

УДК 621.316.1.05

UDC 621.316.1

05.00.00 Технические науки

Technical sciences

**АНАЛИЗ И УЧЕТ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ ПРИ
ТРАНЗИТЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И ИХ
РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МЕЖДУ УЧАСТНИКАМИ
ЭНЕРГООБМЕНА**

**ANALYSIS AND ACCOUNTING OF POWER
LOSSES WHEN ENERGY TRANSIT AND
THEIR DISTRIBUTION AMONG
PARTICIPANTS OF ENERGY EXCHANGE**

Лаптев Владимир Николаевич

к.т.н, доцент

*ФГБОУ «Кубанский государственный аграрный
университет имени академика И.Т. Трубилина»,
350044, Россия, г. Краснодар, ул. Калинина, 13, E-
mail: mail@kubsau.ru*

Laptev Vladimir Nikolaevich

Cand.Tech. Sci., associate professor

*Kuban State Agricultural university, 350044, Russia,
Krasnodar, Kalinin st.,13, E-mail: mail@kubsau.ru*

Степанов Владимир Васильевич

д.т.н., профессор

*Кубанский государственный технологический
университет, Россия г. Краснодар, ул. Красная 135*

Stepanov Vladimir Vasil'tvich

Dr.Sci.Tech., professor

*Kuban State Technological University, Krasnodar,
Russia*

Атрощенко Валерий Александрович

д.т.н., профессор

*Кубанский государственный технологический
университет, Россия г. Краснодар, ул. Красная 135*

Atroschenko Valery Aleksandrovich

Dr.Sci.Tech., Professor

*Kuban State Technological University, Krasnodar,
Russia*

Степанова Марина Валерьевна

старший преподаватель

*Краснодарское высшее военное авиационное
училище летчиков им. А.К. Серова, г. Краснодар,
Россия*

Stepanova Marina Valerievna

senior lecturer

*Krasnodar Higher Military Aviation School named
after A.K.Serov, Krasnodar, Russia*

Кабанков Юрий Андреевич

д.т.н., профессор

*Краснодарское высшее военное авиационное
училище летчиков им. А.К. Серова, г. Краснодар,
Россия*

Kabankov Yuri Andreevich

Dr.Sci.Tech., Professor

*Krasnodar Higher Military Aviation School named
after A.K. Serov, Krasnodar, Russia*

Работа выполнена в научном и практическом направлениях по минимизации потерь мощности при передаче электроэнергии в локальных распределительных сетях между субъектами энергообмена (производителями и потребителями), за счет энергосберегающих технологий ориентированных на технологические мероприятия, такие как модернизация и реконструкция сетей. В различных схемах электроэнергетических систем достаточно часто оказывается целесообразно передача энергии и ее мощности через промежуточные (транзитные) узлы. Структурные изменения в электроэнергетике, в настоящее время, в основном связаны с введением рыночных отношений между субъектами энергообмена, поэтому в данной работе особое внимание уделено вопросу расчета потерь мощности, поскольку именно она нелинейно зависит от мощности в узлах и ветвях сети. Следует отметить, что такими узлами в задачах транзита мощности могут быть как источники, так и потребители. Последнее

The work is done in scientific and practical directions for minimization of power losses in transmission of electricity to local distribution networks between the actors of the energy (producers and consumers) of energy-saving technologies focused on technological activities such as modernization and reconstruction of networks. Quite often in various circuits of power systems, it is advisable to transfer energy and its power through intermediate (transit) nodes. Structural changes in the electricity sector, at present, are mainly associated with the introduction of market relations between the subjects of energy exchange; therefore, in this work special attention is paid to the problem of calculating the power losses, as it is nonlinearly dependent on the power at the nodes and branches of a network. It should be noted that the nodes in problems transit capacity could be both sources and consumers. The latter necessitated the need for search of possible ways to reduce transportation losses of energy due to both the improvement and optimization of distribution networks and through the use of intermediate transit nodes. It follows that the transportation problem in this

