

# Оптимизация размещения активно-адаптивных устройств в электроэнергетических системах

БЕЛЯЕВ Н.А., КОРОВКИН Н.В., ФРОЛОВ О.В., ЧУДНЫЙ В.С.

*Предложен подход к оптимизации параметров и размещения активно-адаптивных устройств (ААУ) в электроэнергетических системах (ЭЭС). При реализации подхода активно используются дробно-полиномиальные зависимости параметров режима ЭЭС от параметров ААУ. Подход основан на кластеризации ЭЭС и независимом управлении режимами ЭЭС внутри кластеров. Для решения задачи кластеризации введено понятие зон влияния ААУ, разработана методика определения зон влияния и исследованы их основные свойства. Задача кластеризации ЭЭС решена с использованием алгоритма минимальной степени. Показано, что рассмотрение зон влияния позволяет оценивать влияние на режимы ЭЭС большого числа ААУ. Исследованы зависимости размера зоны влияния ААУ от его параметров и от места расположения в ЭЭС. Эффективность предложенных подходов показана на примере решения задачи минимизации потерь в ЭЭС Санкт-Петербурга и Ленинградской области (ЭЭС СПб и ЛО). Оценено оптимальное число ААУ, необходимых для эффективного управления режимами этой ЭЭС. Указаны ЭЭС СПб и ЛО конкретных для оптимального размещения ААУ поперечного типа с варьруемой реактивной проводимостью номинальной мощностью 50 Мвар.*

**Ключевые слова:** электроэнергетическая система, активно-адаптивное устройство, оптимизация, дробно-полиномиальная зависимость, управление, кластер, зона влияния

Расширение электроэнергетических систем (ЭЭС), сопровождающееся строительством новых электростанций и подстанций, линий электропередачи, присоединением новых потребителей, приводит к усложнению их структуры. Основные проблемы развития, характерные для ЭЭС крупных городов-мегаполисов с высокой плотностью потребителей электрической энергии и сложной конфигурацией электрических сетей, состоят в высокой загрузке элементов электрических сетей и неоптимальном распределении потоков мощности, приводящем к увеличению потерь, неэффективной эксплуатации оборудования ЭЭС и снижению качества электроэнергии.

Решения проблем управления потоками мощности в ЭЭС перешли на качественно новый уровень в результате развития силовой электроники и создания устройств, способных в широких пределах изменять реактанс передающих линий, выдачу и потребление реактивной мощности и регулировать потоки мощности в сети [1]. Данные технологии получили название гибких систем переменного тока (FACTS), а соответствующие электротехнические устройства относят к классу активно-адаптивных устройств (ААУ). Основным назначением ААУ является улучшение управляемости, эффективности и повышение пропускной способности ЭЭС. В [2, 3] был предложен ряд оригинальных соотношений, описывающих связи параметров режима ЭЭС и параметров сетевого оборудования, имеющих вид дробно-полиномиальных функций. С использованием тестовых схем IEEE показано, что применение дробно-полиномиальных зависимостей при

определении параметров режима не вносит существенной погрешности в результаты расчётов [4]. Решение практических задач [5] показало высокую эффективность применения предлагаемых соотношений для поиска оптимальных значений параметров различного оборудования, функционирующего в составе ЭЭС, в том числе ААУ.

В ЭЭС мегаполисов, несмотря на характерную для них сильную взаимосвязь параметров элементов ЭЭС и параметров режима, изменение параметра какого-либо элемента ЭЭС, в том числе ААУ, не влияет существенно на режим в *с* *е* *х* узлов ЭЭС. Значительный интерес для управления и оптимизации режимов работы ЭЭС представляет построение зон влияния изменения параметров сетевого оборудования. В рамках данной статьи подход, основанный на дробно-полиномиальных связях между параметрами устройств и параметрами режима, развивается применительно к построению зон влияния ААУ, работающих в составе ЭЭС, и оптимизации размещения ААУ.

**Зоны влияния: определение и свойства.** Зависимости параметров режима (токов, напряжений, мощностей и т.п.) от электромагнитных параметров сетевого оборудования, в том числе от параметров ААУ, имеют вид дробно-полиномиальных функций [2]. При наличии в ЭЭС одного ААУ, характеризуемого параметром  $x$ , поиск наилучшего с точки зрения какого-либо критерия значения  $x$  с помощью таких функций не сложен [5]. При увеличении числа ААУ в сети и(или) введении в рассмотрение дополнительных параметров

$(x_1, x_2, \dots, x_N)$  полиномы числителя и знаменателя дробно-полиномиальных функций усложняются. Это не изменяет принципиально предлагаемую нами технику оптимизации режимов ЭЭС, но усложняет ее реализацию. Как будет показано, введение в рассмотрение зон влияния ААУ существенно упрощает определение совокупного влияния на режим сети большого числа параметров.

Пусть в заданном узле (или ветви) ЭЭС установлено ААУ, характеризуемое параметром  $x$ . Под зоной влияния данного ААУ будем понимать энергорайон (здесь некоторое множество узлов и сетевых элементов ЭЭС), в котором изменение параметра  $x$  от минимального до максимального его значения существенно изменяет параметры режима данного энергорайона. Другими словами, зона влияния ААУ – это часть ЭЭС, в которой ААУ влияет на режим сети. В крупной ЭЭС установленные ААУ, как правило, имеют ограниченную зону влияния. Таким образом, учёт зависимости от параметра ААУ для всех узлов (ветвей) схемы не только приводит к усложнению расчётов и к более громоздкой записи критериев оптимальности (минимизируемого функционала), но и не является необходимым, поскольку для узлов (ветвей), находящихся вне зоны влияния данного ААУ, эта зависимость пренебрежимо слаба. Число аргументов  $N$  дробно-полиномиальной функции для некоторого узла (ветви) будет определяться числом ААУ, в зоны влияния которых попадает данный узел (ветвь). Отметим также, что поскольку все параметры режима взаимосвязаны, то размер и расположение зоны влияния для конкретного ААУ не зависит от того, какие именно параметры режима (токи, напряжения, мощность и т.п.) рассматриваются в задаче и участвуют в записи критерия оптимальности.

