

ЭФФЕКТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГИБРИДНОЙ СИСТЕМОЙ ГЕНЕРАЦИИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРИ ДВИЖЕНИИ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА¹

Л.А. Мартынова, Н.К. Киселев, Г.Г. Безрук

Аннотация. Отмечено, что для движения автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА) применяются различные исполнительные устройства, отличающиеся не только принципом действия, но и током потребления, меняющимся во времени. Поэтому необходимы различные по принципу действия источники питания, и управление движением АНПА порождает необходимость решения задачи эффективного управления системой генерации и распределения энергии, под которым понимается определение необходимого состава и параметров источников питания, а также распределения потребителей по шинам в условиях жесткого ограничения по времени. Цель работы — разработка эффективного управления системой генерации и распределением энергии АНПА для обеспечения его движения с заданными параметрами. В результате анализа подключения/отключения потребителей выявлено, что все ситуации можно свести к двум типам управления: первый — когда заранее неизвестно, какой из потребителей будет подключен и какой ток он будет потреблять; второй — когда известен состав потребителей и объем потребляемого ими тока. Для определения управления переключениями потребителей задача формализована как задача об упаковке в контейнеры, для решения которой существуют эвристические алгоритмы. Анализ существующих алгоритмов применительно к решаемой задаче позволил определить, что алгоритмы Best Fit и Best Fit Decreasing обеспечивают эффективное управление системой генерации и распределения электроэнергии. Приведен пример управления гибридной системой генерации и распределения электроэнергии при изменении параметров движения аппарата.

Ключевые слова: автономный необитаемый подводный аппарат, гибридная система генерации и распределения электроэнергии, эвристический алгоритм.

ВВЕДЕНИЕ

Совершенствование технологий создания автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) привело к возможности разработки многоскоростного АНПА для преодоления значительных расстояний в несколько сотен километров [1]. Поступательное движение АНПА происходит благодаря тяге, создаваемой маршевым движителем, а

маневрирование АНПА — благодаря применению исполнительных устройств. Для движения АНПА заданными курсом и скоростью на заданной глубине в системе управления АНПА определяются исполнительные устройства (маршевый движитель, рули, подруливающие устройства), способные обеспечить движение АНПА с требуемыми параметрами. Определение исполнительных устройств зависит от скорости движения АНПА, так как из-за повышенной плотности морской среды на низких скоростях движения для маневрирования чаще применяются подруливающие устройства и уравнильно-дифференциальная система, а при

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (проект № 20-08-00130).

повышенных скоростях — кормовые и носовые рули.

Перечисленные исполнительные устройства отличаются не только принципом действия, но и током потребления, меняющимся во времени. Из-за различного потребления тока необходимы различные по принципу действия источники питания, поскольку одним источником питания обеспечить движение АНПА во всем диапазоне скоростей невозможно. Так, аккумуляторная батарея (АБ) способна вырабатывать высокие токи и тем самым обеспечивать движение АНПА на высокой скорости, но в течение существенно ограниченного времени, другой источник — электрохимический генератор (ЭХГ), использующий реагенты из хранилища, вырабатывает пониженный ток, в результате чего обеспечивает движение АНПА лишь на малой скорости, но зато в течение достаточно длительного времени. Аналогичная ситуация происходит и с потреблением тока при маневрировании АНПА: подруливающие устройства потребляют существенно больше тока, чем рули. Обеспечение током всех подсистем АНПА, включая также навигационную систему для контроля положения АНПА на маршрутной траектории и систему освещения обстановки для обеспечения безопасности плавания, выполняет гибридная система генерации и распределения электроэнергии (СГРЭ), в функции которой входит генерация энергии и распределение ее по токопроводящим шинам (далее по тексту — шинам). В результате оказывается, что управление исполнительными устройствами для движения АНПА тесно взаимосвязано с управлением гибридной СГРЭ.

В гибридной СГРЭ применяются два типа источников питания: АБ и ЭХГ [2]. Источники питания питают шины, к которым подключены потребители. Управление СГРЭ заключается в выборе источников питания для генерации электроэнергии, распределения ее по шинам и распределении подключения потребителей к этим шинам.

Особенность подключения потребителей к шине состоит в том, что если на шине потребителей больше, чем допускает ее номинальный ток, то возникают помехи, оказывающие влияние на работу навигационной системы и системы управления АНПА, что недопустимо. Формирование на шине повышенного номинального тока, что называется, «с запасом», приводит к повышению массогабаритов шины, повышению мощности источника питания, что, в свою очередь, приводит к неоправданному перерасходу электроэнергии. Увеличение числа шин приводит к возникновению неиспользуемых свободных ресурсов каждой шины, что также экономически неоправданно. Поэтому управление СГРЭ необходимо организовать таким образом, чтобы:

- все потребители получили требуемый ток;
- потребляемые токи не превышали номинальные токи шин;
- число задействованных источников тока, питающих шины, было минимальным.

Если бы состав потребителей и потребляемые ими токи были постоянными или их изменение было бы заранее известно, то задачу определения необходимых источников питания и распределения потребителей по шинам достаточно было бы решить один раз перед началом выполнения АНПА маршрутного задания.

Однако в процессе выполнения маршрутного задания состав потребителей и потребляемый ими ток меняются с течением времени. Так, может оказаться, что работающие исполнительные устройства не обеспечивают движение АНПА с заданными параметрами, в связи с чем может потребоваться подключение дополнительных исполнительных устройств. Это приведет к изменению состава потребителей. Кроме того, при смене параметров движения или скоростного режима АНПА также может измениться состав исполнительных устройств. В этом и заключается специфика АНПА — для различных режимов движения необходимо применять различные исполнительные устройства, отличающиеся принципом действия и токопотреблением.

В связи с этим складывается ситуация, при которой управление движением АНПА порождает необходимость решения задачи эффективного управления СГРЭ, под которым понимается определение необходимого состава и параметров источников питания, а также распределения потребителей по шинам. Время на выработку решения по управлению — доли секунд, практически мгновенно, как только поступила команда на изменение параметров движения АНПА или как только система диагностики выявила на одной из шин превышение потребляемым током ее номинального значения.