потребовало необходимость поиска возможных путей снижения потерь при транспортировке энергии как за счет совершенствования и оптимизации схем распределительных сетей, так и за счет использования промежуточных транзитных узлов. Из сказанного следует, что транспортная задача в такой постановке имеет более общий характер и расширяет возможности решения задач оптимизации потерь мощности для локальных подсистем энергокластеров. В работе составлена транспортная матрица для решения задач транзита мощности, алгоритм которой с учетом отличительных особенностей, которые заключаются в использовании сквозной нумерации источников и потребителей в матрице, а любой узел может быть транзитером. При этом транзитная мощность ii -ом узле $Z_{ii}=0$, а размерность матрицы в отличие от ранее рассматриваемых задач имеет $(n+m) \times (n+m)$ и она остается квадратной как и у всех транспортных задач линейного программирования. Транзитные переменные X_{ij} входят в решение задачи со знаком минус, а все транзитные переменные считаются базовыми. Из приведенного примера в работе количество ветвей сети минимально, что существенно снижает затраты на строительство и содержание сети, а сам механизм расчета позволяет минимизировать потери мощности между субъектами энергообмена и, как следствие получать экономию как с позиции затрат на строительство сети, так и с позиции управления потоками энергии в ней

Ключевые слова: ТРАНЗИТ, ЭНЕРГООБМЕН, ТРАНСПОРТНАЯ МАТРИЦА, ТРАНСПОРТИРОВКА ЭНЕРГИИ, ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ, ИСТОЧНИК, ПОТРЕБИТЕЛЬ, ЗАТРАТЫ

Doi: 10.21515/1990-4665-133-060

Одним из основных путей экономии электроэнергии во всех областях производства и ее распределения между участниками энергообмена являются энергосберегающие технологии, ориентированные на технологические мероприятия, направленные на модернизацию и реконструкцию, а также строительство энергосетей, поскольку последнее связано с транспортировкой электроэнергии, что требует дополнительных капитальных вложений. Не менее важным действием в этой части являются мероприятия, связанные с процессом управления передачи энергии.

formulation is more General and expands the possibilities of optimization of power losses for the local subsystems of the energy clusters. The work is composed of the transport matrix for solving problems transit capacity, where the algorithm taking into account the distinctive features of which consist in the use of continuous numbering of sources and consumers in the matrix, and any node can be a transit country. The transit capacity ii -th node $Z_{ii}=0$, and the dimension of the matrix in contrast to the previously considered tasks has $(n+m) \times (n+m)$ and it remains square as all the transport problems of linear programming. Transit variables X_{ij} are included in the solution of the problem with a minus sign, and all transit variables are considered basic. From the above example in the work of a number of branches of a network is minimal, which significantly reduces the cost of building and maintaining the network, and the solver minimizes the power loss between the subjects of energy exchange and, as a result to savings from the standpoint of cost of construction of the network and the management of overflows of energy in it

Keywords: TRANSIT, ENERGY, TRANSPORT MATRIX, ENERGY TRANSPORTATION, ENERGY SAVING TECHNOLOGY, SOURCE, CONSUMER, COSTS

В условиях параллельной работы энергосистем в составе их объединения, для реализации межсистемного эффекта рациональности потребления энерго мощностей и энергоресурсов, а также покрытия дефицита мощности на отдельных участках локальной сети возникает необходимость в значительных перетоках энергии. В тоже время имеет место быть дополнительный технологический расход электроэнергии от транзитных перетоков, а экономия от реализации межсистемного эффекта при параллельной работе энергосистемы во всех случаях значительно превышает затраты, вызываемые потерями энергии от них.

Наряду с этим не менее важными являются вопросы совершенствования эксплуатационного обслуживания энергетических сетей, оптимизация их схем и режимов.

Известно, что одним из наиболее важных факторов при выборе энергопоставщика является цена на электроэнергию, которая на прямую зависит от величины технических потерь в локальных или глобальных электрических сетях. Очевидно, что эти потери складываются как из потерь при передаче энергии от поставщика к потребителю, так и при транспортировке для других поставщиков и энергопотребителей. Вследствие чего возрастает стоимость отпускаемой электрической энергии и, как следствие, конкурентоспособность между поставщиками. Поддержка конкуренции поставщиков на энергорынке требует не только регулировки условий деятельности на рынке услуг за счет тарифа, но и технологической оптимизации потерь при передаче от поставщика к потребителю во фрагментарных электрических сетях областных энергоснабжающих компаниях (энергокластеров). Компенсация потерь за счет тарифа на энергию, для потребителей одного лицензиата, вследствие включения в них стоимости потерь от передачи мощности другим потребителям экономически несправедливо, последнее подтверждается и международной практикой. Так, в Австралии, согласно новому

электроэнергетического кодексу, предусматривается обязанность крупных потребителей (максимальная мощность более 10 МВт) дополнительно к стоимости потребленной электроэнергии оплачивать и часть потерь передачи мощности этому потребителю [4].

