

## Декомпозиция сложной динамической системы с сетевой архитектурой на базе диакоптики Крона

*В.А. Шевченко, М.Ю. Медведев, А.С. Назаркин*

*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону*

**Аннотация:** В работе представлен метод декомпозиции сложной динамической системы с сетевой архитектурой на базе диакоптического подхода Крона. Предложенный метод направлен на выделение независимых сегментов сети, удаление которых из общей структуры не повлияет на общую работоспособность системы. Сегменты формируются как простые пути в графовой модели системы с наименьшим весом инцидентных ребер и проверкой условия сохранения баланса потока продукта в приложении к транспортной задаче. В общем случае, представленный метод декомпозиции позволяет разделить сложный технический объект сетевой архитектуры на подсистемы, упрощая процесс анализа и управления. В случае, когда общая задача управления и динамика взаимодействия подсистем позволяет разбить систему на несвязанные сегменты, или ограничить взаимодействие по некоторым линиям, метод позволяет снизить нагрузку на передающие элементы системы.

**Ключевые слова:** декомпозиция, сложная динамическая система, сеть, графоаналитический метод, сегментация сети, диакоптика, снижение нагрузки.

### Введение

Большинство реальных технических систем представляют собой многосвязные сложные динамические объекты, состоящие из большого числа связанных между собой элементов. В качестве примеров могут выступать сеть позиционируемых орбитальных спутников [1, 6], группы подвижных объектов [2], сети сенсорных систем [3], энергосистема [4], распределенные компьютерные системы [5], бумагоделательные машины [6], газотурбинные двигатели [7], радиолокационные станции [8] и т.д. Традиционные методы декомпозиции, такие как метод сингулярных возмущений, метод фазового пространства, метод разделения движения [9], метод асимптотического расщепления математической модели [10] и т.п. применимы к динамическим системам сетевой архитектуры небольшой размерности. В случае разделения разветвленной сложной динамической сети, анализ данными методами усложняется и сводится к поиску слабых связей, что может привести к разделению системы не на подсистемы, а на

---

отдельные элементы. Наиболее предпочтительными методами декомпозиции таких систем являются топологические методы, основанные на диакоптика Крона [11]. Применение топологических методов декомпозиции на основе методов диакоптика Крона с введением условия минимизации весов внутри подсистем и сохранения баланса весов позволит разделять сеть на независимые сегменты, функционирование которых направлено на выполнение общей задачи, а выделение из общей структуры не повлияет на общую работоспособность. Дальнейших анализ и управление разделенной динамической системы возможен известными методами [12, 13].

В работе рассматривается задача декомпозиции сложной динамической системы с сетевой архитектурой. Графическая модель динамической системы представлена в виде двудольного графа, где множество вершин графа  $M$  разбито на два подмножества  $X$  – передающие элементы и  $Y$  – потребляющие элементы системы, так что  $X \subseteq M$  и  $Y \subseteq M$ ,  $X \cup Y = M$ ,  $X \cap Y = M_{XY}$ , где  $M_{XY}$  – множество элементов, являющихся и передатчиками и потребителями в зависимости от состояния и условия функционирования. Связь между элементами системы из  $X$  и  $Y$  описывается потоком продукта, переданного от  $X_i$  к  $Y_j$ .

### Метод декомпозиции

Рассмотрим динамическую систему, представленную на рис. 1. Многосвязная модель системы представляет собой двудольный граф, с одной стороны которого передающие элементы  $X_i$ , с другой стороны потребляющие элементы  $Y_j$ , каждая вершина графа имеет несколько инцидентных ей ребер, что отражает возможные каналы транспортировки некоторого продукта. Продуктом может являться мощность в энергосети, поток газа в газораспределительных системах и т.п. Задача декомпозиции заключается в определении участков сети, выделение которых из общей системы не

---

повлияет на общую работоспособность и возможность достижения общей цели работы системы. Такая постановка задачи позволяет выделять сегменты с точки зрения минимизации веса инцидентных ребер, в случае, когда весом является значение стоимости или затрат при прохождении полученного пути, появляется возможность минимизировать нагрузку на передающие элементы системы. Наиболее предпочтительным каналом транспортировки продукта может считаться путь, способный передавать наибольшее количество продукта при наименьших затратах. Таким образом, к каждому ребру в соответствие ставится значение величины потерь на пути  $W_{ij}$ , а каждой вершине ставится в соответствие значение произведенного  $P_{gi}$  или потребленного  $P_{pj}$  продукта.

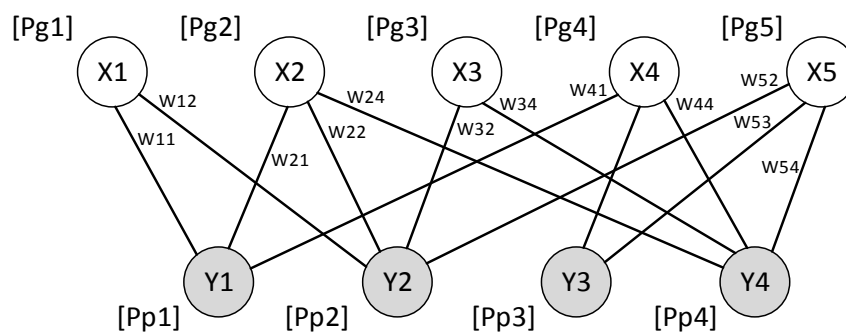


Рис. 1. – Сегмент динамической системы

Необходимо выделить граф, в котором каждый потребитель будет связан с двумя передающими элементами, способными обеспечить его потребности в продукте с некоторым запасом  $R$ . Определять эти передатчики необходимо с учетом минимальности затрат при транспортировке продукта. Для этого построим приведенную матрицу смежности графа для вершин из доли  $Y_j$ , где показателем смежности будет выступать вес инцидентного ребра к смежным вершинам:

