

УДК 004.725.5, 62.9

## ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИСТОЧНИКОВ И ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В РАМКАХ РЕЗОНАНСНОЙ СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И ДАННЫХ

Юрий Алексеевич Крюков, кандидат технических наук, проректор по информатизации и инновационной деятельности Международного университета природы, общества и человека «Дубна»

Андрей Евгеньевич Петров, доктор технических наук, профессор, академик РАЕН, профессор кафедры САПР Московского государственного горного университета, главный редактор информационно-аналитического бюллетеня «Банки и финансы»

### Аннотация

*В статье приводится актуальность и постановка задачи создания интеллектуальных сетей передачи электроэнергии и данных, излагаются современное состояние проблемы, суть технологии, структура информационного взаимодействия, требования к модели многоканальной системы передачи электроэнергии и данных, критерии оптимизации, модель топологии системы, модель клиентского терминала, структура вычислительного процесса клиентского терминала. Делаются обобщающие выводы и предложения.*

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** резонанс, однопроводные линии передач, модели информационного взаимодействия генераторов и потребителей электроэнергии, сети передачи электроэнергии и данных.

## TECHNOLOGIES OF INTELLECTUAL INTERACTION BETWEEN SOURCES AND CONSUMERS OF ELECTRICITY WITHIN RESONANT POWER AND DATA TRANSMISSION NETWORK

Yuri Alexeevich Kryukov, candidate of technical sciences, Vice Rector for Information and Innovation at the International University of Nature, Society and Man "Dubna"

Andrey Evgenevich Petrov, Doctor of Technical Sciences, member of Russian Academy of Natural Sciences, Professor of the CAD Department of Moscow State Mining University, chief-editor of "Banks and finance" newsletter

### Abstract

*The article presents the relevance and problem of intelligent electricity and data transmission networks, outlines the current state of the technology's essence, the structure of information exchange, the requirements for multi-channel model of power and data transmission system, optimization criteria, the mode of system's topology, the model of the client terminal, the structure of the client terminal's computational process. General conclusions and suggestions are made.*

**KEYWORDS:** resonance, single-wire transmission line, model of information exchange between generators and electricity consumers, power and data transmission network.

Исходя из анализа ситуации, складывающейся на региональных и муниципальных рынках как электроснабжения, так и телекоммуникаций, можно сделать вывод о неполном соответствии существующих технологических, организационных, экономических подходов к решению наиболее значимых проблем в электроэнергетике и связи [1]. Современное развитие общества и технологий требует внедрения новых решений традиционных задач, в большей степени соответствующих глобальным законам сохранения энергии, гармонизирующим развитие значимых отраслей экономики [2].

Выпуск подготовлен по итогам Второй Международной конференции по фундаментальным проблемам устойчивого развития в системе «природа – общество – человек» (29 и 30 октября 2012 г., проект РФФИ №12-06-06085-г).

В этих условиях, с учетом задачи демонополизации региональных рынков электроснабжения, снижения уровня государственного регулирования ценообразования и необходимости привлечения в отрасли прямых инвестиций населения, необходимо заново сформулировать набор требований, предъявляемых к перспективным территориально-распределенным кабельным сетям, обеспечивающим спектр современных услуг:

- технологические и организационные особенности развития кабельной системы должны обеспечивать возможности для *строительства сетей «снизу»*, с уровня сельских поселений и районных центров;
- принципиальные, структурные и топологические схемы территориально-распределенных сетей должны обеспечивать *возможность обмена генерируемой мощностью в двух направлениях* не только на уровне магистральных линий, но и на уровне распределения;
- передача электроэнергии по линиям должна обеспечиваться с повышением потребительских характеристик сетей - *значительным снижением металлоемкости линий* для цветных металлов и *общей стоимости линий* при строительстве, а при эксплуатации электросетей *снижением потерь на разогрев проводников, повышением травмо- и пожаробезопасности*;
- трансляция потоков электроэнергии вдоль кабельной системы должна *совмещаться с высокоскоростной передачей данных* при использовании единой кабельной системы;
- существенное *снижение организационных издержек* компаний и населения не только при присоединении потребителей к сетям передачи электроэнергии для объектов нового строительства, но и при подключении к сетям генерирующих мощностей объектов альтернативной энергетики;
- обеспечение непрерывного и *дифференцированного учета выданной и потребленной электроэнергии* всеми участниками рынка с учетом потребления каждой отдельной розеткой в распределительной сети здания;
- обеспечить *динамическое управление параметрами* сложно структурированной сети с присоединенными разнородными источниками и потребителями электроэнергии с целью оптимизации процессов перетока энергии и сокращения технических потерь.

На первый взгляд некоторые из сформулированных требований противоречат друг другу. Например, требование по снижению стоимости погонного метра сетей несовместимо

Выпуск подготовлен по итогам Второй Международной конференции по фундаментальным проблемам устойчивого развития в системе «природа – общество – человек» (29 и 30 октября 2012 г., проект РФФИ №12-06-06085-г).

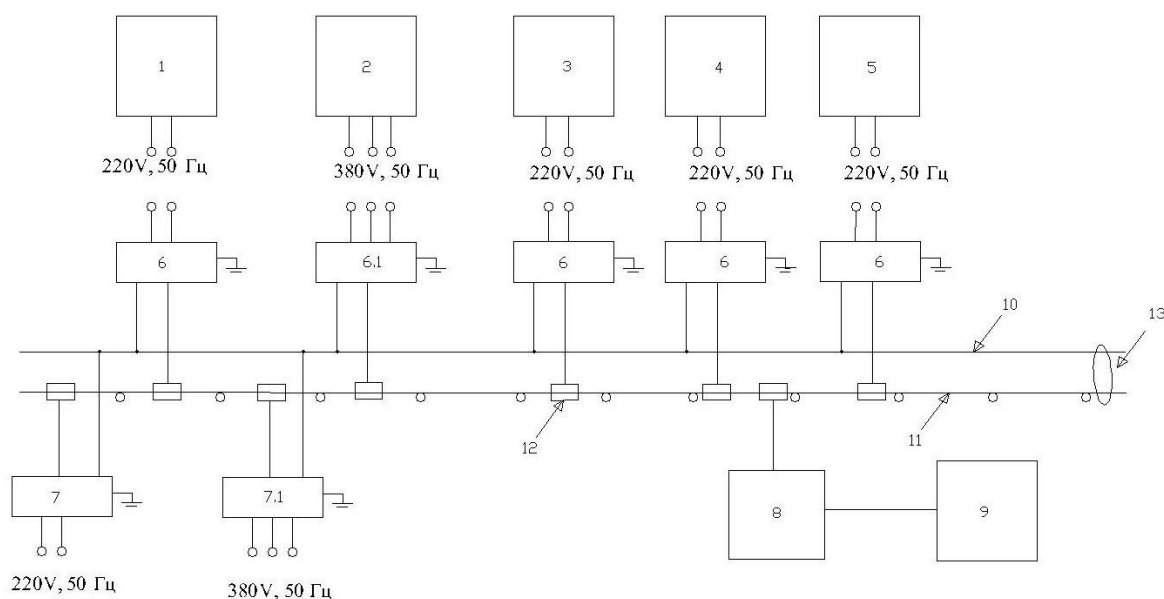
с интеграцией функций передачи электроэнергии и данных, оснащением каждой электрической розетки программируемым вычислительным устройством, формированием двунаправленного перетока электроэнергии. А строительство сетей «снизу», со случайно возникающими связями без предварительного проектирования (ячеистая топология, применяемая при строительстве линий Интернет) противоречит требованию динамического управления многочисленными электрическими параметрами в единой системе, резко усложняет организацию динамического учета в долевом энергообеспечении потребителя.

Однако, новые подходы к передаче электрической энергии, применение новых конструктивных решений при создании электрораспределительных сетей позволяют дать положительный ответ на вопрос о возможности обеспечения всех вышеизложенных требований в рамках одной кабельной системы.