Структурные изменения в электроэнергетике, связанные с введением рыночных отношений между субъектами энергообмена (производителями и потребителями), стало актуальным [1, 2].

В различных схемах электроэнергетических систем достаточно часто оказывается целесообразным передача энергии и её мощности через промежуточные (транзитные) узлы. Простейшие электрические схема сети поясняющие понятие «транзит мощности» это две схемы топология которых такова – имеются источники электроэнергии (U_1) и два потребителя (P_2, P_3) напрямую соединенные с источником. Если источник передаёт всю потребляемую энергию на P_2 , а затем через него на P_3 , то мы имеем простейшую транзитную схему, в которой узел P_2 является одновременно потребителем и транзитером. Рассматривая транспортную задачу с транзитом мощности, где источников m , а количество потребителей n , передача мощностей между источниками энергии и ее потребителями может быть различной, достаточно часто в настоящее время становится целесообразным использование промежуточных узлов (транзитных). Предлагаемая схема ориентирована не только на оптимизацию потерь мощности, при её транспортировке, но и на технологическую реконструкцию, которая также минимизирует экономические потери

Из сказанного выше следует, что транспортная задача в такой постановке имеет более обобщенный характер и расширяет возможности, особенно для локальных участков энергокластера. При решении транспортной задачи с транзитом мощности одним из важных вопросов становится определение, к какому типу задач она относится.

Известно два типа задач - закрытая и открытая, с помощью которых можно рассматривать и решать такого рода задачи. В открытой форме постановки задачи с транзитом мощности, которая в отличие от закрытой для m источников и n потребителей энергии требуется, чтобы сумма потребляемой энергии превышала сумму оттекаемой. В этом случае минимизируется стоимость транспортировки, при условии, что вся произведенная энергия от поставщиков должна быть потреблена.

Обозначим через X_{ij} количество отпускаемой электроэнергии от источников к потребителям, при этом стоимость передачи мощности между узлами i и j не зависит от направления движения этой мощности, поэтому в рассматриваемой задаче $Z_{ij} = Z_{ji}$, в связи с этим нумерации количества источников m и потребителей n присваивается одна нумерация $- 1, 2, \dots, (n + m)$.

Целевая функция представляет собой сумму произведений удельных стоимостей на величины передаваемых мощностей от одного транзитного узла другому:

$$Z = Z_{11}X_{11} + \dots + Z_{1n}X_{1n} + Z_{21}X_{21} + \dots + Z_{2n}X_{2n} + Z_{m1}X_{m1} + \dots + Z_{mn}X_{mn} = \sum_{i=1}^{n+m} \sum_{j=1}^{n+m} Z_{ij}X_{ij} \rightarrow \min \quad (1)$$

Для оценки удельных затрат передачи мощности Z_{ij} через i -ый транзитный узел рассмотрим простейшую транзитную схему, которая была описана выше. Затраты в рассматриваемой упрощенной сети (рисунок 1) с транзитом мощности через потребителя Π_2 определяются:

$$Z = Z_{12}X_{12} + Z_{23}X_{23} \quad (2)$$

Как видно из соотношения (2) транзитная мощность, проходящая через узел Π_2 , определяется как $X_{22} = \Pi_3$, то есть величина транзитной мощности передаваемая через Π_2 , равна потребляемой мощности потребителя Π_3 . В соотношение (2) X_{22} не входит, очевидно, что удельные затраты на передачу транзитной мощности через любой i -ый узел $Z_{ij} = 0$.