Размер зоны влияния ААУ зависит от его типа, мощности и от места расположения в ЭЭС. Исследование данных зависимостей выполнялось для перспективной схемы ЭЭС Санкт-Петербурга и Ленинградской области (ЭЭС СПб и ЛО). Для данной ЭЭС была построена матрица взаимных влия-

ний узлов, представленная на рис. 1. Каждая строка данной матрицы соответствует определённому месту установки ААУ в ЭЭС. Здесь и далее рассматривается ААУ поперечного типа с варьируемым параметром – реактивной проводимостью. Максимальное и минимальное значения проводимости ААУ рассчитываются по его номинальной мощности, при этом в проведённых расчётах принималось, что в режимах выдачи и потребления реактивной мощности мощность ААУ одинаковая (пределы изменения проводимости всегда могут быть уточнены с учётом характеристик конкретного ААУ).

Общее число возможных мест установки рассматриваемых ААУ (без изменения исходной схемы) равно числу узлов в схеме (для рассматриваемой схемы ЭЭС СПб и ЛО число узлов равно 696). Таким образом, номер строки матрицы взаимных влияний соответствует порядковому номеру узла  $j$ , в который включено ААУ (переменная проводимость  $b_j$ ). Столбцы матрицы соответствуют узлам ЭЭС.

Для построения матрицы взаимных влияний последовательно в каждый узел ЭЭС устанавливается ААУ и определяются константы дробно-полиномиальных зависимостей [2]. Поиск констант осуществляется посредством расчёта режимов ЭЭС при различных значениях параметра ААУ, при этом для расчёта используется полная модель ЭЭС (в расчетах использовался программный комплекс «RastrWin»). Определение констант дробно-полиномиальных зависимостей для всех узловых напряжений при заданном расположении ААУ требует двух расчетов режима [2], следовательно, для построения матриц рис. 1 необходимо  $2 \times 696$  расчетов режимов. Полученные в результате дробно-полиномиальные функции с высокой точностью аппроксимируют реальные зависимости [4]. Затем для каждого узла выполняется расчёт диапазона изменения напряжения, обеспечиваемого изменением проводимости ААУ. Дробно-полиномиальные зависимости позволяют легко определить границы этого диапазона аналитически [5]. После чего для каждого  $i$ -го узла при каждом  $j$ -м варианте уста-

		Узлы ЭЭС ( $U_i = \text{var}$ )					
		1	2	...	$i$	...	696
Узел с ААУ ( $b_j = \text{var}$ )	1	$k_{1,1}$	$k_{1,2}$	...	$k_{1,i}$	...	$k_{1,696}$
	2	$k_{2,1}$	$k_{2,2}$	...	$k_{2,i}$	...	$k_{2,696}$
	...						
	$j$	$k_{j,1}$	$k_{j,2}$	...	$k_{j,i}$	...	$k_{j,696}$
	...						
	696	$k_{696,1}$	$k_{696,2}$	...	$k_{696,i}$	...	$k_{696,696}$

Рис. 1. Структура матрицы взаимных влияний узлов

новки ААУ проводится расчёт коэффициентов  $k_{i,j}$  влияния – элементов матрицы взаимных влияний – в соответствии с выражением

$$k_{i,j} = \frac{U_{i\max}^j - U_{i\min}^j}{U_{i\text{ном}}}, \quad (1)$$

где  $U_{i\max}^j$ ,  $U_{i\min}^j$  – максимальное и минимальное действующие значения напряжения  $i$ -го узла соответственно (границы диапазона изменения напряжения), которые может обеспечить ААУ в узле  $j$ ;  $U_{i\text{ном}}$  – номинальное напряжение  $i$ -го узла.

Элементы построенной матрицы отражают влияние изменения потребления (выдачи) реактивной мощности узлов на уровни напряжения, что и определяет название матрицы.

Матрицы взаимных влияний для ЭЭС СПб и ЛО были построены для мощностей ААУ 10–100 Мвар. Элементы полученных матриц, имеющие значения менее 0,01, обнулялись как малозначимые. Матрицы для разной номинальной реактивной мощности ААУ представлены на рис. 2, на которых элементы матриц выделены оттенками серого в соответствии с их числовыми значениями.

Анализируя представленные матрицы, можно выделить их общие свойства.

1. Матрицы имеют большое число нулевых элементов, т.е. являются разреженными. Таким образом, даже ААУ сравнительно большой мощности (100 Мвар) оказывают влияние на режим лишь некоторого ограниченного энергорайона.

2. Матрицы являются симметрическими, что свидетельствует о выполнении для исследуемой схемы принципа взаимности [7].

3. Для всех рассмотренных матриц характерна сильная зависимость размера зоны влияния от места расположения ААУ. На рис. 2,а видно, что ААУ мощностью 10 Мвар при большинстве вариантов установки в ЭЭС СПб и ЛО зон влияния не имеют, т.е. их влияния на режим сети характеризуются коэффициентом  $k_{i,j} < 0,01$ . При этом есть узлы, при установке ААУ в которые зона влияния ААУ составляет до 27 узлов.

4. Для матриц взаимных влияний узлов характерно присутствие групп строк с одинаковыми (близкими) по номерам столбцов ненулевыми элементами. Этим группам строк в исследуемой ЭЭС соответствуют группы узлов. Узлы каждой из таких групп влияют друг на друга, но при этом не влияют на остальные узлы ЭЭС. Это важное свойство будет использовано в дальнейшем.