В работах Н.Тесла (Tesla N. Apparatus for transmission of electrical energy. US Pat № 349621, 15.05.1900) был предложен метод передачи электрической энергии с использованием резонансных свойств однопроводной линии, изготовленной из металлического проводника. Этот метод был незаслуженно забыт по причине сложной организации управления резонансными характеристиками линии на основе доступной на тот момент элементной базы. Современные подходы к конструктивным решениям, используемым при строительстве интеллектуальных систем передачи электроэнергии разработаны в малом инновационном предприятии ООО «Мезон», созданном на основе закона №217-ФЗ при Международном университете природы, общества и человека «Дубна».

Конкурентоспособность используемых технологий однопроводной передачи электрической энергии обеспечивается более высоким КПД передачи из-за малых потерь на поглощение и излучение энергии. Проводящий канал на основе силового стального компонента стандартного оптоволоконного кабеля в резонансном режиме имеет квазисверхпроводящие свойства. Объяснением этого эффекта является **отсутствие активного тока в проводнике с низкой удельной проводимостью и доминирующей ролью в передаче энергии токов смещения**. Использование телекоммуникационной инфраструктуры на основе оптоволоконного кабеля позволяет интегрировать в единой системе передачу электрической энергии и данных, предоставить потребителю электрическую мощность с малыми потерями при передаче, значительно увеличить длину линии без установки повышающих подстанций, повысить электро- и пожаробезопасность системы в целом.

Выпуск подготовлен по итогам Второй Международной конференции по фундаментальным проблемам устойчивого развития в системе «природа – общество – человек» (29 и 30 октября 2012 г., проект РФФИ №12-06-06085-г).

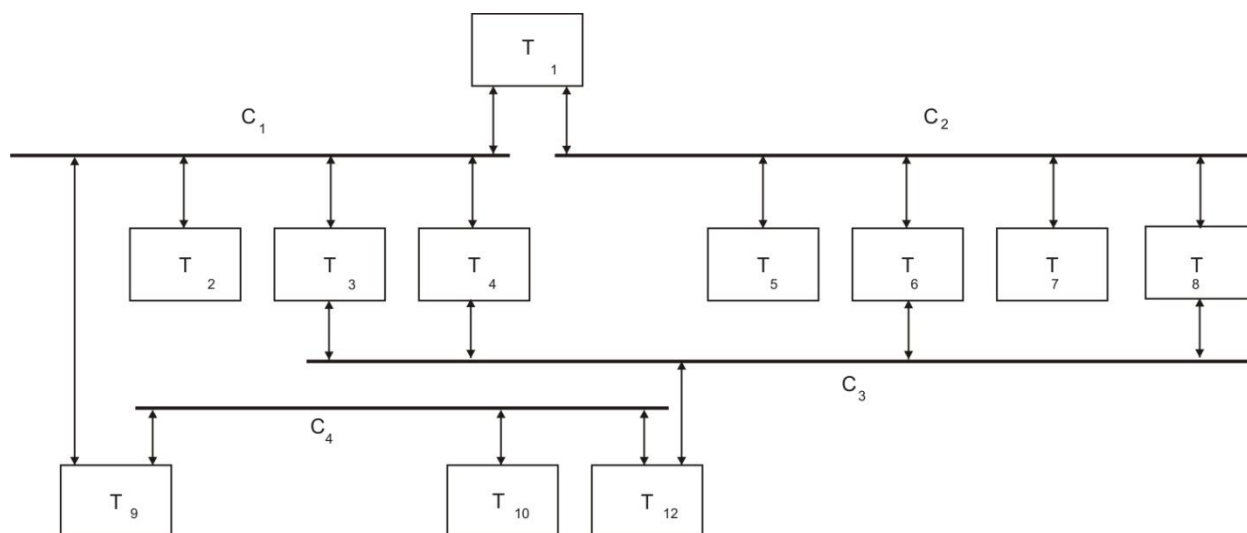


**Рис.1 Сегмент сети резонансной системы передачи электрической энергии и данных**

Первая интеллектуальная система передачи электрической энергии и данных развернута на территории кампуса университета «Дубна» в июле 2011 года и с момента запуска эксплуатируется в непрерывном режиме. Сегмент сети резонансной системы передачи электрической энергии и данных (Рис.1) в качестве среды передачи использует стандартный оптоволоконный кабель (13), длина которого может варьироваться от нескольких сотен метров до семи километров. Резонансные генераторы (РГ), являясь преобразователями активной мощности (6) множества территориально-распределенных альтернативных источников электроэнергии, таких как солнечные батареи, ветрогенераторы, минигидроэлектростанции, водородные генераторы, приливные электростанции, накопители электроэнергии и др. (1-5), имеют подключение как к силовым металлическим компонентам оптоволоконного кабеля (10), так и к информационным оптическим волокнам этого же кабеля (11) посредством оптических ответвителей (12). Аналогичным образом к сегменту сети резонансной системы передачи имеют подключение множество (7) приемников-выпрямителей (ПВ), так же оборудованных микропроцессорной системой обработки данных (устройство «умная розетка»). Информационное пространство сегмента сети обслуживает сервер биллинга и мониторинга (8), в базу данных которого периодически поступают информационные сообщения о мгновенных значениях электрической мощности, генерируемой каждым из подключенных РГ в течение некоторого временного интервала и мощности, потребляемой оборудованием ПВ. Администрирование системы осуществляется оператором, имеющим доступ к оборудованию через Интернет (9).

Выпуск подготовлен по итогам Второй Международной конференции по фундаментальным проблемам устойчивого развития в системе «природа – общество – человек» (29 и 30 октября 2012 г., проект РФФИ №12-06-06085-г).

Резонансные генераторы (РГ), как и приемники-выпрямители (ПВ) могут иметь подключение более чем к одному сегменту резонансной сети (Рис.2). В этом случае РГ и ПВ выполняют функцию согенераторов, обеспечивая, при необходимости, ретрансляцию электроэнергии из сегмента сети с избыточной генерируемой мощностью в энергодефицитный сегмент. Потребители электроэнергии в своей работе опираются на критерии и алгоритмы выбора оптимального пути к требуемому РГ через цепочку согенераторов. Маршрут строится исходя из наличия свободной мощности РГ одного из доступных источников альтернативной электроэнергии с лучшим параметром цена/качество. С целью оптимизации и унификации компонентов системы передачи электрической энергии и данных оборудование РГ и ПВ может быть смонтировано в едином корпусе – клиентском терминале (КТ).



**Рис.2. Пример многосегментной системы передачи электрической энергии и данных:**

$T_1$ – $T_{11}$  – клиентские терминалы;  $C_1$  –  $C_4$  – сегменты сети резонансной системы передачи

На информационном уровне клиентские терминалы объединяются в традиционную оптоволоконную сеть передачи данных, при подключении более чем к одному сегменту сети, КТ выполняют роль маршрутизатора и обеспечивают пользователю доступ к электронной бирже электроэнергии. Объекты альтернативной энергетики, такие как солнечные панели, ветрогенераторы и др., являются ненадежными источниками электроэнергии, генерируемая мощность которых сильно зависит от текущих погодных условий и времени суток. В связи с этой спецификой работы оборудования и меняющимися текущими потребностями домохозяйства в электрической энергии, клиентские терминалы могут работать в двух режимах – режиме поставки электроэнергии в сеть при излишках генерируемой мощности в

домохозяйстве, а также в режиме потребления электроэнергии из сети в случае недостатка в собственной генерации. Объекты альтернативной генерации имеют в своем составе накопители электроэнергии, что позволяет поддерживать необходимое потребление домохозяйства в периоды смены режима работы. РГ динамически и адаптивно меняют свою роль в системе, выступая в роли поставщика электроэнергии с оплатой потребителей на расчетный счет владельца, либо потребителя электроэнергии с оплатой со своего расчетного счета на счет владельца источника электроэнергии, выбранного в качестве текущего поставщика. Дополнительно, РГ могут выступать в роли согенераторов, являясь посредниками между производителем и потребителем электроэнергии, что также требует адаптивного выделения доли от максимально возможной производительности КТ и проведения взаиморасчетов с заказчиком данного транзита. Алгоритмы проведения коммерческих взаиморасчетов выходят за рамки данной статьи, однако необходимо учитывать, что формирование свободного рынка электроэнергии альтернативных источников предполагает возможность для владельца оборудования лично определять цену поставки и транзита электроэнергии другим участникам рынка путем внесения данных в расчетную систему. В связи с этим, технологии автоматической оптимизации маршрутов передачи электроэнергии в многосегментной сети приобретают особую значимость.