$$A = Y_j \begin{bmatrix} X_i \\ W_{ij} \end{bmatrix}$$

В случае, если вершины не являются смежными  $W_{ij} = 0$ . Для рассматриваемого графа (рис. 1) приведенная матрица смежности примет вид:

$$A = \begin{matrix} & X_1 & X_2 & X_3 & X_4 & X_5 \\ \begin{matrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ Y_4 \end{matrix} & \begin{bmatrix} W_{11} & W_{21} & 0 & W_{41} & 0 \\ W_{12} & W_{22} & W_{32} & 0 & W_{52} \\ 0 & 0 & 0 & W_{43} & W_{53} \\ 0 & W_{24} & W_{34} & W_{44} & W_{54} \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Выделим матрицу  $A_{m2}$ , которая будет содержать две смежных вершины к  $Y_j$  (каждому элементу из множества  $Y$ ) с минимальным весом инцидентных ребер, так чтобы удовлетворялось условие:

$$A_{m2} = [Z_{Y \times X}^*] + [Z_{Y \times X}^{**}],$$

где  $Z^*(n, X) = A(n, X) \rightarrow \min,$   
 $Z^{**}(n, X) = A^*(n, Y) \rightarrow \min, A^* = A - Z_{Y \times X}^*,$   
 $n = 1, \dots, Y$

где  $Z_{Y \times X}^*$  - нулевая матрица с ненулевым элементом  $Z^*(n, X)$  в каждой строке, который равен минимальному элементу по каждой строке матрицы  $A_{Y \times X}$ .

Введем систему условий для весов ребер:

$$\begin{aligned} Y_1 &: W_{11} < W_{21} < W_{41}; \\ Y_2 &: W_{22} < W_{32} < W_{12} < W_{52}; \\ Y_3 &: W_{43} < W_{53}; \\ Y_4 &: W_{54} < W_{44} < W_{34} < W_{24}. \end{aligned}$$

Исходя из системы условий определим матрицу  $A_{m2}$ :

$$A_{m2} = \begin{bmatrix} W_{11} & W_{21} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & W_{22} & W_{32} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & W_{43} & W_{53} \\ 0 & 0 & 0 & W_{44} & W_{54} \end{bmatrix}$$

Таким образом, получено два не связанных между собой графа (рис. 2).

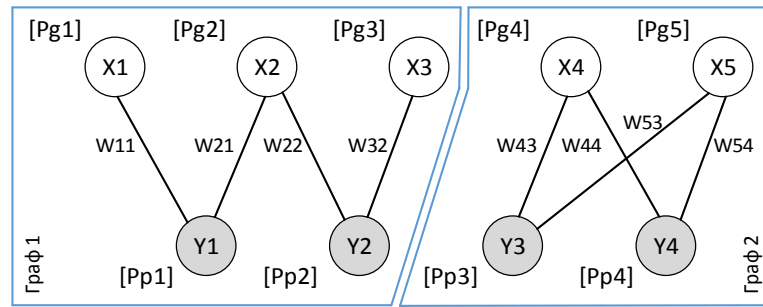


Рис. 2. – Декомпозиция динамической системы (шаг 1)

Для выделения полученных графов в отдельные сегменты сети необходимо, чтобы выполнялись два условия:

$$\begin{cases} P_{pj} \leq (1 - R) \cdot \sum P_{gi}, & i \in A_{m2}(Y_j, :), j \in A_{m2}^*(Y_j, X_i); & \text{неравенство (1.1)} \\ \sum P_{pj} \leq (1 - R) \cdot \sum P_{gi}, & i \in A_{m2}(Y_j, :), j \in A_{m2}^*(Y_j, X_i). & \text{неравенство (1.2)} \end{cases} \quad (1)$$

где  $A_{m2}(Y_j, :)$  - множество связанных вершин к вершине  $Y_j$ , полученное из матрицы  $A_{m2}$ ;  $A_{m2}^*(Y_j, X_i)$  - множество вершин, сформированное из простых путей, полученное из матрицы  $A_{m2}$ ,  $P_{pj}$  – количество продукта необходимое  $j$ -ому потребителю, для устойчивого функционирования в группе,  $P_{gi}$  – количество продукта, которое может быть произведено  $i$ -ым передающим элементом,  $R$  – уровень требуемого запаса продукта до максимальной производительности передатчика.