5. В матрицах также присутствуют строки, в которых все элементы равны нулю. Как правило, такие строки соответствуют узлам, в которых присутствуют иные средства регулирования реактивной мощности, поддерживающие заданный уровень на-

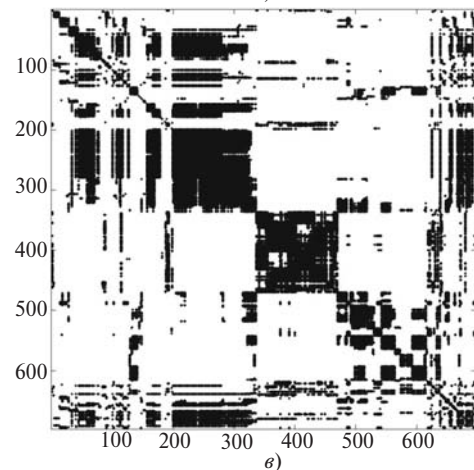
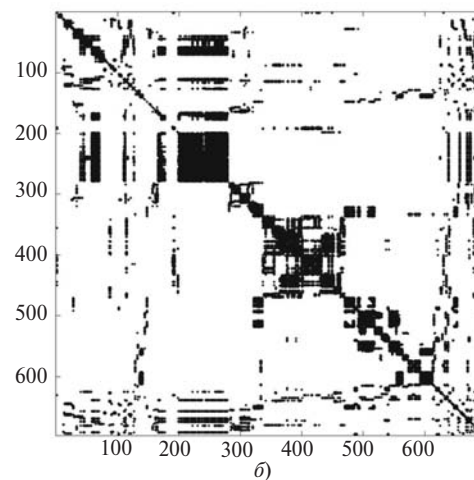
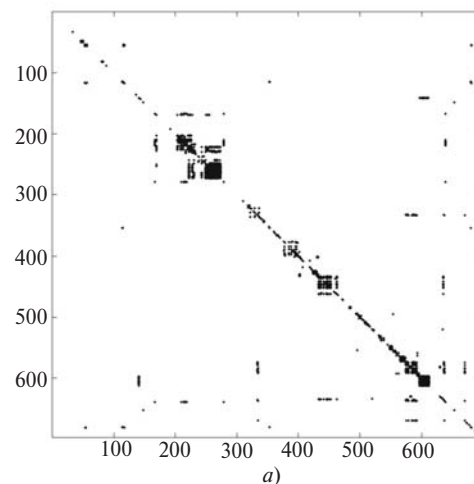


Рис. 2. Матрица взаимных влияний узлов: а –  $Q_{\text{ААУ}} = 10$  Мвар; б – 50 Мвар; в – 100 Мвар

пряжения. Дополнительная установка ААУ в такие узлы не рассматривается.

Рассмотрим подробнее зависимость размера зоны влияния ААУ от его мощности и расположения. Как было отмечено, размер зоны влияния ААУ зависит не только от его мощности, но и от места размещения ААУ в сети, поэтому для устройств одинаковой мощности, установленных в разных узлах, размер зоны влияния может варьиро-

ваться. На рис. 3 приведена зависимость среднего и максимального размера зоны влияния (числа узлов в зоне влияния) от номинальной мощности ААУ для исследуемой ЭЭС СПб и ЛО. Квадратным маркером отмечен максимальный размер зоны влияния для ААУ данной мощности, круглым маркером – средний размер зоны влияния. Отметим, что средний размер зоны влияния растёт практически пропорционально мощности, для максимального размера этот рост происходит неравномерно.

По данным рис. 3, можно оценить число ААУ, необходимых для покрытия зонами влияния ААУ всей ЭЭС в зависимости от их мощности. Полное покрытие ЭЭС зонами влияния ААУ позволяет организовать управление и оптимизацию режима всей сети. Для выполнения такой оценки воспользуемся значением среднего числа узлов в зоне влияния. Тогда, например, для ААУ мощностью 100 Мвар, при общем числе узлов в схеме, равном 696, и среднем числе узлов в зоне влияния 92 (см. рис. 3) получим число устройств, необходимое для покрытия всей ЭЭС,  $696/92 \sim 8$  устройств.

В данном расчёте было использовано среднее число узлов в зоне влияния, а не максимальное. При выборе наилучших по размеру зоны влияния вариантов установки ААУ будет получено меньшее число требуемых ААУ. Однако, как было отмечено, в матрице взаимных влияний присутствуют группы одинаковых (близких) строк, поэтому выбранные по условию максимизации зоны влияния места установки ААУ имели бы перекрывающиеся зоны влияния и не обеспечили бы покрытие всей сети, т.е. выбор мест расположения ААУ по принципу максимизации зоны влияния не является эффективным.

На рис. 4 приведены результаты расчётов размера зоны влияния ААУ мощностью 50 Мвар в зависимости от его расположения в ЭЭС, выполненных на основе матрицы взаимных влияний узлов. На рис. 4 по оси абсцисс отложены номера узлов установки ААУ (узлы сортированы в порядке убывания

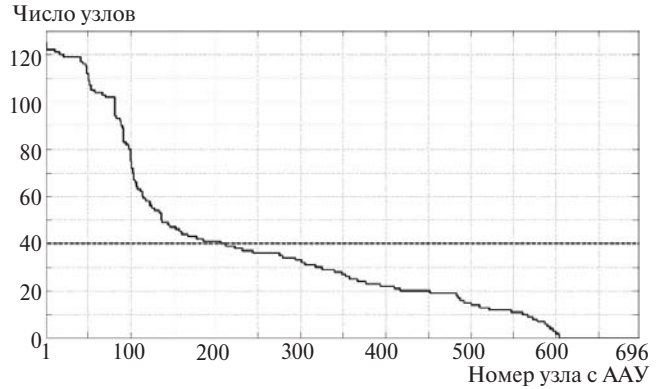


Рис. 4. Зависимость числа узлов в зоне влияния от расположения ААУ ( $Q_{AAU} = 50$  Мвар)

размера зоны влияния), по оси ординат – размер зоны влияния ААУ (число узлов ЭЭС в зоне влияния). Штриховой линией отмечено среднее число узлов в зоне влияния для ААУ данной мощности (40). Данные рис. 4 показывают, что размер зоны влияния ААУ при изменении его расположения сильно варьируется. Максимальный размер зоны влияния составляет 125 узлов, что соответствует данным рис. 3.