Далее рассматривается один из способов построения структуры вычислительного процесса клиентского терминала, который предусматривает использование алгоритмов автоматической оптимизации на основе математической модели многоканальной системы передачи электроэнергии и данных. С этой целью представим формализованное описание объектов инфраструктуры системы.

**Компоненты системы.** Многоканальная система передачи электроэнергии и данных состоит из трех компонентов.

*Пользователь* – человек, являющийся владельцем оборудования электрогенерации и имеющий возможность определять ценовые характеристики поставки и транзита электроэнергии потребителям посредством доступа к информационно-расчетной системе сети.

*Клиентский терминал* (КТ) – устройство, предназначенное для передачи электрической мощности источника электроэнергии по однопроводной линии сегмента сети, а так же для приема электрической энергии, генерируемой другими источниками, формирования и обработки информационных сообщений в рамках сети передачи данных.

Выпуск подготовлен по итогам Второй Международной конференции по фундаментальным проблемам устойчивого развития в системе «природа – общество – человек» (29 и 30 октября 2012 г., проект РФФИ №12-06-06085-г).

*Канал передачи* (КП) – сегмент оптоволоконного кабеля, являющийся средой для передачи как электрической энергии, так и информационных сообщений.

Многоканальная система передачи электроэнергии и данных (МСПЭД) является «связной», т.е. любой из её КТ имеет возможность передать электроэнергию и данные любому другому КТ непосредственно, либо через промежуточные КТ, используемые в качестве согенераторов и маршрутизаторов.

Пример многоканальной системы передачи электроэнергии и данных показан на рис. 2.

**Требования к модели многоканальной системы передачи электроэнергии и данных.** Основные требования, предъявляемые к математической модели многоканальной системы передачи электроэнергии и данных:

- *полнота модели*, т.е. модель должна описывать МСПЭД с достаточной точностью, не опуская существенно важных параметров;
- *универсальность*, модель должна описывать, по возможности, наибольшее число вариантов построения МСПЭД;
- *минимальное число формальных параметров*, поскольку модель предназначена для использования в системах с ограниченными вычислительными ресурсами КТ, необходимо, чтобы она содержала минимально необходимое число параметров, но при этом удовлетворяла требованиям полноты и универсальности.

**Критерии оптимизации передачи электроэнергии в рамках МСПЭД.** При разработке методов и технологий доступа КТ к внешним источникам электроэнергии необходимо обеспечить оптимизацию маршрутов передачи по одному или нескольким критериям. Наиболее вероятные критерии оптимизации МСПЭД:

- поиск маршрута до наиболее «дешевого» источника электроэнергии, т.е. такого, стоимость доставки энергии от которого будет наименьшей (включая стоимость оплаты за транзит через промежуточные КТ);
- поиск маршрута до наиболее «надежного» источника электроэнергии, т.е. такого, вероятность отказа в электроснабжении которым, будет минимальной (включая отказ в предоставлении затребованной мощности от источника в полном объеме, а так же отказ от любого из промежуточных КТ);
- поиск наиболее «короткого» маршрута до источника электроэнергии, т.е. такого, который включает наименьшее количество промежуточных КТ;

Выпуск подготовлен по итогам Второй Международной конференции по фундаментальным проблемам устойчивого развития в системе «природа – общество – человек» (29 и 30 октября 2012 г., проект РФФИ №12-06-06085-г).

- поиск наиболее «быстрого» маршрута до источника электроэнергии, т.е. такого, энергия от которого будет доставлена до потребителя за минимальное время (этот критерий определяет продолжительность работы потребителя от запасенной электроэнергии в собственном накопителе, в то время как идет поиск нового источника электроснабжения).

Нетрудно заметить, что приведённые возможные критерии оптимизации связаны с поиском оптимального маршрута передачи электроэнергии. Следовательно, задача оптимизации работы МСПЭД в большинстве случаев сводится к задаче поиска оптимального маршрута. В свою очередь, для того чтобы использовать алгоритмы поиска оптимального маршрута, необходимо иметь какое-либо формальное описание топологии системы передачи электроэнергии, т.е. её модель.

**Модель топологии системы передачи электроэнергии.** Задача поиска оптимального маршрута может быть решена после определения топологии системы. Предлагается один из способов формального описания топологии МСПЭД. Для определенности положим, что имеется система, включающая  $N$  клиентских терминалов и  $M$  каналов передачи.

Топологию МСПЭД, представленную в виде стандартной топологической схемы, можно однозначно описать «матрицей соединений»  $L$ , которая формируется по следующему правилу:

$$L[i,j] = \begin{cases} C_j, & \text{если КТ} j \text{ связан более чем с одним КП} i \\ 1, & \text{если КТ} j \text{ связан с одним КП} i \\ 0, & \text{если связи КТ} j \text{ с КП} i \text{ нет} \end{cases} \quad i = 1 \dots M; \quad j = 1 \dots N$$

где  $C_j$  – стоимость электрической мощности, ретранслируемой в канал передачи при отборе энергии из другого канала передачи, подключенного к этому же КТ (изначально определяется централизованно как рекомендованная, но может быть изменена владельцем).

На рис. 3 в качестве примера представлена матрица соединений  $L$  для МСПЭД, показанной на рис. 2, построенная согласно приведённому правилу.

|    | T1   | T2   | T3   | T4   | T5 | T6   | T7 | T8   | T9   | T10 | T11  |
|----|------|------|------|------|----|------|----|------|------|-----|------|
| C1 | 0,18 | 0,75 | 0,43 | 0,92 | 0  | 0    | 0  | 0    | 0,27 | 0   | 0    |
| C2 | 0,18 | 0    | 0    | 0    | 1  | 0,12 | 1  | 0,89 | 0    | 0   | 0    |
| C3 | 0    | 0    | 0,43 | 0,92 | 0  | 0,12 | 0  | 0,89 | 0    | 0   | 0,98 |
| C4 | 0    | 0,75 | 0    | 0    | 0  | 0    | 0  | 0    | 0,27 | 1   | 0,98 |

Рис. 3. Матрица соединений системы передачи электроэнергии и данных



Выпуск подготовлен по итогам Второй Международной конференции по фундаментальным проблемам устойчивого развития в системе «природа – общество – человек» (29 и 30 октября 2012 г., проект РФФИ №12-06-06085-г).