Проверяем полученные графы (рис. 2) на соответствие условиям (1):

$$\begin{cases} \text{Граф 1:} \begin{cases} P_{p1} \leq 0.8 \cdot (P_{g1} + P_{g2}); & \text{неравенство (2.1.a)} \\ P_{p2} \leq 0.8 \cdot (P_{g2} + P_{g3}); & \text{неравенство (2.1.б)} \\ P_{p1} + P_{p2} \leq 0.8 \cdot (P_{g1} + P_{g2} + P_{g3}). & \text{неравенство (2.2)} \end{cases} \\ \text{Граф 2:} \begin{cases} P_{p3} \leq 0.8 \cdot (P_{g4} + P_{g5}); & \text{неравенство (2.1.a)} \\ P_{p4} \leq 0.8 \cdot (P_{g4} + P_{g5}); & \text{неравенство (2.1.б)} \\ P_{p3} + P_{p4} \leq 0.8 \cdot (P_{g4} + P_{g5}). & \text{неравенство (2.2)} \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

Легко заметить, что в случае полного не выполнения неравенства (2.1) не выполняется и (2.2), но в случае не выполнения (2.2) неравенство (2.1)

может быть выполнено частично (например, неравенство (2.1.a) - верно, а (2.1.б) – неверно), так же может быть случай при котором (2.2) – верно, а (2.1) выполняется частично. Если все неравенства выполняются, можно считать, что сформированы сегменты системы. В случае, когда частично выполняется (2.1), определяем вершины из множества Y, для которых (2.1) неверно и выделяем очередную смежную вершину из множества X с наименьшим весом инцидентного ребра, и формируем матрицу  $A_{m3}$ :

$$A_{m3} = A_{m2} + [Z_{Y \times X}^*], \text{ при } P_{pj} > 0.8 \cdot \sum P_{gi}, \sum P_{pj} \leq 0.8 \cdot \sum P_{gi}, \quad (3)$$

где  $Z^*(Y_j, X) = A^*(Y_j, X) \rightarrow \min, A^* = A - A_{m2}$ .

Предположим, что неравенство (2.1.б) для графа 1 не выполняется, в этом случае определим матрицу  $Z_{Y \times X}^*$  и  $A_{m3}$ , и построим графы 1 и 2 (рис. 3) по полученной матрице  $A_{m3}$ :

$$Z_{Y \times X}^* = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ W_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; A_{m3} = \begin{bmatrix} W_{11} & W_{21} & 0 & 0 & 0 \\ W_{12} & W_{22} & W_{32} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & W_{43} & W_{53} \\ 0 & 0 & 0 & W_{44} & W_{54} \end{bmatrix}$$

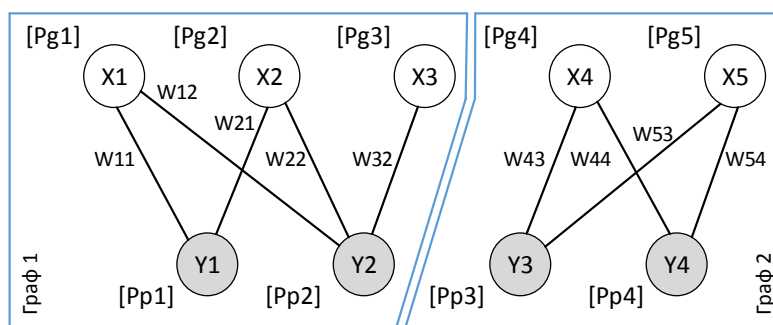


Рис. 3. – Декомпозиция динамической системы (шаг 2)

Если частично выполняется (2.1) и не выполняется (2.2), то необходимо искать смежную вершину не принадлежащую к множеству  $A_{m2}^*(Y_j, X_i)$ .

$$A_{m3} = A_{m2} + [Z_{Y \times X}^*], \text{ при } P_{pj} > 0.8 \cdot \sum P_{gi}, \sum P_{pj} > 0.8 \cdot \sum P_{gi}, \quad (4)$$

где  $Z^*(Y_j, X^*) = A^*(Y_j, X^*) \rightarrow \min, A^* = A - A_{m2}, X^* \in (X \setminus A_{m2}^*(Y_j, X_i))$ .

Предположим, что (2.1.б) и (2.2) для графа 1 не выполняется, в этом случае определим матрицу  $Z_{Y \times X}^*$  и  $A_{m3}$ , и построим графы 1 и 2 (рис. 4) по полученной матрице  $A_{m3}$ :

$$Z_{Y \times X}^* = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & W_{52} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad A_{m3} = \begin{bmatrix} W_{11} & W_{21} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & W_{22} & W_{32} & 0 & W_{52} \\ 0 & 0 & 0 & W_{43} & W_{53} \\ 0 & 0 & 0 & W_{44} & W_{54} \end{bmatrix}$$

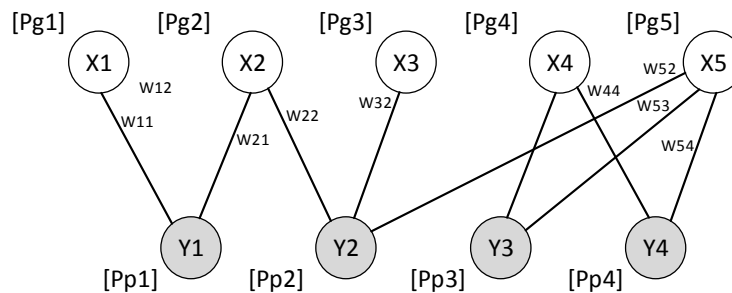


Рис. 4. – Декомпозиция динамической системы (шаг 3)

В случае с графом 1 (рис. 3) смежная вершина нашлась из множества вершин графа 2, формируя единый простой путь из обоих графов (рис. 4). Таким образом, множество  $A_{m2}^*(Y_j, X_i)$  графа 1 пополняется аналогичным множеством графа 2, и этот сегмент становится единым и выделяется при выполнении (1). Если неравенства (1) не выполняются происходит возврат к поиску очередной смежной вершине по (3) или (4), в зависимости от того, какое неравенство не выполняется.