Ввиду новизны разработки многоскоростного АНПА и применения гибридной СГРЭ ранее в такой постановке задача не рассматривалась. Применение гибридной СГРЭ на обитаемом подводном объекте [3] предусматривает управление со стороны обслуживающего персонала. При управлении движением автономного необитаемого подводного аппарата выработка параметров исполнительных устройств происходила без учета их энергопотребления, полагая, что энергоресурса на борту аппарата достаточно. Ранее практически все разрабатываемые АНПА предусматривали движение в режиме экономичного хода — до 4 узлов. Высокоскоростные автономные подводные аппараты одноразового применения также, несмотря на движение в двух режимах — поисковом и маршевом —

применяли одни и те же исполнительные устройства и источник электроэнергии — АБ, поскольку время жизни таких аппаратов исчислялось минутами. В отечественной и зарубежной литературе публикации по разработке многоскоростного АНПА практически отсутствуют из-за новизны задачи и новизны технического решения, связанного с применением гибридной СГРЭ на борту АНПА. В зарубежных источниках, например, [4, 5], уделено достаточно внимания особенностям применения гибридных СЭО на борту АНПА, однако в них не раскрываются детали принятых технических и алгоритмических решений.

В связи с этим для управления движением многоскоростного АНПА необходимо решить задачу эффективного управления гибридной СГРЭ.

Цель работы — разработка эффективного управления системой генерации и распределение энергии АНПА для обеспечения его движения с заданными параметрами.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть АНПА в момент времени t движется с установленными параметрами — курсом, скоростью и глубиной. Задействованы источники питания, которые подключены к шинам, и к этим же шинам подключены исполнительные устройства для обеспечения жизнедеятельности АНПА и его движения, например, в режиме экономичного хода. Каждый потребитель характеризуется током потребления, который в общем случае меняется с течением времени. Полагаем, что диапазоны изменения известны.

Пусть состояние гибридной СГРЭ характеризуется составом источников тока, номинальными токами шин и распределением потребителей по шинам.

Пусть распределение потребителей по шинам в момент времени t оптимально.

В процессе движения АНПА изменение состояния гибридной СГРЭ возможно по трем причинам. Одна из них связана с увеличением потребляемого тока с течением времени у одного из потребителей, например, у маршевого движителя на разгонном участке траектории, в результате чего происходит увеличение общего потребляемого тока, что может привести к превышению номинального тока шины, к которой подключен маршевый движитель. В этом случае необходимо переключение потребителей между шинами так, чтобы исключить превышение номинального тока. Возникает задача определения плана переключения потребителей между шинами.

Другая причина связана с подключением дополнительных исполнительных устройств, напри-

мер, из-за попадания АНПА в подводное течение, в результате чего для удифференцирования АНПА необходимо дополнительное изменение параметров уравнильно-дифференциальной системы. В этом случае в дополнение к работающим исполнительным устройствам добавляется еще один дополнительный потребитель — в данном случае уравнильно-дифференциальная система. Возникает задача выбора шины для подключения этой системы. Если подключать ее к имеющимся шинам, на которых отсутствует свободный ресурс, возникает превышение номинального тока. Запускать для подключения новую шину — экономически затратно, тем более что превышение номинального тока может быть временным. В этом случае также возникает задача определения плана переключения потребителей между шинами так, чтобы исключить превышение номинального тока данной шины.

Наконец, третья причина связана с поступлением команды на изменение параметров движения АНПА для перехода, например, в высокоскоростной режим. Это приведет к изменению состава исполнительных устройств, обеспечивающих движение АНПА с заданными параметрами, и, следовательно, к изменению токопотребления. Причем потребление этими новыми устройствами с течением времени может меняться. Возникает задача определения состава источников тока и плана переключения потребителей между шинами так, чтобы: все потребители были обеспечены током, исключить превышение номинального тока данной шины и число задействованных источников тока было минимальным.

В результате появления перечисленных причин может оказаться, что в момент времени $t + 1$ необходимо либо дополнительно подключать к имеющимся шинам потребителей, либо полностью пересмотреть состояние гибридной СГРЭ — состав источников электропитания, шины и распределение потребителей по шинам.

И в том, и в другом случае возникает необходимость решения двух задач: одна из них — определение оптимального подключения на момент $t + 1$; другая — перевод гибридной СГРЭ из состояния на момент времени t в состояние на момент времени $t + 1$.

При решении задачи определения оптимального подключения на момент $t + 1$ очевидно, что наиболее эффективное подключение будет наблюдаться тогда, когда потребляемые токи на каждой шине будут в точности совпадать с номинальными токами. Очевидно, что из-за переменного состава потребителей и потребляемого ими тока такое равновесное состояние невозможно. Поэтому будем считать подключение оптимальным, если при распределении потребителей по шинам разность сум-

марного номинального тока по шинам и суммарного тока потребления минимальна:

$$\Delta_t = \sum_{i=1}^{B_t} V_i - \sum_{j=1}^{m_t} I_j \rightarrow \min \quad \forall t \in [0, T], \quad (1)$$

где V_i — номинальный ток i -й шины; I_j — ток потребления j -м потребителем; B_t — число задействованных в момент t шин; m_t — число потребителей, подключенных к шинам в момент времени t ; T — длительность выполнения маршрутного задания.

Минимизация разности (1) при условии обеспечения всех потребителей током достигается путем минимизации суммарного номинального тока шин. Суммарный номинальный ток шин определяется числом шин, подсоединенным к источникам тока. Поэтому необходимо так организовать подключение потребителей к шинам, чтобы число шин было минимальным.

При решении второй задачи — управления гибридной СГРЭ — разделим всех потребителей условно на два множества — множество постоянных потребителей и множество переменных потребителей. Постоянными потребителями назовем устройства, приборы и механизмы, без которых движение АНПА невозможно и удельное потребление тока которых с течением времени не меняется, например, система управления, вычислительные модули и др.; переменными назовем потребителей, которые периодически включаются/выключаются: носовые рули, уравнительно-дифференциальная система и др.

