и состояний отказа узлов генерирования и потребления электроэнергии при известных состояниях путей передачи электроэнергии. Очевидно, если путь между узлом генерирования и узлом нагрузки включает в себя двухэлементные сечения, то можно полагать, что уровень надежности функционирования, а значит и уровень системной КП СЭЭС будет выше, чем при наличии в пути одноэлементных сечений.

Полагая, что одной из основных причин снижения эффективности функционирования СЭЭС является недостаточный уровень ее КП, не обеспечивший прогноз структурных и режимных нарушений, связанных с ее статической и динамической устойчивостью, можно принять, что в качестве наиболее целесообразного показателя, отражающего влияние КП, следует рассматривать отношение фактически генерируемой и передаваемой электроэнергии к потенциально-достижимой в качестве коэффициента относительной потери мощности (КОПМ).

Количественная оценка КОПМ при стохастически меняющейся структуре СЭЭС может быть достигнута при вероятностном подходе к анализу не только состояний структуры системы, но и характеристик функционирования СЭЭС с помощью интегральных вероятностных характеристик различных режимов ее функционирования.

В общем случае можно выделить два аспекта исследования системной КП:

- аспект КП, обусловленный анализом структуры СЭЭС, взаимосвязей элементов и их пропускных возможностей;
- аспект КП, определяемый анализом ограничений режимов функционирования при известных структурах системы.

С учетом этого можно выделить следующие составляющие системной КП СЭЭС (с достаточной степенью условности):

- структурно-функциональную КП СЭЭС;
- режимно-функциональную КП СЭЭС.

Оценка уровня структурно-функциональной КП наиболее актуальна и имеет большие логические основания для проектных постановок задач. В частности, при эксплуатации СЭЭС с режимной избыточностью доминирующее значение приобретает оценка режимно-функциональной КП СЭЭС. Установлено, что при анализе схемы СЭЭС произвольной конфигурации первоочередной задачей является оценка состояний работоспособности и состояний отказа схемы относительно узла.



Формальный способ выделения в сложной многоэлементной схеме СЭЭС одно- и двухэлементных сечений можно рассматривать как эффективный прием декомпозиции СЭЭС по структурно-функциональной контролепригодности и оценки вероятности отказа системы относительно узла нагрузки и, следовательно, оценки математического ожидания КОПМ. Для характеристики режимно-функциональной КП СЭЭС помимо рассмотренного ранее показателя, целесообразно ввести в качестве дополнительного показателя условную вероятность того, что в системе не произойдет каскадного развития аварии при условии возникновения первичного возмущения.

Методические аспекты исследования режимно-функциональной КП СЭЭС основаны на необходимости оценки КОПМ как суммы дефицита электропотребления по всем состояниям системы, вероятностная схема которой задается как детерминированно (при небольшой размерности), так и стохастически (при большой размерности). В последнем случае обобщенные параметры и режимы электропотребления задаются системой случайных величин. Установлено, что в основе применения вероятностных моделей СЭЭС, практически доступных для анализа режимно-функциональной КП, лежит оценка законов распределения параметров режимов СЭЭС, однако их определение по законам распределения нагрузки для сложных СЭЭС на современном этапе представляет практически неразрешимую задачу. Наиболее целесообразно использовать интегральные вероятностные характеристики режимов и по ним определять параметры законов распределения, вид которых устанавливается по результатам анализа физического существа задачи [10]. Такая оценка интегральных вероятностных характеристик для проведения эффективных практических расчетов с использованием систем случайных величин при моделировании режимов СЭЭС представляет собой сложную научно-техническую задачу и требует отдельного рассмотрения и анализа.

### Список литературы

1. Каракаев А. Б. Сущность понятия коммутационной контролепригодности сетей электрооборудования судов / А. Б. Каракаев, А. В. Луканин // Эксплуатация морского транспорта. – 2012. – № 1 (67). – С. 58–60.
2. Каракаев А. Б. Основные методические вопросы анализа и синтеза контролепригодности систем сложной конструктивно-технической и организационной структуры на примере СЭЭС и ее элементов / А. Б. Каракаев, А. В. Луканин // Эксплуатация морского транспорта. – 2013. – № 2 (72). – С. 63–67.
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. – 2013. – № 3 (22). – С. 54–58.
4. Айзерман М. А. Выбор вариантов: основы теории / М. А. Айзерман, Ф. Т. Алескеров. – М.: Наука, 1990. – 240 с.
5. Барлоу Р. Статистическая теория надежности и испытания на безотказность. / Р. Барлоу, Ф. Прошан; пер. с англ. – М.: Наука, 1984.
6. Афонасьев В. Г. Комплекс программ для анализа надежности сложных систем / В. Г. Афонасьев, О. В. Талов, Н. С. Филатов // Моделирование и контроль качества в задачах обеспечения надежности. РЭУ: сб. тр. межд. НТС-Шауляй, 1992. – С. 24–26.
7. Герубах И. Б. Модели отказов: монография / И. Б. Герубах, Х. Б. Кордонский. – М.: Сов. Радио, 1966. – 165 с.
8. Михалевич В. С. Вычислительные методы исследования и проектирования сложных систем / В. С. Михалевич, В. Л. Волкович. – М.: Наука, 1982.
9. Абрамов Д. В. Обеспечение надежности технических объектов / Д. В. Абрамов // Надежность и контроль качества. – 1987. – № 4. – С 4–8.
10. Ковалев А. П. Формирование требований к надежности и системам эксплуатации распределенных технических комплексов: монография / А. П. Ковалев. – СПб.: Оракул, 1999. – 104 с.