В общем случае задача нахождения смежных вершин при невыполнении неравенств (1) запишется в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} A_{mk} = A_{m(k-1)} + [Z_{Y \times X}^*], \text{ при } P_{pj} > 0.8 \cdot \sum P_{gi}, \sum P_{pj} \leq 0.8 \cdot \sum P_{gi}, k > 2, \\ Z^*(Y_j, X) = A^{*(k-1)}(Y_j, X) \rightarrow \min, A^{*(k-1)} = A - A_{m(k-1)}. \\ A_{mk} = A_{m(k-1)} + [Z_{Y \times X}^*], \text{ при } P_{pj} > 0.8 \cdot \sum P_{gi}, \sum P_{pj} > 0.8 \cdot \sum P_{gi}, k > 2, \\ Z^*(Y_j, X^*) = A^{*(k-1)}(Y_j, X^*) \rightarrow \min, A^{*(k-1)} = A - A_{m2}, X^* \in (X \setminus A_{m2}^*(Y_j, X_i)). \end{array} \right. \quad (5)$$

где  $k$  – количество повторений цикла поиска смежных вершин, начинается с  $k=3$  (т.к. происходит поиск третьих смежных вершины из  $X$  для некоторого количества вершин из  $Y$ ), при первом прохождении по системе уравнений (5).

При завершении цикла поиска смежных вершин и формировании сегмента, можно сказать, что полученная матрица  $A_{mk}$  - является матрицей смежности для сегмента сети, заполненная связанными между собой вершинами и по ребрам между которых происходит передача продукции. Тогда определим матрицу смежности для вершин связанных, но не участвующих в процессе транспортировки продукта (связь существует, но будет задействована в аварийных и нештатных ситуациях):

$$A_{ne} = A - A_{mk}$$

Для сегментов, сформированных на рисунке 3, определим матрицу  $A_{ne}$ ,  $A_{mk}$  и построим полученные сегменты с учетом временно незадействованных ребер (рис. 5):

$$A_{mk} = \begin{bmatrix} W_{11} & W_{21} & 0 & 0 & 0 \\ W_{12} & W_{22} & W_{32} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & W_{43} & W_{53} \\ 0 & 0 & 0 & W_{44} & W_{54} \end{bmatrix}, k = 3; A_{ne} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & W_{41} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & W_{52} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & W_{24} & W_{34} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

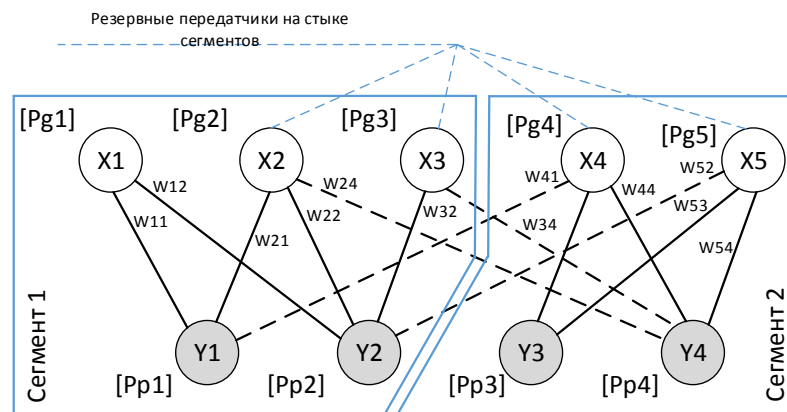


Рис. 5. – Декомпозиция динамической системы (шаг 4)

Для структуризации логики решения задач декомпозиции построим блок-схему предложенного алгоритма (рис. 6).