Пусть модель подключений потребителей к шинам имеет вид:

$$\dot{x} = Ax + Bu.$$

Состояния подключений всех потребителей к шинам запишем в виде матрицы вида:

$$A = [A_c \ A_v],$$

где A_c — матрица постоянных потребителей размерности $j \times j_c$, $0 < j_c < j$; A_v — матрица переменных потребителей размерности $j \times (j - j_c)$.

$$A_c = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1j_c} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2j_c} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{j1} & a_{j2} & \dots & a_{jj_c} \end{bmatrix}, \quad A_v = \begin{bmatrix} a_{1j_c+1} & a_{1j_c+2} & \dots & a_{1j} \\ a_{2j_c+1} & a_{2j_c+2} & \dots & a_{2j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{jj_c+1} & a_{jj_c+2} & \dots & a_{jj} \end{bmatrix}.$$

Строки матрицы A содержат значения токов всех постоянных потребителей. Значения токов переменных потребителей равны нулю. Матрица B по структуре полностью совпадает с матрицей A ,

однако значения элементов матрицы B отличаются: на местах постоянных потребителей стоят нули, а на местах переменных потребителей — значения потребляемых ими токов.

Обозначим элементы матриц A и B через a_{ij} , $i = 1, \dots, n$; $j = 1, \dots, n$; i — номер шины, j — номер потребителя, подключенного к i -й шине, n — число потребителей, характеризующихся током потребления.

Состояние x_t характеризуется оптимальным подключением потребителей к шинам в момент времени t , при котором целое число шин B_t минимально, и разбиение множества $\{1, \dots, n\}$ на B_t подмножеств $S_1 \cup \dots \cup S_{B_t}$ такое, что $\sum a_{ij} \leq V_k$, $k = 1, \dots, K$. Индекс k обозначает различные типы источников тока, характеризующиеся ограничениями по току, K — число типов источников тока. Оптимальность подключения в формализованном виде выразим таким образом:

состояние x_t в момент времени t таково, что:

$$B_t = \sum_{i=1}^n y_i \rightarrow \min \quad (2)$$

при ограничениях

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_{ij} \leq V_k y_i, \\ i \in \{1, \dots, n\}, \quad j \in \{1, \dots, n\}, \quad k \in \{1, \dots, K\},$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1, \quad j \in \{1, \dots, n\},$$

$$y_i \in \{0; 1\}, \quad i \in \{1, \dots, n\},$$

$$x_{ij} \in \{0; 1\}, \quad i \in \{1, \dots, n\}, \quad j \in \{1, \dots, n\},$$

где $y_i = 1$, если потребитель подключен к i -й шине, $y_i = 0$ — если не подключен; $x_{ij} = 1$, если потребитель j подключен к шине i и $x_{ij} = 0$, если не подключен.

Пусть в момент времени $t + 1$ часть потребителей больше не нуждается в электропитании, а другая часть, наоборот, требует подключения к шинам. Обозначим оптимальное состояние подключения потребителей к шинам в момент времени $t + 1$ через x_{t+1} .

Необходимо найти эффективное управление u_t , переводящее подключения потребителей тока из одного оптимального состояния x_t в другое оптимальное состояние x_{t+1} . Иными словами, необходимо определить такое u_t , при котором B_{t+1} было бы минимальным $\forall t \in [0, T]$. Минимальное значение B_t далее будем обозначать opt [6].

Таким образом, для нахождения эффективного управления гибридной СГРЭ необходимо определить:

- оптимальное распределение потребителей между шинами в момент времени $t + 1$;
- эффективное управление гибридной СГРЭ, переводящей ее из оптимального состояния в момент времени t — в оптимальное состояние на момент времени $t + 1$.

2. ПРЕДЛАГАЕМОЕ РЕШЕНИЕ

Анализ причин возникновения необходимости управления гибридной СГРЭ показал:

- при увеличении потребления одним из уже подключенных к шине потребителей возможно два исхода: первый — имеющаяся шина допускает увеличение тока потребления и второй — увеличение тока потребления приводит к превышению номинального тока данной шины;
- при включении/выключении дополнительных потребителей возможны также два исхода: первый — подключение к произвольной шине, допускающей такое подключение, и второй — отсутствие свободного ресурса среди задействованных шин, который позволил бы подключить дополнительного потребителя без превышения номинального тока. В этом случае необходимо либо запускать новую шину и переключать потребителя к ней, либо провести полное переключение имеющихся потребителей с целью высвобождения свободного ресурса для подключения нового потребителя. Выбор подключения при этом зависит от дальнейшего развития событий. Если новый потребитель имеет постоянное потребление, например, перекачка руля, то перераспределение потребителей по шинам оправдано. Если же потребление переменное, например, подруливающим устройством с переменной скоростью вращения винтов, то уже с учетом этого — рассмотреть возможные варианты решения, исходя из предельного потребления тока этим исполнительным устройством;
- при полном изменении подключений всех потребителей к шинам необходим полный пересмотр состояния гибридной СГРЭ в части используемых источников питания и подключений потребителей к шинам.

Таким образом, по результатам анализа причин и последствий выявлено, что все рассмотренные ситуации можно свести к двум типам управления: первый — при котором заранее неизвестно, какой из потребителей будет подключен и какой ток он будет потреблять; второй — при котором известен состав потребителей и объем потребляемого ими тока, например, при смене скоростного режима движения АНПА.

Рассмотрим существующие в настоящее время подходы к решению задач, подобных описанным.

