

УДК 621.316.1.05

UDC 621.316.1.05

05.00.00 Технические науки

Technical science

ЗАДАЧИ ЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ, ОПИСЫВАЮЩИЕ МИНИМИЗАЦИЮ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ ПРИ ПЕРЕДАЧЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ОТ ИСТОЧНИКОВ К ПОТРЕБИТЕЛЯМ

LINEAR PROGRAMMING PROBLEM DESCRIBING THE MINIMIZATION OF POWER LOSSES IN TRANSMISSION OF ELECTRICITY FROM SOURCES TO CONSUMERS

Лаптев Владимир Николаевич
к.т.н., доцент
ФГБОУ «Кубанский государственный аграрный университет», 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, Russia, Krasnodar, st. Red, 135,

Степанова Марина Валерьевна
старший преподаватель
Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков им. А.К. Серова, г. Краснодар, Россия

Stepanova Marina Valerievna
senior teacher
Krasnodar Higher Military Aviation School A.K.Serov, 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, Russia, Krasnodar, st. Red, 135

Кабанков Юрий Андреевич
к.т.н, профессор
Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков им. А.К. Серова, г. Краснодар, Россия

Kabankov Yuri Andreevich
Cand. Tech. Sci., Professor
Krasnodar Higher Military Aviation School A.K.Serov, Krasnodar, Russia

Данная работа выполнена в научном и практическом направлениях по минимизации потерь мощности при передаче электроэнергии в межрегиональных распределительных сетях от источников к потребителю, путем использования задач, обеспечивающих поэтапное улучшение опорного плана не только с позиции эффективности снижения потерь транспортируемой мощности, но и за счет значительного уменьшения трудоемкости расчетов. Возникающий дефицит мощностей электроэнергии, связанный с ее передачей в электроэнергетических сетях, потребовал необходимость поиска возможных путей снижения величины потерь электроэнергии при транспортировке, как за счет совершенствования, так и за счет оптимизации схем распределительных сетей. Объединение в единый комплекс электрооборудования, называемый энергокластером, подключенный к источникам питания и энергопотребления, позволило эффективно использовать новые принципы

The work is done in a scientific and practical ways to minimize power losses in the transmission of electricity in the interregional distribution networks from the sources to the consumer by the use of tasks, ensuring the gradual improvement in the support program, not only from the standpoint of the efficiency of reduction of transported power loss, but also due to a significant decrease the complexity of the calculations. The resulting shortage of electricity power associated with its transfer to the electricity networks, has demanded the need to find possible ways of reducing the value of electricity losses during transportation, both by improving and by optimizing distribution net-works schemes. Consolidation into a single set of electrical equipment, called the power cluster is connected to the sources of power and energy consumption, make better use of new principles of control technology and the transmission of electricity, on the basis of an automated monitoring system, ensuring the redistribution of energy flows and optimize them. The process of electric power transmission and reduction in electric power loss can

технологии управления и передачи электроэнергии, на основе автоматизированной системы мониторинга, обеспечивая перераспределение потоков энергии и их оптимизацию. Процесс передачи электроэнергии и снижения электрических потерь в электросетях можно рассматривать на основе задач линейного программирования и их модификации в виде транспортной задачи, и, как следствие, транспортной матрицы. На этой основе, манипулируя данными таблицы, можем находить допустимые решения, ну, а затем, уже из них определять оптимальные. В качестве примеров в данной работе проводятся исследования на основе трех методов – «северо-западного угла», метода минимальной удельной стоимости транспортировки электроэнергии, а также метода потенциалов. Применение этих трех методов позволило получить допустимые решения, выявить наиболее оптимальный по количеству шагов проведенных при решении, выявить, что выигрышным по затратам является метод потенциалов

Ключевые слова: МЕТОД ПОТЕНЦИАЛОВ, МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ, ИСТОЧНИКИ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ, МОЩНОСТЬ, МЕТОД СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО УГЛА, МИНИМАЛЬНАЯ СТОИМОСТЬ ТРАНСПОРТИРОВКИ, ОПОРНЫЙ ПЛАН, ТРАНСПОРТНАЯ ТАБЛИЦА

be considered on the basis of linear programming problems, and their modification in the form of a transportation problem, and as a result, the transport matrix. On this basis, manipulating the data table, we can find acceptable solutions, well and then determine the best of them. As examples, this work has carried out the study on the basis of the three methods - "northwest corner", the method of minimum unit cost of electricity transport, as well as the method of the potential. The use of these three methods yielded acceptable solutions, to identify the most appropriate for the number of steps carried out at the decision, to reveal that the winner is the potential cost method