**Кластеризация сети.** Предложенный подход к определению зон влияния ААУ позволяет выполнять построение зон влияния ААУ различных типов в произвольной ЭЭС аналитически. Оптимизация параметров и размещения одного ААУ в ЭЭС по скалярным или векторным критериям [8] может быть выполнена с использованием дробно-полиномиальных зависимостей [2, 9, 10, 11]. При размещении в ЭЭС нескольких ААУ эффективность их работы зависит от их взаимного расположения, так как при перекрытии зон влияния ААУ дублируют друг друга. Соответственно, одним из критериев наилучшего размещения нескольких ААУ в ЭЭС может являться максимизация числа узлов, попадающих в зоны влияния ААУ (максимизация покрытия ЭЭС зонами влияния ААУ). Очевидно, при размещении ААУ в соответствии с данным критерием покрытие ЭЭС будет увеличиваться с ростом числа ААУ. Практический интерес представляет определение минимального числа ААУ для полного покрытия ЭЭС их зонами влияния.

Решение данной задачи нетривиально, так как из всего множества зон влияния, определённого на этапе построения матрицы взаимных влияний узлов, необходимо выделить такой набор, который покрывает всю сеть, и этот набор должен быть минимальным (покрывать сеть ЭЭС минимальным числом зон влияния). Математическая формулировка задачи может быть записана в виде:

$$\begin{aligned} & \text{Arg}(Y_k) \underset{k}{\text{min}}, \\ & Y_k : Y_{k_1}, Y_{k_2}, \dots, Y_{k_n} \hat{=} Y_k, \\ & \text{если } \{Y_{k_1} \cup Y_{k_2} \cup \dots \cup Y_{k_n}\} = N, \end{aligned} \quad (2)$$

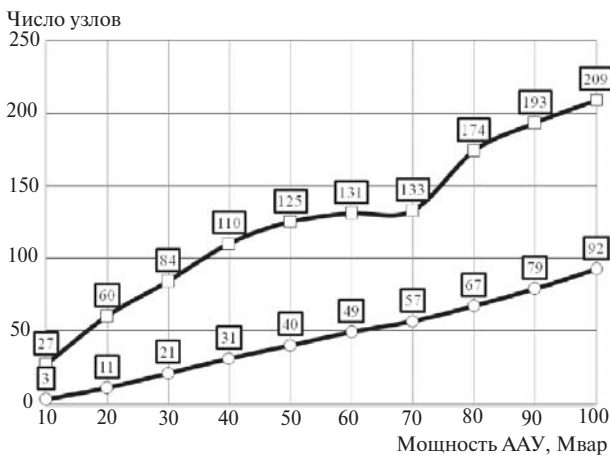


Рис. 3. Зависимость максимального и среднего числа узлов в зоне влияния от мощности ААУ

где  $Y_{k_n}$  – множество узлов, входящих в зону влияния ААУ, установленного в узле  $k_n$ ;  $Y_k$  – некоторый  $k$ -й набор зон влияния ААУ;  $N$  – множество узлов рассматриваемой ЭЭС; функция  $\text{Arg}(Y)$  вычисляет число элементов множества  $Y$ .

Как было отмечено, выбор в качестве решения (2) наилучших по размеру зон влияния узлов установки ААУ не даёт требуемого результата, поскольку установленные в выбранные таким образом узлы сети ААУ будут иметь сильно перекрывающиеся зоны влияния.

Для решения поставленной задачи воспользуемся тем, что характерным для матриц взаимного влияния является наличие в них групп одинаковых (близких) строк. Одинаковые строки с учётом симметрии матрицы означают, что в ЭЭС присутствуют группы узлов, имеющих влияние друг на друга, но не имеющих его на остальные узлы ЭЭС. Фактически это означает, что ААУ, установленное в любой из узлов данной группы, будет иметь зону влияния, в которую войдут все узлы данной группы, а остальные узлы ЭЭС останутся вне неё.

Множество узлов ЭЭС  $K$ , такое что для любых  $i, j \in K$  справедливо  $k_{i,j} \geq \epsilon$ , а для любого  $p \in K$  справедливо  $k_{i,p} < \epsilon$ , где  $k_{i,j}$ ,  $k_{i,p}$ , определены в соответствии с (1),  $\epsilon$  – минимальный уровень регулирования (при построении матриц взаимного влияния узлов было принято  $\epsilon = 0,01$ ), назовём кластером (кластер – cluster (англ.) – скопление – объединение нескольких однородных элементов, которое может рассматриваться как самостоятельная единица, обладающая определёнными свойствами). Покажем, что разбиение ЭЭС на кластеры и будет являться решением (2).

В соответствии с определением каждый кластер представляет собой набор одинаковых (полностью перекрывающихся) зон влияния ААУ. Соответственно, ААУ, размещённое в любом узле кластера, покроем своей зоной влияния весь кластер. Установка в одном кластере более одного ААУ с точки зрения оптимального покрытия не имеет смысла (но может быть использована для набора необходимой суммарной мощности ААУ несколькими устройствами). Таким образом, минимальное число ААУ, необходимых для покрытия сети, равно числу кластеров в ЭЭС.

Размер и состав каждого кластера определяются особенностями схемы, а также типом и мощностью ААУ. Разбиение ЭЭС на кластеры может быть проведено с использованием построенной матрицы взаимных влияний узлов. Данная матрица является разреженной, для упорядочения её элементов могут быть применены известные алгоритмы [12, 13].

Для решения задачи кластеризации предлагается использовать алгоритм минимальной степени, осуществляющий симметричную перестановку

строк и столбцов матрицы, который кратко может быть описан на примере упорядочения графа. Исходной матрице ставится в соответствие граф, на котором выбирается вершина с минимальной степенью инцидентности. Эта вершина исключается, при этом все смежные с исключаемой вершины соединяются между собой. В полученном графе вновь удаляется вершина с минимальной степенью с добавлением соответствующих связей. В случае, если в графе присутствует несколько вершин с минимальной степенью, для исключения выбирается любая из них. Процесс повторяется до тех пор, пока не будут исключены все вершины. После исключения последней вершины алгоритм останавливается. Нумерация вершин соответствует порядку их исключения. Упорядочение вершин графа соответствует упорядочению строк и столбцов исходной матрицы.