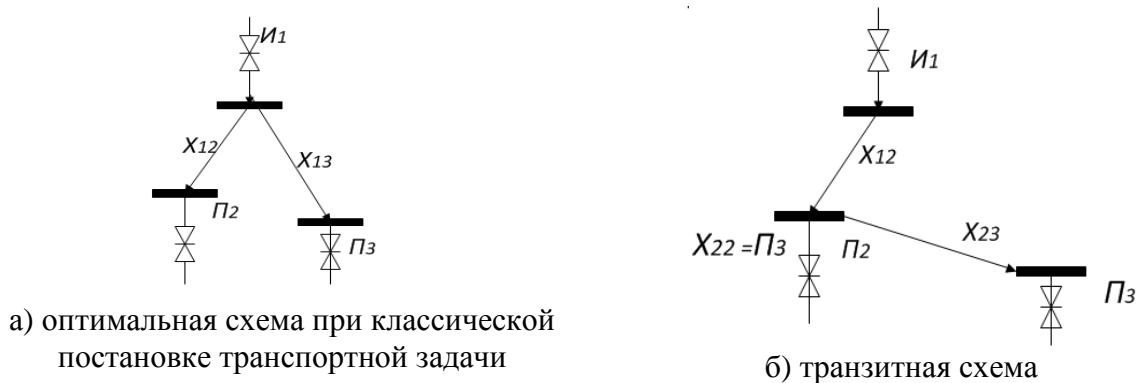


Рисунок 1 - Упрощенная сеть

По-видимому, вполне возможно, что эта схема (рисунок 1а) электрической сети будет дороже, чем схема на рисунке 1б с теми же самыми поставщиками и потребителями, мощность в которой передается через потребителя $П_2$ к потребителю $П_3$.

Ограничениями при решении транспортной задачи с транзитом мощности будут балансы мощности во всех узлах, относительно схемы (рисунок 1) для узла $П_2$. Тогда, баланс мощности запишется следующим образом:

$$X_{12} = B_{22} + X_{22}$$

В общем случае для любого j -го потребителя от всех других узлов, за вычетом транзитной мощности, равна мощности этого потребителя:

$$\sum_{i=1}^{n+m} (i \neq j) X_{ij} - X_{ij} = П_j \quad (3)$$

Как следует из выше сказанного такое же соотношение можно записать для i -го источника, то есть сумма мощностей оттекающих от i -го источника к другим узлам, за вычетом транзитной мощности X_{ij} , есть мощность этого источника:

$$\sum_{j=1}^{n+m} (i \neq j) X_{ij} - X_{ii} = U_i \quad (4)$$

Из соотношения (3) и (4) следует, что транзитная мощность входит в математическую модель транспортной задачи линейного программирования со знаком «->».

Составим транспортную матрицу для решения задачи транзита

мощности, алгоритм которой с учетом отличительных особенностей (3) и (4), присущих этой задаче:

1. Присвоение сквозной нумерации всем узлам источников и потребителей – $1, 2, \dots, (n+m)$;
2. любой i -ый узел может передавать транзитную мощность;
3. удельная стоимость транзитной мощности через ii -ый узел $Z_{ii}=0$;
4. размерность транспортной матрицы - $(n+m) (n+m)$ и она квадратная;
5. в транспортную матрицу транзитные переменные X_{ii} входят в решение задачи со знаком «-»;
6. вне зависимости от значений все транзитные переменные считаются базисными.

В качестве примера рассмотрим задачу, которая позволяет найти экстремальные значения целевой функции (1), при ограничениях и соотношениях между переменными (2), (3), (4) в диапазоне переменных, определяемых граничными условиями.

Пример 1: В проектируемой системе энергоснабжения [2] имеется два узла источников электроэнергии и три узла потребителей. Мощность источников $I_1=50$ и $I_2=30$, мощности потребителей соответственно $P_3=35$, $P_4=25$, $P_5=20$ (рисунок 2). Ставится задача рассчитать оптимальную схему сети энергообмена между ее участниками для поставленной задачи, используя транзитную технологию.

Удельные затраты при передаче мощности по линиям, соединяющим узлы источников и потребителей несколько изменятся, а с учетом того, что $Z_{ii}=0$ получаем следующее:

$Z_{12}=2,5$; $Z_{13}=1,4$; $Z_{14}=1,3$; $Z_{15}=1,2$; $Z_{21}=2,5$; $Z_{23}=1,7$; $Z_{24}=2,0$; $Z_{25}=1,5$;
 $Z_{31}=1,4$; $Z_{32}=1,7$; $Z_{34}=2,0$; $Z_{35}=2,1$; $Z_{41}=1,5$; $Z_{42}=2,0$; $Z_{43}=2,0$; $Z_{45}=1,3$;
 $Z_{51}=1,2$; $Z_{52}=1,3$; $Z_{53}=2,1$; $Z_{54}=1,3$.