По своей сути рассматриваемая задача эффективного подключения потребителей к шинам близка к «задаче об упаковке элементов в контейнеры» [6], которая заключается в необходимости размещения элементов по контейнерам так, чтобы совокупный объем элементов в каждом контейнере не превышал его объем, а число заполненных контейнеров оказалось минимальным. В данном случае контейнерами служат шины, а элементами — потребители. Задача часто встречается в прикладных областях, например, в задаче планирования в системах связи [7] и при оптимизации загрузки транспортного средства [8]. Такая задача является NP-трудной комбинаторной задачей [8, 9]. Для решения задачи упаковки в контейнеры имеется большое число разнообразных решений, одно из которых — метод простого перебора [10, с. 39—42]. Такой подход целесообразен при небольшом числе элементов — в пределах десятка. С увеличением же числа элементов возрастает число перебираемых вариантов, и решение уже не укладывается в разумное время. В рассматриваемой задаче число одних только исполнительных устройств, вычислительных модулей и других потребителей, обеспечивающих движение АНПА — свыше полусотни. Поэтому метод перебора для решения рассматриваемой задачи неприемлем.

Поскольку принятие решения о распределении потребителей по шинам должно приниматься в реальном масштабе времени и практически мгновенно, то альтернативой методу простого перебора служат эвристические алгоритмы. Все существующие эвристические алгоритмы решения задачи об упаковке в контейнеры основаны на жадном алгоритме, в котором на каждом шаге делается локально наилучший выбор в предположении, что итоговое решение будет оптимальным.

Для двух вариантов ситуации с управлением необходимо выбрать наиболее подходящие алгоритмы: первый — при внезапном добавлении нового потребителя или его переключении на другую шину и второй — в случае планового изменения состава потребителей.

Для выбора наиболее подходящего решения из имеющихся рассмотрим подробнее особенности имеющихся эвристических алгоритмов.

3. ОПТИМАЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИ НЕИЗВЕСТНЫХ ПАРАМЕТРАХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

В этом случае заранее множество используемых исполнительных устройств, являющихся элементами, неизвестно, и необходимость подключения исполнительных устройств наступает последова-



тельно. Для таких условий наиболее известными являются алгоритмы [7, 10, с. 30, 11]:

- следующий подходящий Next Fit (NF);
- первый подходящий First Fit (FF);
- лучший подходящий Best Fit (BF).

В соответствии с алгоритмом «следующий подходящий (NF)» элемент назначается в текущий выбранный контейнер, если имеется достаточно емкости, в противном случае — к следующему контейнеру. Для рассматриваемой задачи это означает, что новый потребитель подключается к текущей шине при отсутствии превышения номинального тока, в противном случае — к анализу возможности подключения к следующей по порядку шине и анализ возникновения превышения номинального тока. Так продолжается до тех пор, пока не будет найдена шина, к которой возможно подключение без превышения номинального тока.

В соответствии с алгоритмом «первый подходящий (FF)» для каждого элемента контейнеры рассматриваются в порядке поступления (без сортировки) и выбирается первый контейнер с достаточным количеством свободного ресурса. Переходя к потребителям, это означает, что новый потребитель подключается к первой по порядку шине при отсутствии превышения номинального тока, в противном случае — к анализу следующей по порядку шины и анализ отсутствия превышения номинального тока и т. д.

В соответствии с алгоритмом «лучший подходящий (BF)» элементы рассматриваются в произвольном порядке, на каждом шаге из всех контейнеров выбирается контейнер с наименьшим достаточным количеством емкости. Переходя к потребителям, это означает, что новый потребитель подключается к шине, у которой наименьший свободный ресурс среди шин, к которым он мог бы быть подключен при отсутствии превышения номинального тока.

Жадные алгоритмы характеризуются асимптотической точностью. Асимптотическая точность определяется как отношение в наихудшем случае числа контейнеров, назначаемое процедурой, к числу контейнеров, получаемому оптимальным алгоритмом при стремлении числа элементов к бесконечности. Согласно известным теоретическим результатам [9], алгоритм NF имеет асимптотическую точность 2, алгоритмы FF и BF — асимптотическую точность 1,7 [10, с. 30].

Алгоритм NF подходит для применения на текущий момент без учета прогнозных оценок, и может оказаться, что в каждой шине имеется небольшой свободный ресурс. Поэтому если в следующий момент времени появится еще один потребитель, то среди оставшихся небольших свободных

ресурсов найти возможность для его подключения будет сложнее. Поэтому целесообразно было бы подключить потребителя так, чтобы он заполнил одну из шин до предела, тогда останется свободный ресурс для подключения дополнительных потребителей без увеличения числа шин. При предложенном подходе свободные ресурсы могут оказаться во многих шинах, но они будут такими малыми, что не позволят подключить дополнительного потребителя. Аналогичные соображения можно высказать по алгоритму FF: да, можно найти шину со свободным ресурсом, но если прогнозировать на будущее, то из всех вариантов надо выбрать такой, чтобы как можно большее число контейнеров имело наименьшие свободные ресурсы. Именно такому подходу соответствует алгоритм FD, особенность которого состоит в подключении к шине, у которой после этого останется минимальный свободный ресурс. Это означает, что в данном случае для данного контейнера разность между номинальным током и током потребления — минимальна. Кроме того, из-за того, что элемент не поместили в первый достаточный контейнер (FD), то в нем образовался свободный ресурс, который можно при необходимости использовать при непрерывном увеличении тока потребления потребителя, подключенного к данной шине.

Поэтому наиболее подходящим для рассматриваемой задачи является алгоритм FD.

Алгоритм распределения потребителей по шинам, основанный на применении алгоритма FD, в рассматриваемой задаче содержит следующие шаги.

Шаг 1. Берем очередную по списку шину из всех задействованных.

Шаг 2. Оцениваем возможность подключения текущего потребителя;

Шаг 3. Анализируем:

— если потребитель может быть подключен к выбранной шине, то анализируем дальше, для чего переходим к шагу 4;

— в противном случае переходим к шагу 1.

Шаг 4. В случае возможности подключения текущего потребителя оцениваем оставшийся ресурс и его запоминаем:

— если это не последняя шина, то переходим к шагу 1;

— в противном случае (т. е. когда рассмотренная шина последняя) переходим к шагу 5.

Шаг 5. Сортируем шины по убыванию свободного ресурса, переходим к шагу 6.

Шаг 6. Выбираем шину с наименьшим свободным ресурсом, который возникает после подключения, и подключаем нового потребителя к этой шине.