Применим алгоритм минимальной степени для упорядочения матрицы взаимных влияний. Данная матрица является симметричной, ей в соответствие может быть поставлен граф. С учётом наличия групп строк с одинаковыми (близкими) ненулевыми элементами (свойство 4) граф, соответствующий матрице, будет состоять из несвязанных или слабо связанных полных подграфов (клик) с разным, в общем случае, числом вершин (рис. 5). Нетрудно убедиться, что в результате применения для нумерации вершин такого графа алгоритма минимальной степени будут последовательно пронумерованы вершины каждой клики в порядке возрастания их значения. Действительно, все вершины одной клики имеют одинаковую степень инцидентности, соответственно, в начале работы алгоритма для исключения будет выбрана вершина минимальной клики. После её исключения степень инцидентности остальных вершин клики уменьшится на единицу, следовательно, на следующем шаге алгоритма будет исключена вершина той же клики. После исключения всех вершин минимальной клики аналогично будут последовательно исключены вершины следующей (в порядке возрастания) клики. Если в графе имеется несколько клик одинакового размера, алгоритм также исключит вершины каждой из них последовательно.

Вершины одной клики соответствуют узлам одного кластера. В результате работы алгоритма узлы перенумерованы в порядке неубывания размера кластеров, в которые они входят, а узлы, входящие в один кластер, пронумерованы последовательно. Кроме того, в алгоритме минимальной степени возможна автоматическая последовательная нумерация узлов, неразличимых по отношению к исключению, т.е. имеющих одинаковую минимальную степень инцидентности (например вершин од-

ной клики), что позволяет сократить объёмы расчётов [13].

Результаты упорядочения матрицы взаимных влияний для  $Q_{AAU} = 50$  Мвар (рис. 2, б) с использованием алгоритма минимальной степени представлены на рис. 6. Матрица сведена к блочно-диагональному виду, каждый диагональный блок соответствует отдельному кластеру. Общее число кластеров 17, т.е. для управления режимом (полного покрытия) всей ЭЭС необходимо установить 17 ААУ, по одному в каждом кластере. Следует отметить, что в упорядоченной матрице, представленной на рис. 6, присутствуют элементы, не входящие в тот или иной диагональный блок. Строки, содержащие такие элементы, соответствуют узлам, содержащие такие элементы, соответствуют узлам, которые могут входить в зоны влияния ААУ, установленных в узлах другого кластера. С учетом относительно малого числа таких элементов, учет таких случаев при использовании дробно-полиномиальных зависимостей сложности не представляет.

Решение задачи кластеризации позволяет определить число и размещение ААУ, необходимых для покрытия ЭЭС зонами влияния, и, соответственно, для управления режимом ЭЭС. Важным результатом является также определение кластеров ЭЭС, в которых возможно независимое управление режимом. Использование данных результатов позволяет повысить эффективность решения задач управления и оптимизации режимов ЭЭС [9, 14]. Кроме того, полученные результаты могут быть использованы для решения других актуальных задач электроэнергетики, таких как определение показателей балансовой надежности [15, 16], локализация источника помехи в ЭЭС [17], обеспечение электромагнитной совместимости оборудования ЭЭС [18], идентификация электрических сетей [19, 20].

**Оптимизация режимов ЭЭС СПб и ЛО.** Тестирование предложенных подходов к определению зависимостей параметров режима ЭЭС от электромагнитных параметров ААУ, определению их зон влияния и кластеризации сети показало их эффективность для оптимизации режимов крупных энер-

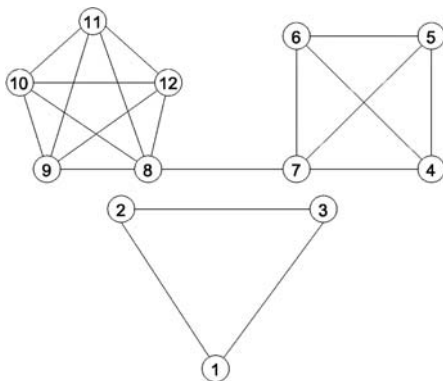


Рис. 5. Типичная структура графа, соответствующего матрице взаимных влияний, и его упорядочение алгоритмом минимальной степени

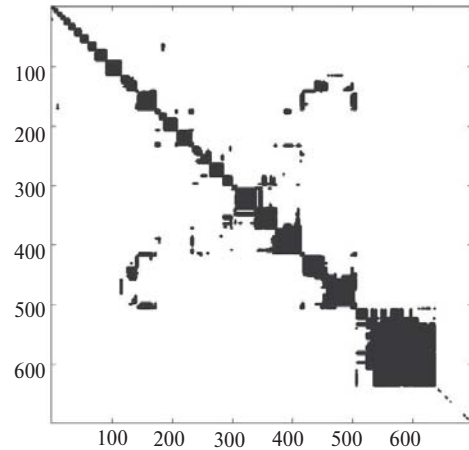


Рис. 6. Результаты упорядочения матрицы взаимных влияний узлов для  $Q_{AAU} = 50$  Мвар с использованием алгоритма минимальной степени

госистем [5, 10, 14]. С использованием полученных результатов для ЭЭС СПб и ЛО решена задача поиска наилучших мест установки управляемых устройств поперечной компенсации реактивной мощности (рассматриваемых как ААУ) по критерию минимизации потерь активной мощности. Для решения задачи использован вариант кластеризации ЭЭС СПб и ЛО, полученный по матрице взаимных влияний узлов при  $Q_{AAU} = 50$  Мвар (17 кластеров). Выбранные в результате решения данной задачи наилучшие места установки рассматриваемых устройств с указанием достигнутого в соответствии с заданным критерием эффекта приведены далее:

Номер и название узла		Снижение потерь мощности, кВт
53091	ТЭЦ-17	683
1568	Ломоносов N39	634
246	Кингисепп	1003
2260	Манушкино N 244	865
1733	Пушкин Южная N185	696
2265	Дубровская ТЭЦ-8	826
1448	Веймарн т.	825
2009	Выборг-Южная	2225
2225	Оккервильская N334	778

Всего было выбрано 9 мест установки в 17 кластерах. Это означает, что в 9 кластерах предложено установить рассматриваемые устройства, в остальных кластерах их установка по заданному критерию (минимум потерь) не целесообразна.