Данная матрица соединений больше соответствует приведению задачи передачи электроэнергии к стандартному представлению транспортной задачи. Например, сетевая модель перевозки руды:

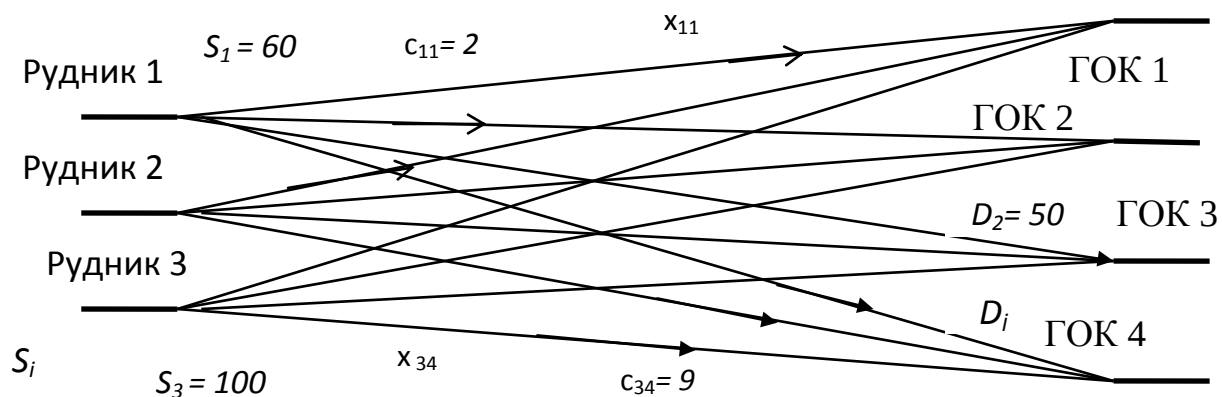


Рис. 4. Структура задачи транспортировки продукции рудников на горно-обогатительные комбинаты

Сетевую модель приведем к виду классической транспортной задачи, описываемому матрицей порядка  $m \times n$ , в данном случае это  $3 \times 4$ . В каждой ячейке даны стоимость транспортировки  $c_{ij}$  и объем перевозимого продукта  $x_{ij}$  в качестве переменной. Запишем матрицу для этой задачи, в которой показаны значения исходных данных:

|       | 1                        | 2                        | 3                         | 4                        | Поставки    |
|-------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------|
| 1     | $c_{11} = 2$<br>$x_{11}$ | $c_{12} = 3$<br>$x_{12}$ | $c_{13} = 11$<br>$x_{13}$ | $c_{14} = 7$<br>$x_{14}$ | $S_1 = 60$  |
| 2     | $c_{21} = 1$<br>$x_{21}$ | $c_{22} = 0$<br>$x_{22}$ | $c_{23} = 6$<br>$x_{23}$  | $c_{24} = 1$<br>$x_{24}$ | $S_2 = 10$  |
| 3     | $c_{31} = 5$<br>$x_{31}$ | $c_{32} = 8$<br>$x_{32}$ | $c_{33} = 15$<br>$x_{33}$ | $c_{34} = 9$<br>$x_{34}$ | $S_3 = 100$ |
| Спрос | $D_1 = 70$               | $D_2 = 50$               | $D_3 = 30$                | $D_4 = 20$               |             |

(3.16)

Здесь дана стоимость перевозки по каждому маршруту, а найти надо распределение потоков, показанное в каждой ячейке, которое минимизирует общую стоимость транспортировки. Пример построения матрицы соединений для сетей передачи электроэнергии показан в конце текста.

Итак, цель построения матрицы соединений – формальное описание топологической схемы системы передачи электроэнергии, без которой невозможна автоматизация поиска оптимального (согласно одному из критериев) маршрута передачи энергии по запросу КТ. Для осуществления самой процедуры поиска оптимального маршрута может быть использован один из известных алгоритмов, описанных, например, в [8].

Следует учитывать, что МСПЭД функционирует на основе инфраструктуры сменяющейся во времени топологией, т.е.  $L = L(t)$ . Поэтому при создании сегментов таких систем необходима установка серверов баз данных (8) рис. 1, для централизованного обновления таблицы соединений при опросе КТ, либо внедрение в КТ алгоритмов автоматического формирования таблицы соединений на каждом из КТ.

**Модель клиентского терминала.** Помимо топологии системы передачи для поиска оптимального маршрута необходимо знать характеристики каждого клиентского терминала, через которые проходят потоки электроэнергии. Набор характеристик должен однозначно давать ответ на вопрос о возможности и экономической целесообразности поставки электроэнергии в канал передачи от данного КТ.

В результате рассмотрения требований к модели системы и критериев оптимизации выбраны следующие характеристики клиентского терминала:

- $P_{j\max}$  – максимальная выходная мощность выхода  $j$  – го клиентского терминала, подключенного к  $i$  –му каналу передачи;
- $P_{ji}$  – текущая выдаваемая мощность выхода  $j$  – го клиентского терминала, подключенного к  $i$  –му каналу передачи;
- $C_j$  –стоимость, выдаваемой в канал передачи электрической мощности от собственного источника электроэнергии (изначально определяется централизованно как рекомендованная, но может быть изменена владельцем).

Таким образом, состояние клиентского терминала номер  $j$  в каждый момент времени описывается параметрами  $P_{j\max}$ ,  $P_{ji}$ ,  $C_j$ . Совокупность параметров всех клиентских терминалов в МСПЭД образует **матрицу состояния терминалов**.

Параметр  $P_{j\max}$  можно считать константой для данного клиентского терминала, поскольку он будет изменяться лишь после замены или модернизации оборудования и относительно редко. Трудность возникает при определении параметра  $P_{ji}$ , который меняется случайным образом, в зависимости, например, от порывов ветра на ветрогенераторе или изменения собственного электропотребления владельца источника электроэнергии. Следует также учитывать, что клиентский терминал не имеет возможности мгновенно прекратить поставку электроэнергии в канал передачи, например, если владелец оборудования включил дополнительный электроприбор в своем доме и внутреннее потребление превысило объемы внутренней генерации на протяжении некоторого времени  $t$ . В этом случае, на период переходного процесса, дополнительное электропотребление домовладения покрывается из

внутреннего накопителя электроэнергии, клиентский терминал посылает сообщение в биллинговую систему об отрицательном параметре  $P_{ji}$  и, получив разрешение, прекращает поставку электроэнергии в канал передачи. На следующем этапе, если параметр  $P_{ji}$  продолжает оставаться отрицательным, клиентский терминал проводит поиск маршрута до оптимального внешнего источника и, по завершению формирования составного канала, переходит в режим получения электроэнергии из системы в объеме имеющегося дефицита. Аналогичным образом строится алгоритм работы и клиентского терминала, находящегося в режиме потребления и получившего уведомление от биллинговой системы о невозможности дальнейшего получения энергии от текущего источника.

Для нахождения оптимального маршрута каждый клиентский терминал должен иметь информацию о состоянии *всех* клиентских терминалов в системе и текущей матрицы соединений, получая эту информацию по запросу из биллинговой системы и отсылая уведомления об изменении собственного состояния.

**Структура вычислительного процесса клиентского терминала.** На основе построенных моделей топологии МСПЭД и клиентского терминала может быть предложена структура вычислительного процесса, который реализует алгоритмы оптимизации маршрутов доступа до источников согласно выработанным критериям (рис. 5).

Выпуск подготовлен по итогам Второй Международной конференции по фундаментальным проблемам устойчивого развития в системе «природа – общество – человек» (29 и 30 октября 2012 г., проект РФФИ №12-06-06085-г).