По результатам описанного эвристического алгоритма удастся сформировать шину с нулевым свободным ресурсом или с минимальным свободным ресурсом.

4. ОПТИМАЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИ ИЗВЕСТНЫХ ПАРАМЕТРАХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Для распределения потребителей по шинам в случае полного пересмотра параметров гибридной СГРЭ лучше всего подходят алгоритмы, ориентированные на использование полной информации о подключаемых потребителях. Такими алгоритмами являются стратегия «первый подходящий по убыванию» First Fit Decreasing (FFD) и «лучший подходящий по убыванию» Best Fit Decreasing (BFD) [7, 10, с. 30, 11].

В алгоритме FFD элементы рассматриваются в порядке убывания требуемого свободного ресурса тока и назначаются в *первый контейнер*, куда они помещаются.

В алгоритме BFD элементы рассматриваются в порядке убывания требуемого свободного ресурса и назначаются в *контейнер с наименьшим достаточным количеством свободного ресурса*.

По сравнению с алгоритмом FFD, алгоритм BFD позволяет сформировать такую упаковку, при которой элементы упорядочиваются по убыванию размеров и постепенно упаковываются в контейнер, в котором после этого останется минимальный свободный объем. В рассматриваемой задаче использование такого подхода означает, что для данной шины разность между номинальным током и током потребления выражения (1) — минимальна. Кроме того, из-за того, что элемент не поместили в первый достаточный контейнер (FFD), то в нем образовался свободный ресурс, который можно при необходимости использовать по методу FD при непрерывном увеличении тока потребления.

Согласно известным теоретическим результатам [9], FFD и BFD имеют асимптотическую точность $11/9$.

В соответствии с предложенным алгоритмом потребителей упорядочивают по не возрастанию потребляемого тока и последовательно подключают к той шине, у которой после подключения остается наименьший свободный ресурс. Распределение потребителей по шинам с использованием алгоритма BFD в рассматриваемой задаче выглядит следующим образом:

- 1) сортируем шины в порядке убывания токов, пропускаемых ими;
- 2) сортируем потребителей в порядке убывания потребляемого ими тока;
- 3) берем шину с самым большим током из имеющихся;

4) берем потребителя с самым большим потребляемым током из имеющихся;

5) анализируем:

— если потребитель может быть подключен к выбранной шине, то его подключаем; переходим к п. 4;

— если потребитель не может быть подключен к выбранной шине, то берем следующего за ним потребителя из множества потребителей и переходим к п. 5;

— если в результате полного перебора потребителей не нашлось ни одного, ток потребления которого меньше свободного ресурса, то переходим к п. 3.

Процесс завершается тогда, когда все потребители оказываются подключенными к шинам.

По результатам описанного эвристического алгоритма удастся заполнить шины так, что свободный ресурс — нулевой или минимальный, и одну шину — с максимальным свободным ресурсом.

Шина с максимальным свободным ресурсом может быть впоследствии удачно использована при возможном дополнении этой шины вновь подключаемыми потребителями: чем больше свободный ресурс, тем больше шансов подключить нового потребителя к данной шине.

Получение оптимального распределения потребителей по шинам в различных ситуациях позволяет перейти к решению задачи оптимального управления гибридной СГРЭ при переходе из одного состояния в другое.

5. ЭФФЕКТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГИБРИДНОЙ СГРЭ

Управление гибридной СГРЭ заключается в изменении ее состояния, определяемого параметрами — числом источников питания, а значит, и шин, и распределением потребителей по шинам.

Пусть АНПА движется с постоянными параметрами, движение устойчивое. Пусть в некоторый момент времени возникла необходимость переключения потребителей. Для определения эффективного управления, переводящего подключения из оптимального состояния на момент времени t в оптимальное состояние на момент времени $t + 1$, проанализируем, к какому из вариантов можно отнести сложившуюся ситуацию:

— увеличение потребления в пределах номинального тока той шины, к которой подключен данный потребитель;

— увеличение потребления, приведшее к выходу за пределы номинального тока, в связи с чем требуется переключение;

— полное переключение потребителей.

В первом случае никаких переключений производить не требуется. Во втором случае отключаем потребителя с увеличивающимся уровнем потреб-



ления, из-за которого произошло превышение номинального тока и в соответствии с предложенным решением ВФ пытаемся найти ему место на других шинах. Если такой шины не находится, то дополнительно запускаем новую шину и подключаем его к ней. В третьем случае происходит полный пересмотр подключений, и для выбора нового эффективного подключения применяем алгоритм BFD. При полном переключении целесообразно сохранить преемственность подключений, поэтому при выборе варианта подключения к конкретным шинам необходимо сначала проанализировать и выбрать вариант с наибольшим числом совпадений подключений потребителей к шинам на моменты времени t и $t + 1$. Для этого в цикле по каждому используемому ранее потребителю перебираем шины, используемые в момент t : если потребитель был подключен к рассматриваемой шине, то подключаем его к этой же шине, где он был. И далее к этой шине подключаем тех потребителей, которые определены на момент времени $t + 1$ принадлежат на момент t этой же шине. Соответственно, из дальнейшего рассмотрения изымаем вновь подключенных на момент $t + 1$ потребителей. Далее переходим к рассмотрению следующего еще неподключенного используемого в момент t потребителя и в цикле по оставшимся шинам определяем его подключение. Так происходит до тех пор, пока все используемые ранее потребители не будут подключены к шинам. Оставшихся новых потребителей на момент $t + 1$ подключаем на оставшиеся шины.

Тем самым будет достигнуто оптимальное состояние подключений на момент времени $t + 1$. В результате будет получено состояние x_{t+1} , выражаемое оптимальным подключением потребителей к шинам на момент $t + 1$.

В формализованном виде оптимальное управление определяется следующим образом.

Пусть в момент t оптимальное решение по приведенному выше алгоритму имеет вид B_t , а вектор y_t имеет вид: $y_t(t) = [y_1(t) \dots y_n(t)]$.