Для поиска оптимальных параметров ААУ, соответствующих минимуму потерь в каждом кластере ЭЭС, использована дробно-полиномиальная зависимость потерь активной мощности  $DP$  от параметра ААУ [2]:

$$DP = \frac{B_0^{(j)} + B_1^{(j)} Y_{\text{var}} + B_2^{(j)} Y_{\text{var}}^2}{1 + 2 \operatorname{Re}(C^{(j)}) Y_{\text{var}} + |C^{(j)}|^2 Y_{\text{var}}^2}, \quad (3)$$

где в качестве регулируемого параметра выступала проводимость  $Y_{\text{var}}$  – параметр ААУ, установленно-го в узле  $j$ ;  $B_0^{(j)}$ ,  $B_1^{(j)}$ ,  $B_2^{(j)}$ ,  $C^{(j)}$  – комплексные константы.

Применение (3) позволило существенно упростить решение задачи минимизации потерь активной мощности. Для каждого варианта установки выполнялось только два расчёта режима ЭЭС – для определения констант, входящих в (3), далее поиск минимума осуществлялся градиентным методом. Также задача поиска минимума потерь может быть решена с помощью эволюционных алгоритмов [21, 22]. Кластеризация сети существенно снизила объём расчётов, позволяя выполнять минимизацию (3) для каждого кластера отдельно. Решение данной задачи без использования кластеризации требует перебора большого числа вариантов установки ААУ и расчёта потерь для каждого из них.

В результате решения рассмотренной задачи потери мощности в ЭЭС СПб и ЛО были снижены суммарно на 4%. Данный эффект был достигнут установкой в данной ЭЭС девяти управляемых устройств поперечной компенсации – ААУ мощностью по  $\pm 50$  Мвар каждое. Полученные результаты подтверждены контрольными расчётами режимов в программно-вычислительном комплексе «RastrWin».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Laszio G., Hingorani N.G. Understanding FACTS. Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems. – New York, 2006, 353 p.
2. Беляев Н.А., Коровкин Н.В., Чудный В.С. Математическое описание влияния управляемых сетевых устройств на режим электроэнергетических систем. – Электричество, 2014, № 2, с. 18–24.
3. Гехер К. Теория чувствительности и допусков электронных цепей. – М.: Советское радио, 1973, 200 с.
4. Беляев Н.А., Коровкин Н.В., Фролов О.В., Чудный В.С. Использование билинейной теоремы для решения задач оптимизации потоков мощностей в энергосистемах. – Электротехнические комплексы и системы управления, 2012, № 1, с. 77–80.
5. Беляев Н.А., Коровкин Н.В., Фролов О.В., Чудный В.С. Исследование методов оптимизации режимов работы энергосистем. – Электротехника, 2013, № 2, с. 21–29.
6. Гамм А.З., Голуб И.И. Адресность передачи активных и реактивных мощностей в электроэнергетической системе. – Электричество, 2003, № 3, с. 9–16.
7. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В. Теоретические основы электротехники: Учебник для вузов, т.1; 2. – СПб: Питер, 2009, т. 1 512 с., т. 2 430 с.
8. Подиновский В.В., Ногин В.Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. – М.: Наука, 1982, 256 с.
9. Волков А.Н., Коровкин Н.В., Соколова О.Н., Сорокин Е.В., Фролов О.В. Методика оптимизации управляющих воздействий в послеаварийных режимах энергосистемы мегаполиса. – Электрические станции, 2010, № 11, с. 33–37.
10. Коровкин Н.В., Фролов О.В. Новый подход к исследованию режимов работы энергосистем. – Известия РАН. Энергетика, 2012, № 6, с. 39–47.
11. Коровкин Н.В., Фролов О.В., Лисицин А.А., Язенин Р.А. Методика определения зависимостей параметров установленного режима энергосистемы от потенциальных управляющих воздействий. – Известия НТЦ Единой энергетической системы, 2012, № 2(67), с. 26–34.
12. Тьюарсон Р. Разреженные матрицы. – М.: Мир, 1977, 172 с.
13. Джордж А., Лю Дж. Численное решение больших разреженных систем уравнений. – М.: Мир, 1984, 334 с.
14. Беляев Н.А., Коровкин Н.В., Фролов О.В., Чудный В.С. Управление активно-адаптивной сетью и оптимизация потоков мощности в интеллектуальных энергосистемах. – Энергия единой сети, 2013, № 4, с. 80–87.
15. Беляев Н.А., Егоров А.Е., Коровкин Н.В., Чудный В.С. Анализ балансовой надёжности как актуальная задача развития ЭЭС ЕЭС России. – Научно-технические ведомости СПбГПУ, 2013, № 2(171), с. 12–21.
16. Беляев Н.А., Егоров А.Е., Коровкин Н.В., Чудный В.С. Расчет оперативного резерва мощности в энергосистемах. – Известия НТЦ Единой энергетической системы, 2013, № 2(69), с. 50–68.
17. Коровкин Н.В., Адалев А.С. Метод локализации источника помехи в электрической схеме. – Известия РАН. Энергетика, 2009, № 4, с. 98–107.
18. Korovkin N., Chechurin V., Hayakawa M. Inverse problems in electric circuits and electromagnetics. – USA: Springer, 2006, 350 p.
19. Korovkin N., Adalev A., Hayakawa M. Identification of electric circuits described by ill-conditioned mathematical models. – IEEE Tran. on Circuits and Systems I, 2006, 53 (1), pp. 78–91.
20. Korovkin N., Adalev A., Hayakawa M. Using linear relations between experimental characteristics in stiff identification problems of linear circuit theory. – IEEE Trans. on Circuits and Systems I, 2008, 55 (5), pp. 1237–1247.
21. Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Генетические алгоритмы: Уч. пособие – М.: Физматлит, 2006, 320 с.
22. Korovkin N., Adalev A., Hayakawa M. De-embedding microwave fixtures with the genetic algorithm. – Proc. 6th Int. Symp. on EMC. St.-Petersburg, 2005, pp. 190–194.