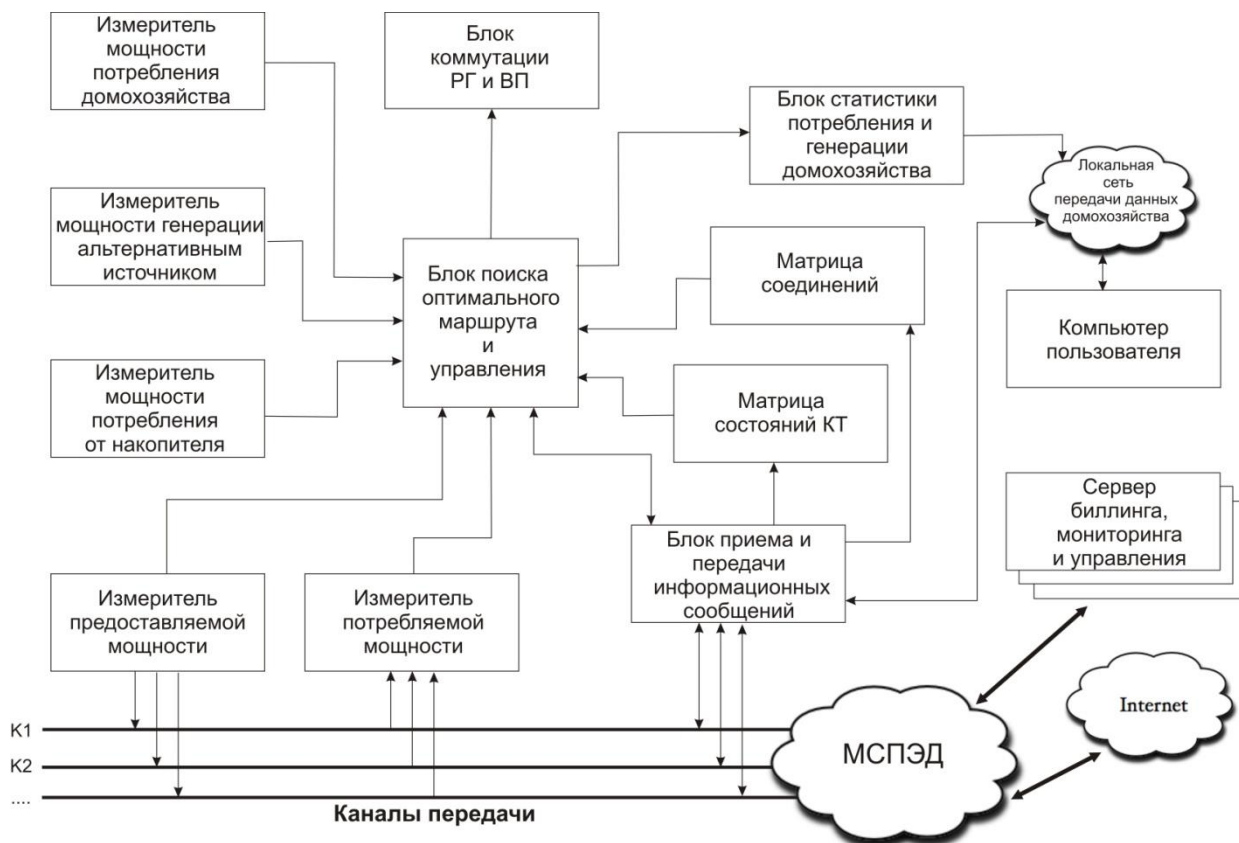


Рис. 5. Структурная схема вычислительного процесса клиентского терминала.

Показаны основные блоки вычислительного процесса и потоки данных между ними.

Рассмотрим функции блоков вычислительного процесса.

**Блок измерителей мощности** реализует программный интерфейс взаимодействия с аппаратными датчиками измерения мгновенной мощности оборудования генерации и потребления, обслуживаемого клиентским терминалом. Данные накапливаются в оперативной памяти блока измерителей, усредняются на коротких временных интервалах и передаются в блок управления.

**Блок поиска оптимального маршрута и управления** обеспечивает управление потоками энергии, принимаемой и транслируемой в каналы передачи, непосредственно подключенные к КТ. Также задачей данного блока является обеспечение информационного взаимодействия с другими КТ, подключенными к МСПЭД. Поиск маршрута до оптимального с точки зрения выбранных критериев источника энергии происходит в случае недостатка во внутренней генерации на основании матрицы состояний КТ и матрицы соединений. Маршрут вычисляется как функция от текущего состояния множества клиентских терминалов  $T_1(t) \dots T_N(t)$ , текущей матрицы соединений  $L(t)$  и критерия

Выпуск подготовлен по итогам Второй Международной конференции по фундаментальным проблемам устойчивого развития в системе «природа – общество – человек» (29 и 30 октября 2012 г., проект РФФИ №12-06-06085-г).

оптимизации  $R$ , определяемого пользователем при конфигурации собственного клиентского терминала:

$$P = f(T_1(t) \dots T_N(t), L(t), R).$$

**Блок коммутации РГ и ВП** формирует управляющие сигналы для подключения резонансного генератора к каналу передачи в случае наличия невостребованной домохозяйством мощности внутренней генерации, либо подключения выпрямителя-приемника для получения дополнительной электрической мощности из МСПЭД. При подключении клиентского терминала одновременно к нескольким каналам передачи, блок коммутации управляет более чем одним комплектом РГ и ВП, организуя возможность регенерации электрической мощности из энергоизбыточного канала передачи в энергодефицитный. Команды на проведение коммутаций формируются блоком поиска оптимального маршрута и управления на основании баланса собственного энергопотребления и по запросам других КТ, строящих маршруты до источников.

**Блок приема и передачи информационных сообщений** осуществляет прием и передачу запросов и подтверждений при подключении к внешнему КТ и промежуточным согенераторам на основании построенного маршрута, осуществляет информационное взаимодействие с серверами биллинга, мониторинга и управления МСПЭД с получением и поддержкой в актуальном состоянии матриц соединений и состояний КТ, обновляет по команде блока управления состояние собственного КТ в базе данных МСПЭД. Дополнительными задачами блока является осуществление функций маршрутизации информационных пакетов при подключении КТ к нескольким каналам передачи, а также организация доступа из локальной компьютерной сети домохозяйства в Интернет, к сервисам телефонии, телевидения и др.

**Блок статистики потребления и генерации домохозяйства** производит накопление и долговременное хранение данных - текущих параметров генерации и потребления, получаемых от блока поиска оптимального маршрута и управления, обеспечивает представление накопленных данных пользователю в удобной для него форме. Блок также отвечает за хранение и предоставление по запросам данных – стоимости генерируемой мощности, стоимости мощности транзита, критерий оптимизации, которые устанавливаются пользователем как параметры предоставления собственных ресурсов КТ.

**Компьютер пользователя** является устройством управления и мониторинга владельца оборудования генерации и КТ.

**Сервера биллинга, мониторинга и управления** предназначены для обобщения собираемых по запросам от КТ параметров, построения и предоставления матриц соединений и матриц состояний КТ, ведения коммерческого учета поставляемой и потребляемой электроэнергии, сбора обобщенной статистической информации о работе МСПЭД, поддержки сайта мониторинговой и биллинговой информации в интересах пользователей.

Подобная организация вычислительного процесса имеет следующие достоинства:

- *универсальность*, т.е. вычислительный процесс, построенный по такой схеме, пригоден в подавляющем большинстве вариантов построения инфраструктуры МСПЭД;
- *адаптивность*. Структура вычислительного процесса спроектирована с учетом универсальной модели топологии системы передачи электроэнергии и модели клиентского терминала. Поскольку в своей работе вычислительный процесс клиентского терминала учитывает текущее состояние системы передачи энергии (её топологию и параметры клиентских терминалов), он в большинстве случаев способен сформировать маршрут до источника энергии, оптимального по установленному критерию оптимизации, адаптируясь к реальным условиям функционирования системы в данный момент времени.

### Заключение

Интеграция генераторов и приемников электрической энергии в единое информационное пространство открывает возможности по организации непрерывного и *дифференцированного учета выданной и потребленной электроэнергии*. Возможность формирования рынка электроэнергии на муниципальном и районном уровне, с учетом реального спроса и предложения в различное время суток, требует разработки специализированных алгоритмов взаимодействия множества оборудования КТ с целью оптимизации наиболее важных критериев работы системы.

На основании практических соображений выбраны критерии оптимизации передачи электроэнергии, которые послужили основой для формирования требований к топологической модели системы передачи электроэнергии и данных и модели клиентского терминала.