Пусть в процессе выполнения задания известно, что в момент $t + 1$ необходимо отключить одних потребителей и подключить других. Тогда следуя формуле (2), на момент $t + 1$ в результате применения предложенного эвристического алгоритма получим решение $y_i(t + 1) = [y_1(t + 1) \dots y_n(t + 1)]$ такое, при котором:

$$B_{t+1} \rightarrow \min, \quad (3)$$

где $B_{t+1} = \sum_{i=1}^n y_i(t + 1)$. Тогда искомое управление u_t определяется выражением $u(t) = y(t + 1) - y(t)$.

Продemonстрируем на примере применение предложенного эвристического алгоритма управления гибридной СГРЭ.

6. ПРИМЕР ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ГИБРИДНОЙ СГРЭ

Рассмотрим выполнение АНПА маршрутного задания, включающего в себя два этапа, отличающихся параметрами движения АНПА. На первом этапе АНПА движется с высокой скоростью для скорейшего прибытия в заданный район, и в момент времени t поступает команда о переходе к моменту времени $t + 1$ на второй этап. На втором этапе АНПА от скоростного движения переходит в режим позиционирования практически с нулевой скоростью — для осуществления поисковых работ (обследование дна, трубопровода и др.) с помощью активного гидролокатора. Необходимо определить эффективное управление СГРЭ.

Для определения эффективного управления СГРЭ проанализируем, к какому варианту следует отнести переход от первого этапа (момент времени t) ко второму (момент времени $t + 1$). Поскольку полностью сменился скоростной режим, то данная ситуация подпадает под вариант полного переключения потребителей по шинам, поэтому для решения применяется эвристический алгоритм BFD.

Пусть матрица A_c состоит из элементов — постоянных потребителей:

— движения: кормовые рули (КР) — 1 А, уравнительно-дифференциальная система (УДС) — 2 А;

— источников тока: ЭХГ — 3 А, хранилище реагентов (ХР) — 4 А;

— вспомогательные системы в обеспечение движения: подсистема навигации (ПН) — 9 А; (для безопасности движения), пассивный режим освещения обстановки (ПОО) — 10 А (для безопасности движения);

— общие обеспечивающие элементы: вычислительные модули (ВМ) — 11 А.

Потребление постоянными потребителями выражается множеством из 7 элементов с потреблением (в амперах): {1 2 3 4 9 10 11}; всего суммарное потребление составило 40 А.

Множество переменных потребителей зависит от конкретной ситуации.

На этапе движения АНПА в заданную точку работают: носовые рули (НР) — 5 А, лаг абсолютный (ЛА) — 6 А, лаг относительный (ЛО) — 7 А, гидроакустическая навигационная система (ГАНС) — 8 А. Общее потребление переменными потребителями составило 26 А.

При прибытии в заданную точку перечисленные выше системы отключаются, зато подключаются: вертикальные подруливающие устройства (ВПУ) — 5 А, горизонтальные подруливающие устройства (ГПУ) — 6 А, активное освещение обстановки (АОО) — 14 А. Общее потребление переменными потребителями составило 25 А.

Таким образом, на первом и втором этапах переменные потребители характеризуются: различным составом, различным числом потребителей: 4 на первом этапе и 3 — на втором этапе, различным суммарным потреблением: 26 и 25 А.

На первом этапе общее потребление постоянными и переменными потребителями составило 66 А, на втором — 65 А.

Матрица A , описывающая рассматриваемый тактический эпизод, содержит 7 постоянных и 7 переменных потребителей; из переменных потребителей 4 использовались на первом этапе, а 3 использовались на втором этапе.

Пусть ток шин одинаковый и равен 34 А.

Матрица A в момент времени t имеет вид:

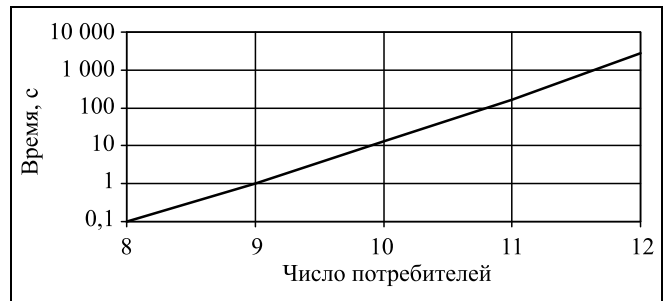
$$A = [A_{\text{КР}} \ A_{\text{УДС}} \ A_{\text{ЭХГ}} \ A_{\text{ХР}} \ A_{\text{ПН}} \ A_{\text{ВМ}} \ A_{\text{ПОО}} \ A_{\text{НР}} \ A_{\text{ЛА}} \ A_{\text{ЛО}} \ A_{\text{ГАНС}} \ A_{\text{ВПУ}} \ A_{\text{ГПУ}} \ A_{\text{АОО}}].$$

После подстановки вместо элементов соответствующих значений потребляемого тока матрица A примет вид:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 9 & 10 & 11 & 5 & 6 & 7 & 8 & 5 & 6 & 14 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 9 & 10 & 11 & 5 & 6 & 7 & 8 & 5 & 6 & 14 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 9 & 10 & 11 & 5 & 6 & 7 & 8 & 5 & 6 & 14 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 9 & 10 & 11 & 5 & 6 & 7 & 8 & 5 & 6 & 14 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 9 & 10 & 11 & 5 & 6 & 7 & 8 & 5 & 6 & 14 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 9 & 10 & 11 & 5 & 6 & 7 & 8 & 5 & 6 & 14 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 9 & 10 & 11 & 5 & 6 & 7 & 8 & 5 & 6 & 14 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 9 & 10 & 11 & 5 & 6 & 7 & 8 & 5 & 6 & 14 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 9 & 10 & 11 & 5 & 6 & 7 & 8 & 5 & 6 & 14 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 9 & 10 & 11 & 5 & 6 & 7 & 8 & 5 & 6 & 14 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 9 & 10 & 11 & 5 & 6 & 7 & 8 & 5 & 6 & 14 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 9 & 10 & 11 & 5 & 6 & 7 & 8 & 5 & 6 & 14 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 9 & 10 & 11 & 5 & 6 & 7 & 8 & 5 & 6 & 14 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 9 & 10 & 11 & 5 & 6 & 7 & 8 & 5 & 6 & 14 \end{bmatrix}.$$

постоянные потребители
переменные потребители на 1 этапе
переменные потребители на 2 этапе

Вертикальные линии отделяют постоянных и переменных потребителей. Переменные потребители, в свою очередь, также разграничены вертикальной линией на потребителей, задействованных на первом этапе, и потребителей, задействованных на втором этапе.