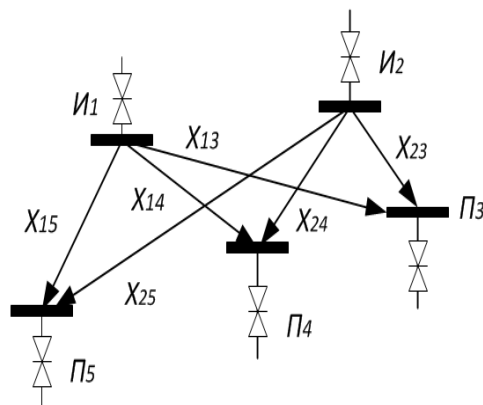


Рисунок 2 - Проектируемая система энергоснабжения

Для данного примера это будет транспортная матрица транзита мощности 5x5, представленная в таблице 1. Улучшенное решение будем искать методом потенциалов, для этого в таблице 1 установлены балансы мощности по строкам и столбцам, согласно методу потенциалов и удельной мощности. Присвоим потенциалы V_i каждой строке и U_j каждому столбцу, которые взаимосвязаны соотношением: $V_i + U_j = Z_{ij}$.

Таблица 1

	$U_1=1,0$	$U_2=3,5$	$U_3=2,3$	$U_4=2,5$	$U_5=2,2$	
$V_1=-1,0$	0 0	$X_{12}=0$ 2,5	$X_{13}=5$ 1,4	$X_{14}=25$ 1,3	$X_{15}=20$ 1,2	$I_1=50$
$V_2=1,5$	$X_{21}=0$ 2,5	0 0	$X_{23}=30$ 1,7	$X_{24}=0$ 2,0	0 1,5	$I_2=30$
$V_3=0,4$	$X_{31}=0$ 1,4	$X_{32}=0$ 1,7	0 0	0 2,0	0 2,1	$P_3=0$
$V_4=0,6$	$X_{41}=0$ 1,6	$X_{42}=0$ 2,0	0 2,0	0 0	0 1,3	$P_4=0$
$V_5=0,2$	$X_{51}=0$ 1,2	$X_{52}=0$ 1,3	$X_{53}=0$ 2,1	$X_{54}=0$ 1,3	0 0	$P_5=0$
	$I_1=0$	$I_2=0$	$P_3=35$	$P_4=25$	$P_5=20$	Z

Найдем величины этих потенциалов и поставим их в таблицу 1. Поскольку для базисных переменных (таблица 1) $Z_{ii}=0$, то $V_i = -U_j$.

Для улучшения решения проверим возможности перевода свободных переменных в базисные. Для этого рассмотрим свободную переменную X_{45} , для которой $Z_{45}=1,3$ является минимальной в пятом столбце. Тогда,

$$V_4 + U_5 = -0,6 + 2,2 = 1,6$$

Следовательно, X_{45} можно перевести в базис, строим цикл, начальная вершина цикла лежит в клетке X_{45} со знаком «+», остальные вершины X_{25} , X_{23} , X_{43} . При увеличении свободной переменной X_{43} входит со знаком минус ее изменение в отрицательную сторону не ограничено, а переменные со знаком плюс ограничены нулем. Таким образом, значение всех переменных в цикле следует изменить на 5 у.е.

Аналогично строим цикл для X_{53} . В результате получим новое допустимое решение, результаты сведены в таблице 2.

Таблица 2

	$U_1=1,0$	$U_2=3,5$	$U_3=2,3$	$U_4=2,5$	$U_5=2,2$	
$V_1=-1.0$	0 0	0 2,5	5 1,4	25 1,3	20 1,2	$I_1=50$
$V_2=1.5$	0 2,5	0 0	30 1,7	0 2,0	0 1,5	$I_2=30$
$V_3=0.4$	0 1,4	0 1,7	0 0	0 2,0	0 2,1	$\Pi_3=0$
$V_4=0.6$	0 1,6	0 2,0	5 2,0	0 0	0 1,3	$\Pi_4=0$
$V_5=0.2$	0 1,2	0 1,3	0 2,1	0 1,3	0 0	$\Pi_5=0$
	$I_1=0$	$I_2=0$	$\Pi_3=35$	$\Pi_4=25$	$\Pi_5=20$	$Z=117.5$