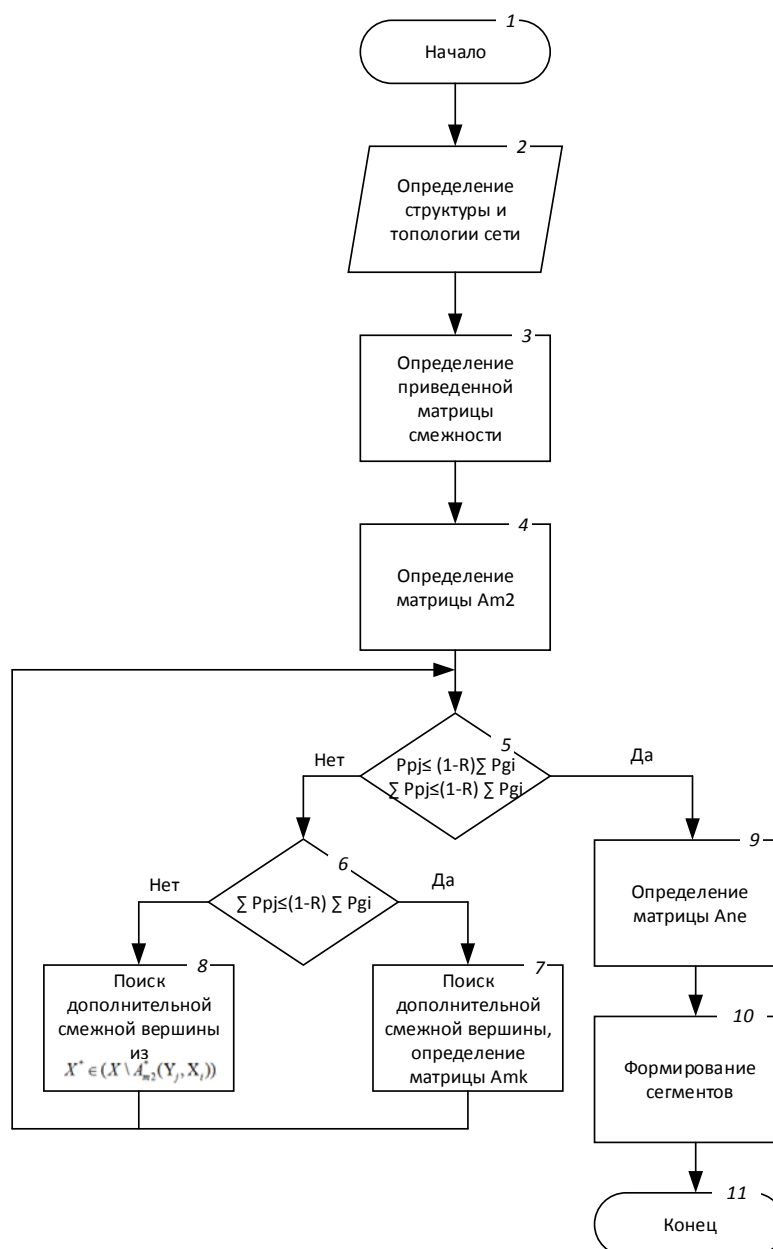


Рис. 6. – Блок-схема алгоритма декомпозиции

### Диакоптический подход к декомпозиции на примере энергосети

Сегментация энергосети широко рассматривается в зарубежной научной литературе, где процесс сегментации рассматривают как создание «островов» связанного линиями энергооборудования. Необходимость разделения глобальной энергосети на острова возникает из необходимости уменьшения взаимного влияния энергетического оборудования в аварийном

режиме, повышения устойчивости системы в нештатных ситуациях, и предотвращения каскадных отключений.

Стратегии разделения энергосети на сегменты (острова) можно разбить на два типа по принципу применимости: активные стратегии и пассивные [22]. Активные стратегии, описанные в [14-18], рассматривают задачу разделения энергосистемы как намеренное разбиение сети на отдельные части, для превентивного противостояния аварийным и нештатным ситуациям, таким как ресинхронизация генераторов, незатухающие возмущения, лавина напряжения, каскадные отключения и т.д. Пассивные стратегии, описанные в [19-22], рассматривают разделение энергосети в контексте аварийной ситуации, и разрабатываемые методы ориентированы на применение в сложившейся ситуации в кратчайшие сроки, для отмежевания от аварийного участка сети. Для пассивных методов одним из важных критериев является скорость сходимости алгоритмов сегментации, от чего зависит результативность всей стратегии разделения сети, но в то же время они более применимы в реалиях сложившейся структуры энергосистем. При разработке таких алгоритмов возникает задача достижения баланса между скоростью вычислений и выбором оптимальной топологии острова, что приводит к необходимости применять самые простые подходы к разделению, такие, например, как принцип максимальной удаленности [20] или минимальности количества связующих линий [19]. Активные методы разделения функционируют вне временных рамок и могут оптимизировать полученные острова по многим критериям, исследуя неограниченное количество полученных островов на лучшее соответствие заданным критериям. В тоже время активные методы требуют изменения топологии энергосети и отключения линий [16-18], связующих острова, что не всегда применимо в условиях реально функционирующих энергосистем.

---

В пассивных методах, зачастую, не рассматривается вопрос обеспечения баланса мощности внутри полученных сегментов, что при разделении энергосети может привести к серьезным системным нарушениям внутри сегментов или дополнительным принудительным отключениям нагрузки. Во всех рассмотренных методах, не решается задача минимизации потерь энергии при её транспортировке, т.к. считается, что потери в крупных энергосистемах не имеют решающего значения, ввиду относительно небольших значений. Однако, при сегментации энергосистемы таким образом, что внутри сегмента пути транспортировки энергии минимальны, а перетоки энергии из соседних сегментов ограничены, появляется возможность существенного снижения потерь энергии при соблюдении баланса мощности и сохранения устойчивости системы. Таким образом, применим предложенный алгоритм декомпозиции для энергоэффективного разделения энергосистемы, где вершинам в соответствие будут поставлены потребляемая и генерируемая мощность, а ребрам – потери мощности.

### **Моделирование**

Рассмотрим работу алгоритма на примере тестовой схемы IEEE 118-ти узловой энергосистемы в графическом представлении [20,21] (рисунок 7). На данной графической модели черные точки – узлы-нагрузка, белые точки – узлы-генераторы. При моделировании алгоритма сегментации каждому ребру графа, представленного графической моделью энергосети, в соответствие ставилось значение активного сопротивления линии. Данные линий, нагрузки, генераторов, параметров режима представлены в [23]. Результат работы алгоритма сегментации сети представлен на рисунке 8 и в таблице 1, требования к остаточному запасу мощности не вводился.