Зависимость времени счета от числа потребителей

При алгоритме полного перебора потребовалось бы проанализировать $11!$ вариантов на первом этапе и $10!$ — на втором этапе, что составило бы 39 916 800 и 3 628 800 вариантов соответственно. При использовании процессора персонального компьютера $i3$ зависимость времени счета от числа вариантов представлена на рисунке.

Видно, что на перебор в случае 10-ти потребителей потребовалось бы около 20 с, а при 11-ти потребителях — свыше 3 мин.

Для применения разработанного эвристического алгоритма сформировано множество элементов, включающих в себя постоянных (выделены полужирным шрифтом) и переменных потребителей на первом и втором этапах:

{**1 2 3 4 9 10 11** 6 7 8 0 0 0} на первом этапе;
{**1 2 3 4 9 10 11** 0 0 5 6 14} на втором этапе.

Было получено решение y_{ij} и B_t на момент времени t на первом этапе — при переходе АНПА в заданную точку.

Результатом решения оказалась подключение 11-ти потребителей к двум шинам:

$$y(t) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T, \quad B_t = 2.$$

Оптимальное распределение 11 потребителей по шинам таково — к первой шине подключены: хранилище реагентов (4 А), подсистема навигации (9 А), вычислительные модули (10 А), пассивный режим освещения обстановки (11 А) — всего в сумме 34 А, поэтому у первой шины свободного ресурса не осталось; ко второй шине подключены: рули кормовые (1 А), уравнительно-дифференциальная система (2 А), электрохимический генератор (3 А), пассивный режим освещения обстановки (5 А), лаг абсолютный (6 А), лаг относительный (7 А), гидроакустическая навигационная система (8 А) — всего 32 А, поэтому свободный ресурс составил 2 А.

Для сравнения задача оптимального распределения потребителей по шинам решалась с помощью алгоритма простого перебора, гарантирующе-



го получение оптимального решения. По результатам полного перебора был выбран оптимальный вариант подключения потребителей к шинам, число которых также оказалось равным двум, как и при работе разработанного эвристического алгоритма. Таких вариантов, в которых число шин равно двум, оказалось несколько.

Затем определялось оптимальное распределение потребителей по шинам на втором этапе — на момент времени $t + 1$. По результатам применения разработанного эвристического алгоритма было получено решение y_{ij} и B_{t+1} . Оказалось, что в момент времени $t + 1$ потребители также распределились по двум шинам:

$$y(t+1) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}^T,$$

$$B_{t+1} = 2.$$

Распределение произошло следующим образом. К первой шине подключены: активное освещение обстановки (14 А), пассивный режим освещения обстановки (11 А), подсистема навигации (9 А), всего в сумме 34 А, поэтому свободного ресурса на первой шине — не осталось. Ко второй шине подключены: кормовые рули (1 А), уравнительно-дифференциальная система (2 А), электрохимический генератор (3 А), хранилище реагентов (4 А), вертикальные подруливающие устройства (5 А), горизонтальные подруливающие устройства (6 А), вычислительные модули (10 А), всего в сумме 31 А, поэтому свободный ресурс составил 3 А.

Для формирования эффективного управления, переводящего подключения из состояния на момент времени t в состояние на момент времени $t + 1$, сравнивались результаты распределения потребителей по шинам на указанные моменты времени, соответствующие каждому из этапов. В результате сравнения оказалось, что три элемента матрицы изменили свои значения, так как переключение по шинам поменялось, и кроме того, поменялось четыре знакоместа из-за подключения совершенно других потребителей.

Эффективное управление $u(t)$, переводящее подключения из состояния на момент времени t в состояние на момент времени $t + 1$, определялось с помощью выражения (3):

$$u_t = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}^T.$$

Время счета, затраченное при работе предложенного эвристического алгоритма, составило доли секунды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрена задача управления гибридной системой генерации и распределения электроэнергии, работающей синхронно с системой управления движением многоскоростного автономного необитаемого подводного аппарата. Проанализированы возможные причины переключения потребителей между токопроводами, которые подключены к источникам тока. Предложено эффективное управление системой генерации и распределения электроэнергии на основе эвристических алгоритмов Best Fit и Best Fit Decreasing, применение которых определяется текущей ситуацией. На численном примере наглядно показано определение эффективного управления гибридной системой генерации и распределения электроэнергии, обеспечивающей управление движением автономного необитаемого подводного аппарата при смене одного скоростного режима на другой. Показано многократное преимущество применения предложенного эффективного управления на основе эвристических алгоритмов по сравнению с методом простого перебора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Апполонов Е.М., Бачурин А.А., Горохов А.И., Пономарев Л.О. О возможности и необходимости создания сверхбольшого необитаемого подводного аппарата // Сб. материалов XIII Всерос. науч.-практ. конф. «Перспективные системы и задачи управления». — Ростов-на-Дону — Таганрог, ЮФУ. — 2018. — С. 34—42. [Appolonov, Ye.M., Bachurin, A.A., Gorokhov, A.I., Ponomarev, L.O. On the possibility and necessity of creating an extra-large uninhabited underwater vehicle // Sat. XIII All-Russian materials. scientific-practical conf. «Perspective systems and management tasks». — Rostov-on-Don — Taganrog, SFU. — 2018. — P. 34—42. (In Russian)]
2. Бакуменко Л.Г., Дядик А.Н., Сурин С.Н. Использование электрохимических генераторов на автономных необитаемых подводных аппаратах // Системы управления и обработки информации. СПб. — 2018. — Вып. 1 (40). — С. 61—68. [Bakumenko, L.G., Dyadik, A.N., Surin, S.N. The use of electrochemical generators on autonomous uninhabited underwater vehicles // Control and Information Processing Systems. SPb. — 2018. — Iss. 1 (40). — P. 61—68. (In Russian)]
3. Пат. RU № 2534470. Электроэнергетическая система для перспективных неатомных подводных лодок / Никифоров Б.В. Батрак Д.В., Чигарев А.В., Игнатьев К.Ю. — 2014. — 6 с. [Pat. RU No. 2534470. Electric power system for advanced non-nuclear submarines / Nikiforov, B.V. Batrak, D.V., Chigarev, A.V., Ignat'yev, K.Yu. — 2014. — 6 s. (In Russian)]
4. Bradley, A.M., Feezor, M.D., Singh, H., Sorrell, F.Y. Power Systems for Autonomous Underwater Vehicles // IEEE Journal of Oceanic Engineering 26 (4). — P. 526—538. — DOI: 10.1109/48.972089.
5. Mendez, A., Leo, T.J., Herreros, M.A. Current State of Technology of Fuel Cell Power Systems for Autonomous Underwater Vehicles // Energies. — 2014. — No. 7. — P. 4676—4693. — DOI: 10.3390/en7074676.
6. Смирнов А.В. О задаче упаковки в контейнеры // Успехи математических наук. — 1991. — Т. 46. — № 4. —