В результате рассмотрения построенной модели сделан вывод, что оптимальный маршрут является функцией от текущего состояния множества клиентских терминалов  $T_1(t)$

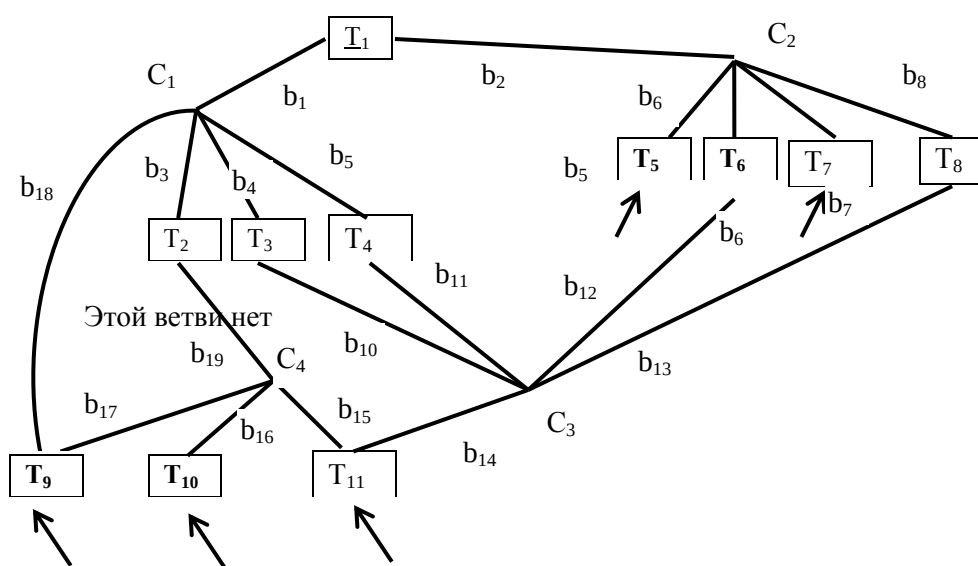
Выпуск подготовлен по итогам Второй Международной конференции по фундаментальным проблемам устойчивого развития в системе «природа – общество – человек» (29 и 30 октября 2012 г., проект РФФИ №12-06-06085-г).

...  $T_N(t)$ , текущей матрицы соединений  $L(t)$  и критерия оптимизации  $R$ , определяемого пользователем при конфигурации собственного клиентского терминала. Также предложена одна из возможных структур вычислительного процесса клиентского терминала, который адаптируется к текущим условиям функционирования системы с использованием разработанных моделей топологии и КТ.

### Литература

1. Крюков, Ю.А. Интеллектуальная распределительная сеть передачи электроэнергии и данных как технология, обеспечивающая прорывные изменения электроэнергетике и связи. // Русский инженер, - №2 (33), 2012, с. 57-61.
2. Кузнецов, О.Л., Большаков, Б.Е. Устойчивое развитие: Научные основы проектирования в системе природа-общество-человек.- Спб.-М.-Дубна, 2002.
3. Большаков, Б.Е. Закон природы или как работает Пространство-Время. Российская академия естественных наук, Дубна, 2002.
4. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года, Сайт Министерства энергетики Российской Федерации, <http://minenergo.gov.ru/activity/energostrategy/>
5. Шамин, А.А. Организация вычислительного процесса микропроцессорных терминалов для многоканальных систем передачи данных. Институт вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук, Вычислительные технологии, Том 12, Специальный выпуск 1, 2007.
6. Чураков, Е.П.. Оптимальные и адаптивные системы. М.: Энергоатомиздат, 1987.
7. Петров, А.Е. Тензорный анализ двойственных систем. Междунар. ун-т природы, о-ва и человека «Дубна» (каф. систем. анализа и управления). — Москва: Центр информационных технологий в природопользовании, 2007. — 494 с.

Тогда получим сеть со следующей структурой.



На рис. 1  $C$  – узлы, представляют линии передачи,  $b_{15} = 0,98$  – линии-ветви, обладающие ценой, здесь ветвь связывает  $KT_{11}$  и линию  $C_3$ . Далее заметим, что  $KT$  – это тоже, по сути, узлы, которые по топологической сути не отличаются от узлов  $C$ .

Тогда получим сеть с ветвями и узлами со следующей структурой.



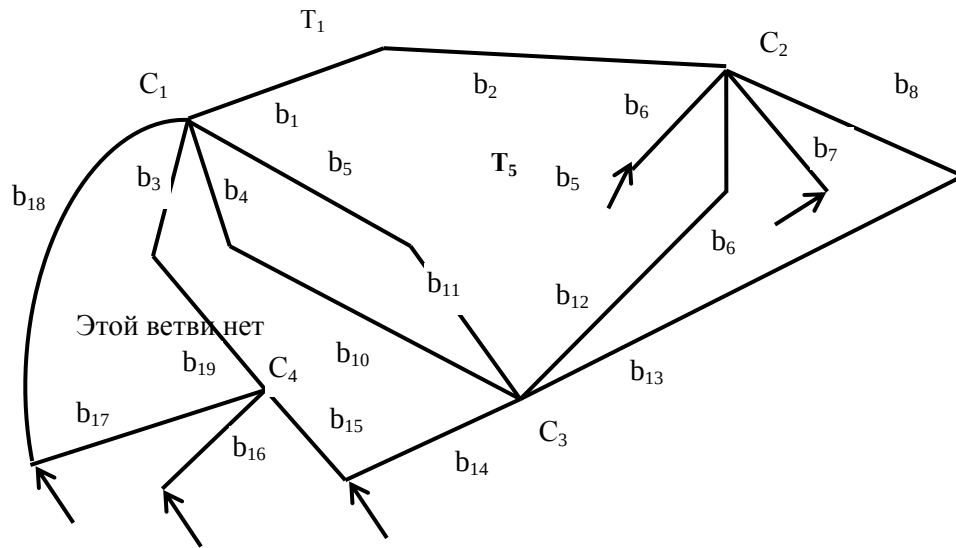


Рис. 2. Сетевая модель системы передачи энергии

### Матрицы преобразования сети и двойственной сети

Топология сети имеет следующие параметры. Ветвей в сети  $n = 19$ , подсетей  $s = 1$ , узлов  $J = 15$ , разомкнутых путей  $j = J - s = 15 - 1 = 14$ , контуров  $m = n - j = 19 - 14 = 5$ . Выбираем базисные замкнутые и разомкнутые пути, на рисунке не показаны. Выражаем их через пути, проходящие через отдельные ветви; коэффициенты составляют матрицу преобразования путей, она же матрица соединения сети – основа всех расчетов. Как видим, в сети есть три висячие ветви.

Матрицу преобразования путей получаем так. Рассматриваем сеть из свободных ветвей, несоединенных друг с другом. Полагаем, что по каждой свободной ветви проходит свой путь с тем же номером и направлением, что и ветвь. Связываем сеть в заданную структуру. Выбираем базисы замкнутых и разомкнутых путей. Размерность каждого базиса определяется топологией сети. Сам выбор путей произволен, но подчиняется правилам: контуры охватывают все ветви (кроме висячих ветвей), а разомкнутые пути охватывают все узлы.

Практика электротехники показывает, что начинать надо с одного узла, и каждый новый разомкнутый путь добавляет по одному узлу. Также начинать надо с одного контура и для следующего добавлять наименьшее возможное число ветвей (см., например, ТМДС и Атабекова).

Строки матрицы  $C$  представляют пути в связанной сети, ненулевые элементы показывают, какие ветви и с какой ориентацией составляют данный путь. Столбцы

Выпуск подготовлен по итогам Второй Международной конференции по фундаментальным проблемам устойчивого развития в системе «природа – общество – человек» (29 и 30 октября 2012 г., проект РФФИ №12-06-06085-г).