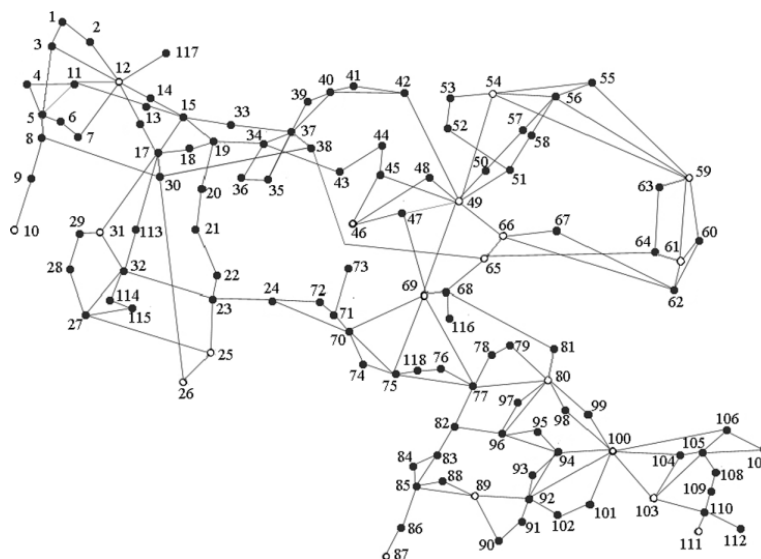


Рис. 7. – Графическая модель энергосети

Таблица 1

Результат работы алгоритма сегментации энергосети

№ сегмента	№ узлов, входящих в сегмент	Потребляемая мощность (МВт)	Запас мощности (МВт)
1	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 117	458	77
2	15, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 113, 114, 115	462	72
3	24, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 116, 118	1 859	23
4	76, 77, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 96, 102	600	11
5	78, 79, 80, 81, 94, 95, 97, 98, 99, 100, 101, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112	800	5

По результатам моделирования алгоритм декомпозиции разбил исходную сеть на пять сегментов, узлы, входящие в каждый сегмент перечислены в таблице 1. Учитывалась активная и полная потребляемая мощность внутри каждого сегмента при расчете баланса мощностей, а также максимальная генерирующая способность каждого источника энергии. Разность между максимальной генерацией и максимальной потребляемой

мощностью внутри сегмента записана в столбец «запас мощности» в Таблице 1.

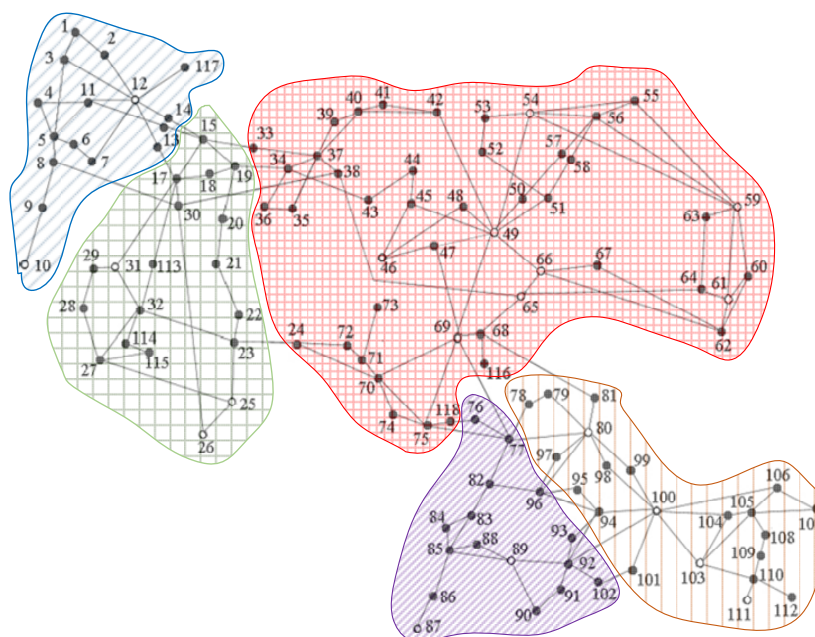


Рис. 8. – Результат работы алгоритма декомпозиции энергосети.

Проведем анализ энергетических потерь при перераспределении потоков мощности. Предположим, что энергосистема работает в нормальном режиме, а преднамеренное отключение межсегментарных связей не повлияет на параметры режима, и распределение потоков мощности по остальным линиям сохраняет баланс мощностей.

Разрыв линии связи между узлами 14-15 ограничивает поток активной мощности в 4.18 МВт. Анализ параметров режима показывает, что эта мощность передана из 12-го узла-генератора, путь потока мощности – от узла 12 до узла 15: 12-14-15. При ограничении поставок мощности по этому пути, возникает дефицит мощности в узле 15, который может быть восполнен из 26-го узла-генератора сегмента 2. При анализе потерь активной мощности будем оперировать активным сопротивлением линии  $R$ . Для линии 12-14-15:  $R=14$  Ом, для линии: 26-30-17-15: 12 Ом. Исходя из традиционного соотношения для расчета потерь в линии электропередач [24] получим, что при передаче мощности по линии 26-30-17-15 потери сократятся на 14.29 %

(с 0.05 МВт до 0.043 МВт) по сравнению с передачей по линии 12-14-15. Однако, дальнейший анализ режимов работы сегментов энергосети указывает на то, что эта мощность не принимает участия в формировании баланса мощностей внутри 2-го сегмента и передается дальше по линии 15-33 в 3-й сегмент, а при учете что мощностей в каждом сегменте достаточно, переток мощности по линии 12-15 можно ограничить без вреда для энергосистемы. Таким образом, необходимо рассмотреть образовавшийся дефицит мощности в 33-ем узле. По линии 15-33 передавалась мощность 7.22 МВт, из которых 4.21 и 0.74 МВт были транспортированы по линиям 12-14-15 и 10-9-8-5-4-11-13-15, соответственно. Активное сопротивление линии 12-33 составит 22.2 Ом, а линии 10-33 составит 57.3, в то время, как замещающая линия 65-38-37-33 имеет сопротивление 18.6 Ом. Таким образом, потери по линии 65-33 при передаче 4.95 МВт составят 0.012 МВт, а совокупные потери по линиям 12-33 и 10-33 составят 0.0401 МВт, что уменьшает потери на 70%. Проведем анализ для остальных линий, связывающих сегменты и результаты расчетов для линий, связывающих 1-ый и 2-ой сегмент сведем в Таблицу 2.