- С. 173–174. [Smirnov, A.V. On the task of packaging in containers // Uspekhi Matematicheskikh Nauk. — 1991. — Vol. 46, no. 4. — P. 173–174. (In Russian)]
7. Левин М.Ш. Упаковка в контейнеры (перспективные модели, примеры) // Информационные процессы. — 2017. — Т. 17. — № 1. — С. 43–60. [Levin, M.Sh. Packaging in containers (perspective models, examples) // Information processes. — 2017. — Vol. 17, — no. 1. — P. 43–60. (In Russian)]
8. Полева Е.А. Оптимизация загрузки транспортного средства // Вопросы науки. — 2016. — Т. 1. — С. 79–85. [Poleva, E.A. Vehicle loading optimization // Science issues. — 2016. — Vol. 1. — P. 79–85 (In Russian)]
9. Coffman, E.G., Garey, M.R., Johnson, D.S. Approximation algorithms for bin packing: A survey // Approximation algorithms for NP-hard problems. — Boston: PWS Publishing Co., 1996. — P. 46–93.
10. Вдовин П.М. Жадные алгоритмы и стратегии ограниченного перебора для планирования вычислений в системах с жесткими требованиями к качеству обслуживания // Дисс. канд. физ.-мат. наук. — М., 2016. — 127 с. [Vdovin, P.M. Greedy algorithms and limited search strategies for planning computations in systems with strict requirements for the quality of service // Diss. Cand. Phys.-Math. sciences. — М., 2016. — 127 s. (In Russian)]
11. Курейчик В.М., Потарусов Р.В. Проблема одномерной упаковки элементов // Известия ТРТУ. Технические науки. — 2006. — № 8 (63). — С. 88–93. [Kureichik, V.M., Potarushov, R.V. The problem of one-dimensional packing of elements // News of TRTU. Technical science. — 2006. — No. 8 (63). — P. 88–93. (In Russian)]

Статья представлена к публикации членом редколлегии Р.В. Мещеряковым.

Поступила в редакцию 23.12.2019, после доработки 2.06.2020.
Принята к публикации 15.06.2020.

Мартынова Любовь Александровна — д-р техн. наук,
АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», г. Санкт-Петербург,
✉ martynowa999@bk.ru,

Киселев Николай Константинович — аспирант,
АО «ЦКБ «Лазурит», г. Санкт-Петербург,
✉ kiselevu@gmail.com,

Безрук Георгий Григорьевич — канд. воен. наук,
НИИ «Оперативно-стратегических исследований
строительства ВМФ», г. Санкт-Петербург, ✉ geoint99@mail.ru.

EFFECTIVE CONTROL OF A HYBRID SYSTEM OF GENERATION AND DISTRIBUTION OF ELECTRICITY FOR A MOVING AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE

L.A. Martynova¹, N.K. Kiselev², G.G. Bezruk³

¹ CCRI «Elektropribor», St. Petersburg, Russia

² CDB «Lazurit», St. Petersburg, Russia

³ RI OSSC Navy, St. Petersburg, Russia

¹✉ martynowa999@bk.ru, ²✉ kiselevu@gmail.com, ³✉ geoint99@mail.ru

Abstract. For the movement of an autonomous underwater vehicle (AUV), various actuators are used, which differ not only in the principle of operation, but also in the current consumption that varies over time. Because of this, power sources that are different in principle of action are needed. In this regard, the movement control of AUVs necessitates solving the problem of effective control of the energy generation and distribution system, which is understood as determining the necessary composition and parameters of power sources, as well as the distribution of consumers on buses under strict time limits. The purpose of the work is the development of effective control of the AUV energy generation and distribution system to ensure its movement with specified parameters. The analysis of connecting/disconnecting consumers revealed that all situations can be reduced to two types of control: the first one takes place when it is not known in advance which of the consumers will be connected and how much current it will consume; the second one takes place when the composition of consumers and the amount of current consumed by them are known. To determine the management of consumer switching, the task is formalized as the task of packing in containers, for the solution of which heuristic algorithms exist. An analysis of existing algorithms in relation to the problem to be solved allowed us to determine that the Best Fit and Best Fit Decreasing algorithms provide effective control of the power generation and distribution system. An example is given of controlling a hybrid system for generating and distributing electricity when changing the movement parameters of the apparatus.

Keywords: autonomous underwater vehicle, hybrid power generation and distribution system, heuristic algorithm.

Funding. The work was performed with financial support of Russian Foundation of Basic Research (project no. 20-08-00130).