Keywords: METHOD POTENTIAL, MATHEMATICAL MODELS, ENERGY SOURCES, SOURCES CONSUMERS, POWER, METHOD OF NORTHWEST ANGLE, MINIMUM COST OF TRANSPORT, REFERENCE PLANS, TRANSPORT TABLE

Doi: 10.21515/1990-4665-124-027

Совершенствование системы эксплуатации и оптимизация схем электроэнергетических распределительных сетей и режимов, на основе прогнозирования их параметров одна из важных проблем в условиях внедрения энергосберегающих технологий в электроэнергетике. Основными методологическими элементами решения транспортной задачи являются кластеры, представляющие собой совокупность элементов электросетей, источников, электроприемников и элементов управления [4], которые эффективно используют новые принципы, а именно технологии управления и передачи электроэнергии - объединяя в единое целое потребителей и производителей на основе автоматизированной системы мониторинга, обеспечивая перераспределение потоков электроэнергии,

оптимизируя схемы за счет полученных в ходе мониторинга исходных данных.

Известно, что при перераспределении тока по параллельным ветвям, имеющих одинаковое сопротивление, суммарные потери энергии снижаются вдвое. Очевидно, что перераспределение потоков по линиям электропередач в современных условиях, когда сеть объединена в единый комплекс, включающий предприятия генерации и транспортировки электроэнергии целесообразно оптимизировать.

В основу процессов оптимизации задач электроэнергетики положена транспортная задача линейного программирования, благодаря своей специфике эти задачи могут быть решены с помощью более эффективных алгоритмов, чем симплекс-метод – один из первых методов решения такого типа задач [2].

Рассмотрим одну из простейших постановок транспортных задач. Пусть имеется m пунктов (поставщиков) энергии $M_{I1} \dots M_{Im}$, имеющие соответственно $M_{I1} \dots M_{Im}$ мощности, которые необходимо доставить в n пунктов потребления $M_{II1}, M_{II2}, \dots, M_{IIn}$.

Известно, что удельная стоимость транспортировки единицы мощности от источника к потребителю Z_{ij} . Составим план передачи электроэнергии от источников к потребителям, при котором будут удовлетворены потребители и при этом стоимость транспортировки будет минимальной. Поставленная таким образом задача называется закрытой. Очевидно, она будет иметь решение, если сумма мощностей источников будет равна сумме мощностей потребителей [2]. Несомненно, что транспортная задача может быть и в открытой форме, то есть когда сумма мощностей у источников больше, чем у потребителей или же наоборот.

В первом случае требуется минимизировать стоимость транспортировки электроэнергии, при условии, что все потребности потребителей должны быть выполнены.

Во втором случае минимизируется стоимость транспортировки мощности, при условии, что вся мощность поставщиков должна быть передана потребителям.

Известно, что $M_{Иi}$ и $M_{Пj}$ – узлы источников электроэнергии и узлы источников потребителей подаваемой мощности. Обозначив через Z_{ij} удельную стоимость транспортировки единицы мощности от поставщика к потребителю [4], можем говорить, что условие транспортной задачи (математическая модель) может быть представлена в виде следующей таблицы

Таблица 1. Транспортная таблица

Поставщики энергии	Потребители мощности						Мощность поставки
	$M_{П1}$	$M_{П2}$	$M_{П3}$	$M_{П4}$...	$M_{Пn}$	
$M_{И1}$	X_{11} Z_{11}	X_{12} Z_{12}	X_{13} Z_{13}	X_{14} Z_{14}	...	X_{1n} Z_{1n}	$m_{И1}$
$M_{И2}$	X_{21} Z_{21}	X_{22} Z_{22}	X_{23} Z_{23}	X_{24} Z_{24}	...	X_{2n} Z_{2n}	$m_{И2}$
$M_{И3}$	X_{31} Z_{31}	X_{32} Z_{32}	X_{33} Z_{33}	X_{34} Z_{34}	...	X_{3n} Z_{3n}	$m_{И3}$
...				
$M_{Иn}$	X_{1n} Z_{n1}	X_{2n} Z_{n2}	X_{3n} Z_{n3}	X_{4n} Z_{n4}	...	X_{nn} Z_{nn}	$m_{Иn}$
Потребители энергии	m_{n1}	m_{n2}	m_{n3}	m_{n4}	...	m_{nn}	