[19.02.14]

*А в т о р ы : Беляев Николай Александрович окончил электромеханический факультет С.Петербургского государственного политехнического университета (СПбГПУ) в 2012 г. Инженер ОАО «Научно-технический центр Единой энергетической системы» (НТЦ ЕЭС).*

*Коровкин Николай Владимирович окончил электромеханический факультет Ленинградского политехнического института (ныне Национальный исследовательский Санкт-Петербургский государственный политехнический университет НИ СПбГПУ) в 1977 г. В 1997 г. защитил докторскую диссертацию «Построение синтетических схем для численного анализа электромагнитных процессов, описываемых жесткими уравнениями». Профессор, заведующий кафедрой «Теоретические основы электротехники» НИ СПбГПУ.*

*Фролов Олег Валерьевич окончил электромеханический факультет (ЭМФ) СПбГТУ в 1995 г. В 2007 г. защитил кандидатскую диссертацию «Оптимизация режимов энергосистемы северо-запада на основе применения фазорегулирующих устройств». Генеральный директор ОАО НТЦ ЕЭС.*

*Чудный Владимир Сергеевич окончил ЭМФ СПбГПУ в 1998 г. В 2002 г. защитил кандидатскую диссертацию «Оптимизация параметров воздушных линий постоянного тока сверх- и ультравысокого напряжения с учетом требований надежности и экологии». Доцент кафедры «Электрические системы и сети» НИ СПбГПУ.*

*Elektrichestvo (Electricity)*, 2014, No. 10, pp. 4–11.

## Optimizing the Placement of Active-Adaptive Devices in Electric Power Systems

N.A. BELYAEV, N.V. KOROVKIN, O.V. FROLOV, and V.S. CHUDNYI

*An approach to optimizing the parameters and placement of active-adaptive devices (AADs) in electric power systems (EPSs) is proposed. The approach is implemented with extensive use of rational-polynomial dependences of the ERS operating parameters on the AAD parameters. The approach is based on decomposing the EPS into clusters and performing independent control of EPS operating modes inside the clusters. To solve the problem of decomposing the EPS into clusters, the notion of AAD influence zones is introduced, a procedure for determining the influence zones is developed, and their main properties are investigated. The problem of decomposing an EPS into clusters is solved using the minimum degree algorithm. It is shown that by considering the influence zones one can estimate the influence of a large number of AADs on the EPS operating modes. Dependences of the AAD influence zone dimensions on the AAD parameters and location in the EPS are investigated. The effectiveness of the proposed approaches is demonstrated on the example of solving the problem of minimizing losses in the EPS of St. Petersburg and Leningrad region. The optimal number of AADs required for efficiently controlling the operating modes of this EPS is estimated. The particular substations for the optimal placement of shunting AADs with variable susceptance and rated capacity equal to 50 Mvar are indicated.*

**Key words:** electric power system, active-adaptive device, optimization, rational-polynomial dependence, control, cluster, influence zone

### REFERENCES

1. Laszio G., Hingorani N.G. Understanding FACTS. Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems. — New York, 2006, 353 p.
2. Belyayev N.A., Korovkin N.V., Chudnyi V.S. *Elektrichestvo (Electricity)*, 2014, No. 2, pp. 18–24.
3. Geher K. *Teoriya chuvstvitel'nosti i dopuskov elektronnykh tsepei* (Electronic circuit sensitivity and tolerances theory). Moscow. Publ. «Sovetskoye radio», 1973, 200 p.
4. Belyayev N.A., Korovkin N.A., Frolov O.V., Chudnyi V.S. *Elektrotechnicheskiye kompleksy i sistemy upravleniya (Electrotechnical complexes and control systems)*, 2012, No. 1, pp. 77–80.
5. Belyayev N.A., Korovkin N.V., Frolov O.V., Chudnyi V.S. *Elektrotehnika (Power Engineering)*, 2013, No. 2, pp. 21–29.
6. Gamm A.Z., Golub I.I. *Elektrichestvo (Electricity)*, 2003, No. 3, pp. 9–16.
7. Demirchyan K.S., Neiman L.R., Korovkin N.V. *Teoreticheskiye osnovy elektrotehniki, t.1, t. 2* (Theoretical Foundation of Electrical Engineering). St. Petersburg. Publ. «Piter», 2009, vol. 1–512 p., vol. 2–430 p.
8. Podinovskii V.V., Nogin V.D. *Pareto-optimal'nye resheniya mnogokriterial'nykh zadach* (Pareto optimal solutions of multicriterion problems). Moscow. Publ. «Nauka», 1982, 256 p.
9. Volkov A.N., Korovkin N.V., Sokolova O.N., Sorokin Ye.V., Frolov O.V. *Elektricheskkiye stantsii (Electrical stations)*, 2010, No. 11, pp. 33–37.
10. Korovkin N.V., Frolov O.V. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii nauk. Energetika (News of Russian Academy of sciences. Energetics)*, 2012, No. 6, pp. 39–47.
11. Korovkin N.V., Frolov O.V., Lisitsin A.A., Yazenin R.A. *Izvestiya NTTs Yedinoi energeticheskoi sistemy (News of the scientific-technical centre of unified Energysystem)*, 2012, No. 2(67), pp. 26–34.
12. T'yuarson R. *Rasrezhennyye matritsy* (Sparse matrix). Moscow. Publ. «Mir», 1977, 172 p.
13. George A., Lyu G. *Chislennoye resheniye bol'shikh rasrezhennykh system uravnenii* (Numerical solution of large sparse equation systems). Moscow. Publ. «Mir», 1984, 334 p.
14. Belyayev N.A., Korovkin N.V., Frolov O.V., Chudnyi V.S. *Energiya edinoi seti (Energy unified network)*, 2013, No. 4, pp. 80–87.
15. Belyayev N.A., Yegorov A.Ye., Korovkin V.S., Chudnyi V.S. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU (Scientific and technical statements of the SPbGPU)*, 2013, No. 2(171), pp. 12–21.
16. Belyayev N.A., Yegorov A.Ye., Korovkin N.V., Chudnyi V.S. *Izvestiya NTTs Edinoi energeticheskoi sistemy (News of the scientific-technical centre of the Unified Energy System)*, 2013, No. 2(69), pp. 50–68.
17. Korovkin N.V., Adalev A.S. *Izvestiya RAN. Energetika (News of Russian Academy of Sciences. Energetics)*, 2009, No. 4, pp. 98–107.
18. Korovkin N., Chechurin V., Hayakawa M. Inverse problems in electric circuits and electromagnetics. — USA: Springer, 2006, 350 p.
19. Korovkin N., Adalev A., M. Hayakawa. Identification of electric circuits described by ill-conditioned mathematical models. — IEEE Tran. on Circuits and Systems I, 2006, 53 (1), pp. 78–91.
20. Korovkin N., Adalev A., Hayakawa M. Using linear relations between experimental characteristics in stiff identification problems of linear circuit theory. — IEEE Trans. on Circuits and Systems I, 2008, 55 (5), pp. 1237–1247.
21. Gladkov L.A., Kureichik V.V., Kureichik V.M. *Geneticheskkiye algoritmy* (Genetic algorithms). Moscow. Publ. «Fizmatlit», 2006, 320 p.
22. Korovkin N., Adalev A., Hayakawa M. De-embedding microwave fixtures with the genetic algorithm. Proc. 6th Int. Symp. on EMC. St.-Petersburg, 2005, pp. 190–194.