Таблица 2

Анализ потерь при перераспределении мощности.

Л.м.с. <sup>1</sup>	Путь тр. мощ. <sup>2</sup>	Мо щ. <sup>3</sup>	3. линия <sup>4</sup>	R1	R2	$\Delta 1$	$\Delta 2$	С. пот. <sup>5</sup>
14-15-33	12-14-15-33	4.18	65-38-37-33	22.2	18.6	4e-2	116e-4	71
13-15-33	10-9-8-5-4-11-13-15-33	0.74	65-38-37-33	57.3	18.6	105e-4	4e-4	96
16-17	26-30-17-16	17.6	10-9-8-5-6-7-12-16	18.1	14.57	0.93	0.207	77.7
8-30	10-9-8-30	74.2	26-30	11.1	9.5	0.61	0.44	27
Итого						1.59	0.659	58.5

1 – линия между сегментами (узлы); 2 – путь транспортировки мощности (узлы); 3 – мощность (МВт), 4 – замещающая линия; 5 – сокращение потерь (%); R1, R2 – активное сопротивление линии между сегментами и замещающей линии, соответственно,  $\Delta 1$ ,  $\Delta 2$  – потери по линии транспортировки мощности и по линии замещения.

Анализ перетоков мощности по линиям, связывающим сегменты энергосети, в сравнении с потерями мощности по замещающим линиям

внутри всей разделенной энергосистемы, показывает снижение потерь мощности на уровне 57 %. В зависимости от топологии сети и параметров её режима, расчётное снижение потерь мощности по замещающим линиям, связующим сегменты может варьироваться.

### **Вывод**

В статье предложен метод декомпозиции сложной динамической системы с сетевой архитектурой. Метод относится к классу топологических методов и основан на диакоптическом подходе Крона к исследованию сложных динамических систем по частям. В работе вводится ряд условий, отражающих сохранение баланса потока продукта между элементами. Таким образом, формируются сегменты, выделение которых из общей структуры не повлияет на общую работоспособность системы. В случае возможности физического разделения системы на сегменты, метод позволяет снизить нагрузку на передающие элементы по разомкнутым линиям связи до 55-60%. В ином случае, взаимодействие между сегментами учитывается по средствам анализа нового графа, где сегменты выступают в качестве элементов системы.

*Работа поддержана грантом Южного федерального университета №ВнГр-07/2017-15 «Разработка теоретических основ и методов построения интеллектуальных многосвязных систем управления процессами производства, транспортировки, распределения и потребления энергии»*

### **Литература**

1. R. Ghadami and B. Shafai, "Decomposition-Based Distributed Control for Continuous-Time Multi-Agent Systems" // IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 58, no. 1, pp. 258-264.

2. Куржанский А.Б. Задача управления групповым движением. Общие соотношения//Докл. РАН. 2009. Т. 426. № 1. С. 20-25.

3. I. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramniam, E. Cayirci, "A survey on sensor networks", IEEE Commun. Mag., no. 8, pp. 102-114.
4. E. Camponogara, D. Jia, B. H. Krogh and S. Talukdar, "Distributed model predictive control," in IEEE Control Systems Magazine, vol. 22, no. 1, pp. 44-52.
5. G. Cafaro, P. Pugliese and F. Vacca: Parallel solution of turn networks, International Journal of Electrical Power and Energy Systems 6 (1984), pp. 131–138.
6. P. Massioni and M. Verhaegen, "Distributed Control for Identical Dynamically Coupled Systems: A Decomposition Approach," in IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 54, no. 1, pp. 124-135.
7. Ахметханов Р. С., Банах Л. Я. Анализ вибрационных взаимодействий в роторных системах газотурбинного двигателя//Проблемы машиностроения и надежности машин. 1996. № 4. С. 29-33.
8. Банах Л.Я. Методы декомпозиции и редукции динамических моделей механических систем // Нелинейная динамика машин - SCHOOL-NDM 2017, сборник IV Международной Школы-конференции молодых ученых. 2017, С. 41-55.
9. Шаршеналиев Ж., Бакасова А.Б. О некоторых методах декомпозиции сложных динамических систем управления // Проблемы автоматизации и управления, №1 (22), 2012, с. 5-15.
10. Абгарян К.А. Асимптотическое расщепление уравнений линейной системы автоматического управления // ДАН СССР. 1966. Т. 166. № 2, с. 301-304.
11. Крон Г. Исследование систем по частям: диакоптика М.: Наука. 1972. 544 с.
12. Медведев М.Ю., Пшихопов В.Х., Шевченко В.А. Базовые алгоритмы адаптивного управления синхронным генератором с эталонной



моделью // Инженерный вестник Дона, 2015, №4, URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3321.

13. Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю., Федоренко Р.В., Гуренко Б.В., Чуфистов В.М., Шевченко В.А. Алгоритмы многосвязного позиционно-траекторного управления подвижными объектами // Инженерный вестник Дона, 2014, №4, URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2579.

14. Panteli, M., Trakas, D.N., Mancarella, P., Hatziargyriou, N.D. Boosting the Power Grid Resilience to Extreme Weather Events Using Defensive Islanding // IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(6), 7434044, pp. 2913-2922.