матрицы представляют пути в сети несвязанных, т.е. свободных ветвей; ненулевые элементы показывают, в какие пути, и с какой ориентацией входит данная ветвь.

Матрица преобразования путей  $C$  от сети свободных ветвей к связанной сети с исправленным элементом (19,10) с 1 на -1. Определитель матрицы равен 1.

$C =$

|    | 1 | 2  | 3 | 4  | 5  | 6 | 7  | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 |
|----|---|----|---|----|----|---|----|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 1  | 1 | 0  | 0 | 0  | 0  | 0 | 0  | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 2  | 0 | 1  | 0 | 0  | 0  | 0 | 0  | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 3  | 0 | 0  | 1 | 0  | 0  | 0 | 0  | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 4  | 0 | 0  | 0 | 1  | 0  | 0 | 0  | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 5  | 0 | 0  | 0 | 0  | 1  | 0 | 0  | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 6  | 0 | 0  | 0 | 0  | 0  | 1 | 0  | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 7  | 0 | 0  | 0 | 0  | 0  | 0 | 1  | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 8  | 0 | 0  | 0 | 0  | 0  | 0 | 0  | 1 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 9  | 0 | 0  | 0 | 0  | 0  | 0 | 0  | 0 | 1 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 10 | 0 | 0  | 0 | 1  | -1 | 0 | 0  | 0 | 0 | 1  | -1 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 11 | 1 | -1 | 0 | 0  | 1  | 0 | -1 | 0 | 0 | 0  | 1  | -1 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 12 | 0 | 0  | 0 | 0  | 0  | 0 | 0  | 0 | 0 | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 13 | 0 | 0  | 0 | 0  | 0  | 0 | -1 | 0 | 1 | 0  | 0  | -1 | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 14 | 0 | 0  | 0 | 0  | 0  | 0 | 0  | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 15 | 0 | 0  | 0 | 0  | 0  | 0 | 0  | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 16 | 0 | 0  | 0 | 0  | 0  | 0 | 0  | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  |
| 17 | 0 | 0  | 1 | 0  | 0  | 0 | 0  | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 1  | 1  |
| 18 | 0 | 0  | 0 | 0  | 0  | 0 | 0  | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  |
| 19 | 0 | 0  | 1 | -1 | 0  | 0 | 0  | 0 | 0 | -1 | 0  | 0  | 0  | -1 | 1  | 0  | 0  | 0  | 1  |

Обратная матрица  $C^{-1}$  к правильной матрице преобразования путей  $C$  имеет следующий вид:  $C^{-1} =$

|    | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6 | 7  | 8 | 9  | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 |
|----|----|----|----|----|----|---|----|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0 | 0  | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 2  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0 | 0  | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 3  | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0 | 0  | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 4  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  | 0 | 0  | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 5  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0 | 0  | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 6  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1 | 0  | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 7  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0 | 1  | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 8  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0 | 0  | 1 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 9  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0 | 0  | 0 | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 10 | -1 | 1  | 0  | -1 | 0  | 0 | 1  | 0 | 0  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 11 | -1 | 1  | 0  | 0  | -1 | 0 | 1  | 0 | 0  | 0  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 12 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0 | 0  | 0 | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 13 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0 | 1  | 0 | -1 | 0  | 0  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 14 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0 | 0  | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 15 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0 | 0  | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 16 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0 | 0  | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  |
| 17 | 1  | -1 | 0  | 0  | 0  | 0 | -1 | 0 | 0  | -1 | -1 | -1 | 0  | -1 | 1  | 0  | 1  | -1 | -1 |
| 18 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0 | 0  | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  |
| 19 | -1 | 1  | -1 | 0  | 0  | 0 | 1  | 0 | 0  | 1  | 1  | 1  | 0  | 1  | -1 | 0  | 0  | 0  | 1  |

Здесь все значения имеют обычные значения плюс-минус единицы и нули. Далее надо транспонировать эту матрицу. Получим ортогональную матрицу, которая играет две роли. Первая роль – это матрица  $A = (C^{-1})^T$  преобразования при задании в сети внешних воздействий, т.е. источников тока. Судя по задаче – это и входит в исходную постановку – источники из узлов вбрасывают в сеть поток энергии, характеризуемый мощностью. Вторая роль – это матрица  $\underline{C} = A = (C^{-1})^T$  для двойственной сети. Структуру

Выпуск подготовлен по итогам Второй Международной конференции по фундаментальным проблемам устойчивого развития в системе «природа – общество – человек» (29 и 30 октября 2012 г., проект РФФИ №12-06-06085-г).

двойственной сети можно построить по этой матрице. Сеть может рассматриваться как проводник финансовых потоков, т.е. платежей денежных средств за поставки электроэнергии.

Транспонированная матрица к обратной матрице преобразования путей в сети, т.е. ортогональная  $A = (C^{-1})^T =$

|    | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 |
|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 1  | 1 |   |   |   |   |   |   |   |   | -1 | -1 |    |    |    |    |    | 1  |    | -1 |
| 2  |   | 1 |   |   |   |   |   |   |   | 1  | 1  |    |    |    |    |    | -1 |    | 1  |
| 3  |   |   | 1 |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    | -1 |
| 4  |   |   |   | 1 |   |   |   |   |   | -1 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 5  |   |   |   |   | 1 |   |   |   |   |    | -1 |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 6  |   |   |   |   |   | 1 |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 7  |   |   |   |   |   |   | 1 |   |   | 1  | 1  |    | 1  |    |    |    | -1 |    | 1  |
| 8  |   |   |   |   |   |   |   | 1 |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 9  |   |   |   |   |   |   |   |   | 1 |    |    |    | -1 |    |    |    |    |    |    |
| 10 |   |   |   |   |   |   |   |   |   | 1  |    |    |    |    |    |    | -1 |    | 1  |
| 11 |   |   |   |   |   |   |   |   |   | 1  | 1  |    |    |    |    |    | -1 |    | 1  |
| 12 |   |   |   |   |   |   |   |   |   | 1  | 1  | 1  | 1  |    |    |    | -1 |    | 1  |
| 13 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | 1  |    |    |    |    |    |    |
| 14 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    | 1  |    |    | -1 |    | 1  |
| 15 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    | 1  |    | 1  |    | -1 |
| 16 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    | 1  |    |    |    |
| 17 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    | 1  |    |    |
| 18 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    | -1 | 1  |    |
| 19 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    | -1 |    | 1  |

Эта матрица играет две роли. Первая роль – это матрица преобразования для расчета цепи с источниками тока, т.е. внешнего воздействия. Таким образом, это матрица преобразования путей взаимного базиса в структурном смысле. Подматрицу  $A$  составляют строки, соответствующие разомкнутым путям. Наглядно представить вектор взаимного базиса в структуре сети довольно сложно. В обычном пространстве он состоит из векторов, касательных к гиперплоскостям, которые ортогональны осям координат.

В сети речь может идти об эквипотенциальных плоскостях, т.е. поверхностях с одинаковым потенциалом в электрическом поле. Они ортогональны ветви с током. Ток измеряется в ветви в одной (любой) точке. Ветвь и есть элемент сети, на протяжении которого ток не меняется. Напряжение измеряется как разность значений в двух точках, т.е. между эквипотенциальными плоскостями. Если сопротивление (метрический параметр) распределено по всей ветви, или по части ветви, то на всем протяжении такого участка потенциал меняется (происходит падение напряжения). Если сопротивление сосредоточено в точке ветви (что обычно и предполагается), то напряжение можно определить как разность потенциалов на концах ветви, или на концах источника напряжения (если он есть). Если считать, что все падение напряжения происходит на точке сопротивления, то получается, что эквипотенциальные плоскости с разными потенциалами располагаются бесконечно близко друг к другу. Если же считать, что

Выпуск подготовлен по итогам Второй Международной конференции по фундаментальным проблемам устойчивого развития в системе «природа – общество – человек» (29 и 30 октября 2012 г., проект РФФИ №12-06-06085-г).