*Authors: Belyayev Nikolai Aleksandrovich (St. Petersburg, Russia) graduated from electromechanical department of the S.Peterburg State Polytechnical University (SPSPU) in 2012. He is a Engineer of the JSC «Scientific and Technical Centre of the Unified Energy System» (STC UES).*

*Korovkin Nikolay Vladimirovich (St. Petersburg, Russia) graduated from the electromechanical department of the Leningrad Polytechnical Institute (now – National Scientific St. Petersburg State Polytechnical University – NS SPSPU) in 1977. In 1997 he received the degree Doctor Techn. Sci. He is a Head of the Department of the NSSPSPU.*

*Frolov Oleg Vasil'yevich (St. Petersburg, Russia) graduated from the electromechanical department of the SPSPU in 1995. In 2007 he received the degree Cand. Techn. Sci. General director of the STC UES.*

*Chudnyi Vladimir Sergeyevich (St. Petersburg, Russia) graduated from the electromechanical department of the SPSPU in 1998. In 2003 he received the degree Cand. Techn. Sci. He is a associate professor in the department of the NSSPSPU.*



11. **Korovkin N.V., Frolov O.V., Lisitsin A.A., Yazenin R.A.** Izvestiya NTTs Yedinoi energeticheskoi sistemy (News of the scientific-technical centre of unified Energysystem), 2012, No. 2(67), pp. 26–34.
12. **T'yuaronson R.** Rasrezhennye matritsy (Sparse matrix). Moscow. Publ. «Mir», 1977, 172 p.
13. **George A., Lyu G.** Chislennoye resheniye bol'shikh rasrezhennykh system uravnenii ( ). Moscow. Publ. «Mir», 1984, 334 p.
14. **Belyayev N.A., Korovkin N.V., Frolov O.V., Chudnyi V.S.** Energiya edinoi seti (Energy unified network), 2013, No. 4, pp. 80–87.
15. **Belyayev N.A., Yegorov A.Ye., Korovkin V.S., Chudnyi V.S.** Nauchno-tekhicheskiye vedomosti SPbGPU (Scientific and technical statements of the SPbGPU), 2013, No. 2(171), pp. 12–21.
16. **Belyayev N.A., Yagorov A.Ye., Korovkin N.V., Chudnyi V.S.** Izvestiya NTTs Edinoi energeticheskoi sistemy (News of the scientific-technical centre of the Unified Energy System), 2013, No. 2(69), pp. 50–68.
17. **Korovkin N.V., Adalev A.S.** Izvestiya RAN. Energetika (New of Russian Academy of Sciences. Energetics), 2009, No. 4, pp. 98–107.
18. **Korovkin N., Chechurin V., Hayakawa M.** Inverse problems in electric circuits and electromagnetics. — USA: Springer, 2006, 350 p.
19. **Korovkin N., Adalev A., M. Hayakawa.** Identification of electric circuits described by ill-conditioned mathematical models. — IEEE Tran. on Circuits and Systems I, 2006, 53 (1), — pp. 78–91.
20. **Korovkin N., Adalev A., Hayakawa M.** Using linear relations between experimental characteristics in stiff identification problems of linear circuit theory. — IEEE Trans. on Circuits and Systems I, 2008, 55 (5), pp. 1237–1247.
21. **Gladkov L.A., Kureichik V.V., Kureichik V.M.** Geneticheskiye algoritmy (Genetic algorithms). Moscow. Publ. «Fizmatlit», 2006, 320 p.
22. **Korovkin N., Adalev A., Hayakawa M.** De-embedding microwave fixtures with the genetic algorithm. Proc. 6th Int. Symp. on EMC. St.-Petersburg, 2005, pp. 190–194.

*Authors: **Belyayev Nikolai Aleksandrovich** (St. Peterburg) graduated from electromechanical department of the S.Peterburg State Polytechnical University (SPSPU) in 2012. He is a Engineer of the JSC «and Technical Centre of the Unified Energy System» (STC UES).*

***Korovkin Nikolay Vladimirovich** (St. Peterburg, Russia) graduated from the electromechanical department of the Leningrad Polytechnical Institute (now – National Scientific St. Peterburg State Polytechnical University – NS SPSPU) in 1977. In 1997 he received the degree Doctor Techn. Sci. He is a Head of the Department of the NSSPSPU.*

***Frolov Oleg Vasil'yevich** (St. Peterburg, Russia) graduated from the electromechanical department of the SPSPU in 1995. In 2007 he received the degree Cand. Techn. Sci. General director of the STC UES.*

***Chudnyi Vladimir Sergeevich** (St. Peterburg, Russia) graduated from the electromechanical department of the SPSPU in 1998. In 2003 he received the degree Cand. Techn. Sci. He is a associate professor in the department of the NSSPSPU.*