Для полученного допустимого решения найдем значение целевой функции, базисные переменные в которой соответственно равны: $X_{15}=20$, $X_{54}=25$, $X_{43}=5$, $X_{23}=30$. При этом в решении выполнено условие $V_i + U_j < Z_{ij}$, и оно является оптимальным.

$$Z = Z_{15}X_{15} + Z_{54}X_{54} + Z_{43}X_{43} + Z_{23}X_{23} = 20 * 1,2 + 25 * 1,3 + 5 * 2,0 + 30 * 1,7 = 117,5$$

Этому решению соответствует следующая схема (рисунок 3):

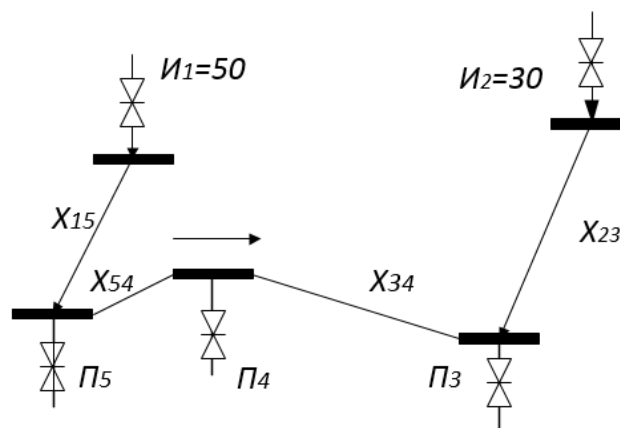


Рисунок 3 Оптимальная транзитная схема электросети

Как видно из приведенного решения количество ветвей в этой сети минимальное, что свидетельствует об эффективном снижении затрат на строительство сети, а сам механизм позволяет оптимизировать транспортировку от поставщиков электроэнергии к потребителям.

Таким образом, технологические характеристики и совершенствование эксплуатационного обслуживания способствуют эффективной экономической оптимизации транзитной транспортировки мощностей и, как следствие, повышает конкурентоспособность на энергорынке.

Список литературы:

1. Аввакумов В.Г. Постановка и решение электроэнергетических задач исследования операций. - Киев: Вища школа, 1983.
2. Костин В.Н. Оптимизационные задачи электроэнергетики Учебное пособие СЗ ГЗТУ. Издательско-полиграфическая ассоциация вузов Санкт-Петербург, 2003.
3. Степанов В.В., Степанова М.В., Степанов В.В.. Оптимизация поставки электроэнергии на примере использования транспортной задачи.- Сборник научных статей XVII всероссийская научно-практическая конференция (заочная) «Инновационные технологии в образовательном процессе, Краснодар, 2015
4. Степанов В.В., Степанова М.В., Кабанков Ю.А. Применение транспортной задачи для оптимизации в межрегиональных сетевых компаниях передачи электроэнергии.- VI Международная научно-практическая конференция молодых ученых, посвященная 55-й годовщине полета Ю.А.Гагарина в космос», Краснодар, 2016.

References:

1. Avvakumov V.G. Postanovka i reshenie jelektrojenergeticheskikh zadach issledovanija operacij. - Kiev: Vishha shkola, 1983.
2. Kostin V.N. Optimizacionnye zadachi jelektrojenergetiki Uchebnoe posobie SZ GZTU. Izdatel'sko-poligraficheskaja asociacija vuzov Sankt-Peterburg, 2003.
3. Stepanov V.V., Stepanova M.V., Stepanov V.V.. Optimizacija postavki jelektrojenergii na primere ispol'zovanija transportnoj zadachi.- Sbornik nauchnyh statej XVII vsrossijskaja nauchno-prakticheskaja konferencija (zaohnaja) «Innovacionnye tehnologii v obrazovatel'nom processe, Krasnodar, 2015
4. Stepanov V.V., Stepanova M.V., Kabankov Ju.A. Primenenie transportnoj zadachi dlja optimizacii v mezhregional'nyh setevyh kompanijah peredachi jelektrojenergii.- YI Mezhdunarodnaja nauchno-prakticheskaja konferencija molodyh uchenyh, posvjashennaja 55-j godovshhine poleta Ju.A.Gagarina v kosmos», Krasnodar, 2016.