*сопротивление распределено участку ветви, то для описания придется применять дифференциальные и интегральные уравнения.*

*Вторая роль матрицы  $A$  – она является матрицей  $C$  для двойственной сети. Крон писал, что строки и столбцы матрицы  $C$  имеют физический смысл, рассмотренный выше. А вот строки и столбцы матрицы  $A$  не имеют ясного физического смысла. Оказалось, что имеют точно такой же смысл, но для двойственной сети.*

*Изменения структуры двойственных сетей имеют следующие особенности. При разъединении одного узла на два в одной сети происходит слияние двух узлов в двойственной сети. При связывании замкнутых свободных ветвей в сеть часть контуров размыкается, в двойственной сети соединяются разомкнутые ветви и столько же разомкнутых путей замыкается. Если в одной сети происходит разъединение узла, связывающего ветви, и контур размыкается, то в двойственной сети происходит слияние узлов тех же ветвей, а соответствующий разомкнутый путь замыкается.*

*При изменении структуры меняется количество замкнутых и разомкнутых путей в каждой сети, однако в двух двойственных сетях сумма замкнутых и сумма разомкнутых путей остается прежняя.*

### **Расчет сетевой модели**

*Для расчетов контурной (замкнутой) сети, т.е. сети с источниками напряжения, применяется контурная часть матрицы  $C$ , обозначаем как  ${}^mC$ . Контурные в сети имеют номера ветвей, которые их определяют: 10, 11, 13, 17, 19. Ненулевые элементы именно этих строк перечисляют ветви, которые составляют базисные контуры в сети, вместе с их ориентацией.*

*В соответствии с нумерацией путей это контурная подматрица матрицы  $C$  следующего вида (нули для наглядности убираем).  ${}^mC =$*

|    | 1 | 2  | 3 | 4  | 5  | 6 | 7  | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 |
|----|---|----|---|----|----|---|----|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 10 |   |    |   | 1  | -1 |   |    |   |   | 1  | -1 |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 11 | 1 | -1 |   |    | 1  |   | -1 |   |   |    | 1  | -1 |    |    |    |    |    |    |    |
| 13 |   |    |   |    |    |   | -1 |   | 1 |    |    | -1 | 1  |    |    |    |    |    |    |
| 17 |   |    | 1 |    |    |   |    |   |   |    |    |    |    |    |    |    | 1  | 1  | 1  |
| 19 |   |    | 1 | -1 |    |   |    |   |   | -1 |    |    |    | -1 | 1  |    |    |    | 1  |

*Для расчетов узловой (открытой) сети, т.е. сети с источниками тока, применяется узловая часть матрицы  $A$ , обозначаем как  ${}^jA$ .*

*Эта же матрица для двойственной сети соответствует контурной (замкнутой) части сети, т.е. сети с источниками напряжения  ${}^jA = {}^mC$ . Здесь получаются контуры из*

Выпуск подготовлен по итогам Второй Международной конференции по фундаментальным проблемам устойчивого развития в системе «природа – общество – человек» (29 и 30 октября 2012 г., проект РФФИ №12-06-06085-г).

одной ветви, а часть разомкнутых путей включает более одной ветви. По одной ветви в двойственной сети содержат контуры, соответствующие висячим ветвям исходной сети.

Для расчета узловой (открытой) части двойственной сети, т.е. сети с источниками тока, применяется узловая часть матрицы  $C$ , обозначенная выше как  ${}^mC = {}^jA$ .

В соответствии с нумерацией путей это подматрица матрицы  $A$  следующего вида (нули для наглядности убираем):

|    | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 |
|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 1  | 1 |   |   |   |   |   |   |   |   | -1 | -1 |    |    |    |    |    | 1  |    | -1 |
| 2  |   | 1 |   |   |   |   |   |   |   | 1  | 1  |    |    |    |    |    | -1 |    | 1  |
| 3  |   |   | 1 |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    | -1 |
| 4  |   |   |   | 1 |   |   |   |   |   | -1 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 5  |   |   |   |   | 1 |   |   |   |   |    | -1 |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 6  |   |   |   |   |   | 1 |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 7  |   |   |   |   |   |   | 1 |   |   | 1  | 1  |    | 1  |    |    |    | -1 |    | 1  |
| 8  |   |   |   |   |   |   |   | 1 |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| 9  |   |   |   |   |   |   |   |   | 1 |    |    |    | -1 |    |    |    |    |    |    |
| 12 |   |   |   |   |   |   |   |   |   | 1  | 1  | 1  | 1  |    |    |    | -1 |    | 1  |
| 14 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    | 1  |    |    | -1 |    | 1  |
| 15 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    | 1  |    | 1  |    | -1 |
| 16 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    | 1  |    |    |    |
| 18 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    | -1 | 1  |    |

Построим структуру двойственной сети. Это можно сделать двумя способами. Помещая узел в каждый контур сети и один узел вне сети, а затем последовательно соединяя их через каждую ветвь. Или по самой матрице преобразования путей (матрице соединения), выстраивая ветви в структуре сети согласно значениям коэффициентов в строках.

Получается одна и та же структура двойственной сети в обоих случаях. Читателям предоставляется возможность проверить это самостоятельно. Рисунок внизу взят из ТМДС в качестве примера.

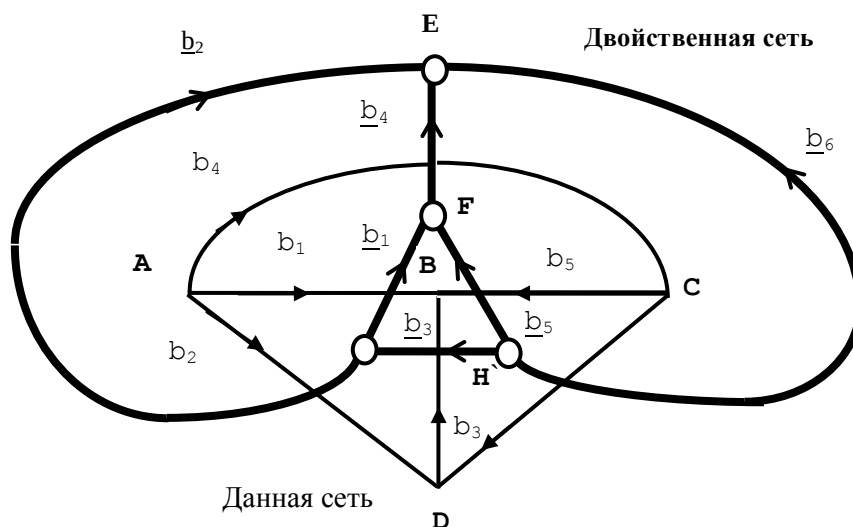


Рис. 3. Пример ориентации ветвей в двойственных сетях из 6 ветвей

Если есть обмен потоками энергии с отдельными клиентами, которые могут работать как поставщики, так и как потребители электроэнергии, то их надо представлять контурами. Одна из ветвей этого контура отвечает за потребление энергии из общей сети, а другая ветвь – за передачу энергии, когда клиент работает в режиме генерации и поставки избыточной энергии. Это усложнит сетевую модель, ветвей станет больше. Также, возможно, надо учитывать отдельной ветвью собственное потребление энергии таким клиентом, которое может меняться в зависимости от сезона (погоды). Но это уже детализация и настройка рассмотренной сетевой модели на работу с реальным объектом, который может сам меняться по ходу эксплуатации. Т.е. клиентов в составе сети может становиться больше или меньше. Получаем систему передачи электроэнергии с переменной структурой, для расчета которой, и управления, необходимо применять тензорный метод расчета сетей. По мере усложнения и расширения системы необходимо применять алгоритмы обобщенной диакоптики для расчета по частям с применением параллельных вычислений.