15. S. Pahwa, M. Youssef, P. Schumm, C. Scoglio, N. Schulz Optimal intentional islanding to enhance the robustness of power grid networks // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, Volume 392, Issue 17, 1 September 2013, pp. 3741-3754.

16. You, H., Vittal, V., Wang, X. Slow Coherency-Based Islanding // IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(1), pp. 483-491.

17. Yang, Y., Duan, Q., Wu, G., Ni, J., Shen, C. Slow coherency based adaptive controlled islanding scheme of the China Southern Power Grid // Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, APPEEC, 2016-January, 7381048.

18. Yang, B., Vittal, V., Heydt, G.T., Sen, A. A novel slow coherency based graph theoretic islanding strategy // 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting, PES, 4275939.

19. Moreno, R., Torres, A. Security of the power system based on the separation into islands // 2011 IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies Latin America SGT LA 2011 - Conference Proceedings, 6083210.

20. Sun, K., Zheng, D.-Z., Lu, Q. Splitting strategies for islanding operation of large-scale power systems using OBDD-based methods // IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(2), pp. 912-923.

---

21. Sun, K., Zheng, D.-Z., Lu, Q. A simulation study of OBDD-based proper splitting strategies for power systems under consideration of transient stability // IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(1), pp. 389-399.
22. Jia, Y., Xu, Z., Zhang, C., Kong, W. Fast forecasting uncontrolled network separation in smart grid environment // 2016 IEEE International Conference on Smart Grid Communications, SmartGridComm, 2016, 7778850, pp. 742-746.
23. ИТ, “Index of Data Illinois Institute of Technology.” URL: [motor.ece.iit.edu/data](http://motor.ece.iit.edu/data).
24. Боровиков В.А., Косарев В.К., Ходот Г.А. Электрические сети энергетических систем// Учебник для техникумов. Л., «Энергия», 1977, 392 с.

### References

1. R. Ghadami and B. Shafai, IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 58, no. 1, pp. 258-264.
  2. Kurzhanskiy A.B. Doklady RAN. 2009. T. 426. № 1. Pp. 20-25.
  3. I. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramniam, E. Cayirci, IEEE Commun. Mag., no. 8, pp. 102-114.
  4. E. Camponogara, D. Jia, B. H. Krogh and S. Talukdar, IEEE Control Systems Magazine, vol. 22, no. 1, pp. 44-52.
  5. G. Cafaro, P. Pugliese and F. Vacca International Journal of Electrical Power and Energy Systems 6 (1984), pp. 131–138.
  6. P. Massioni and M. Verhaegen, IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 54, no. 1, pp. 124-135.
  7. Akhmetkhanov R. S., Banakh L. Ya. Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin. 1996. № 4. pp. 29-33.
  8. Banakh L.Ya. Nelineynaya dinamika mashin, SCHOOL-NDM 2017, sbornik IV Mezhdunarodnoy Shkoly-konferentsii molodykh uchenykh. 2017, pp. 41-55.
-

9. Sharshenaliev Zh., Bakasova A.B. Problemy avtomatiki i upravleniya, №1 (22), 2012, pp. 5-15.
  10. Abgaryan K.A. DAN SSSR. 1966. T. 166. № 2., pp. 301-304.
  11. Kron G. Issledovanie sistem po chastyam: diakoptika [research systems in parts: diakoptics] M.: Nauka. 1972. P. 544.
  12. Medvedev M.Yu., Pshikhopov V.Kh., Shevchenko V.A. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2015, №4, URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3321](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3321).
  13. Pshikhopov V.Kh, Medvedev M.Yu., Fedorenko R.V., Gurenko B.V., Chufistov V.M., Shevchenko V.A. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2014, №4, URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2579](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2579).
  14. Panteli, M., Trakas, D.N., Mancarella, P., Hatziargyriou, N.D. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(6), 7434044, pp. 2913-2922.
  15. S. Pahwa, M. Youssef, P. Schumm, C. Scoglio, N. Schulz Physica A., Statistical Mechanics and its Applications, Volume 392, Issue 17, 1 September 2013, pp. 3741-3754.
  16. You, H., Vittal, V., Wang, X. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(1), pp. 483-491.
  17. Yang, Y., Duan, Q., Wu, G., Ni, J., Shen, C. Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, APPEEC, 2016-January, 7381048.
  18. Yang, B., Vittal, V., Heydt, G.T., Sen, A., 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting, PES, 4275939.
  19. Moreno, R., Torres, A. Security of the power system based on the separation into islands, 2011 IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies Latin America SGT LA 2011. Conference Proceedings, 6083210.
  20. Sun, K., Zheng, D.-Z., Lu, Q. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(2), pp. 912-923.
  21. Sun, K., Zheng, D.-Z., Lu, Q. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(1), pp. 389-399.
-



22. Jia, Y., Xu, Z., Zhang, C., Kong, W. Fast forecasting uncontrolled network separation in smart grid environment, 2016 IEEE International Conference on Smart Grid Communications, SmartGridComm, 2016, 7778850, pp. 742-746.

23. ИТ, “Index of Data Illinois Institute of Technology.” URL: [motor.ece.iit.edu/data/](http://motor.ece.iit.edu/data/).

24. Borovikov V.A., Kosarev V.K., Khodot G.A. Elektricheskie seti energeticheskikh sistem [Electric networks of power systems], Uchebnik dlya tekhnikumov. L., «Energiya», 1977, P. 392.