Рассмотрим закрытую транспортную задачу, так как задача в открытой форме решается путем сведения ее к закрытой форме. Тогда математическая модель транспортировки электроэнергии от источников потребителям выразится в виде целевой функции ограничений и граничных условий:

$$Z = Z_{11}X_{11} + Z_{12}X_{12} + \dots + Z_{1n}X_{1n} + \dots + Z_{nn}X_{nn} \rightarrow \min (\max) \quad (1)$$

$$\begin{cases} X_{11} + X_{21} + X_{31} + \dots + X_{nn} = m_{n1} \\ \dots \\ X_{1n} + X_{2n} + X_{3n} + \dots + X_{nn} = m_{nn} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} X_{11} + X_{12} + X_{13} + \dots + X_{1n} = m_{11} \\ \dots \\ X_{n1} + X_{n2} + X_{n3} + \dots + X_{nn} = m_{nn} \end{cases} \quad (3)$$

$$X_{ij} \geq 0 \quad (4)$$

Метод северо-западного угла – нахождение опорного плана (решения) транспортной задачи оптимизации. Рассмотрим этот процесс на примере. Пусть имеет место три источника и четыре потребителя, мощности которых соответственно $M_{И1}=50$, $M_{И2}=200$, $M_{И3}=200$ единиц мощности и $M_{П1}=100$, $M_{П2}=150$, $M_{П3}=150$, $M_{П4}=50$ единиц мощности (ед.м.)

Заполнение транспортной таблицы начинается с левого верхнего «северо-западного угла», то есть с удовлетворения потребностей потребителя $M_{П1}$ за счет источников энергии $M_{И1}$, $M_{И2}$, $M_{И3}$.

В результате, за счет $M_{И1}$ могут быть удовлетворены 50 единиц мощности, которые и помещаем в клетку на пересечении $M_{П1}$ - $M_{И1}$. Очевидно, что возможности поставщика энергии $M_{И1}$ полностью исчерпаны, в остальные клетки первой строки таблицы ставим прочерки и устанавливаем тем самым баланс мощностей по первой строке. в первом столбце таблицы баланс не установлен, поэтому оставшуюся потребность $M_{П1}$ в 50ед.м. устанавливаем за счет $M_{И2}$, записывая в клетку $M_{П2}$ - $M_{И1}$ число 50ед.м, тем самым устанавливаем баланс мощности по первому столбцу таблицы, и ставим прочерки в последней клетке этого столбца, зная, что потребности $M_{П1}$ полностью удовлетворены.

После этого переходим к потребителю $M_{П2}$, потребность которого 150 ед. м. Данную потребность удовлетворяем за счет $M_{И2}$, записывая в клетку $M_{П2}$ - $M_{И2}$ число 150 ед. м., а в остальных свободных клетках второй строки и второго столбца ставим прочерки.

Переходим к удовлетворению запросов по энергии $M_{П3}$ в 150 ед. м., за счет $M_{И3}$, обладающего мощностью в 200 ед.м. Записываем в клетку

$M_{ПЗ} - M_{ИЗ}$ величину 150 ед.м., тем самым удовлетворяя потребности $M_{ПЗ}$ полностью, а оставшееся количество энергии в 50 ед.м. $M_{ИЗ}$ идет на замещение потребностей $M_{П4}$, а в оставшиеся незаполненные клетки ставим прочерки [5].

Полученный опорный план является вырожденным, так как таблица 2 содержит пять занятых клеток, в то время как число базисных переменных равно четырем.

Таблица 2. Опорный план на основе северо-западного угла

Поставщики энергии	Потребители мощности				Мощность поставки
	$M_{П1}$	$M_{П2}$	$M_{П3}$	$M_{П4}$	
$M_{И1}$	50 10	— 8	— 7	— 9	50
$M_{И2}$	50 8	150 6	— 5	— 7	200
$M_{И3}$	— 5	— 4	150 7	50 6	200
Потребители энергии	100	150	150	50	Z=3150

При этом стоимость транспортировки электроэнергии по сети составит:

$$Z = 50 * 10 + 50 * 8 + 150 * 6 + 150 * 7 + 50 * 6 = 3150$$

Построение опорного плана методом минимальной стоимости.

Для этого рассмотрим таблицу 2 и среди клеток этой таблицы выбираем клетку с минимальной удельной стоимостью транспортировки электроэнергии. Такой клеткой является $M_{П2} - M_{И3}$ ($Z=4$).

В новую таблицу 3 вносим 150 ед.м., величина которой равна потребностям $M_{П2}$. Во все остальные клетки второго столбца ставим прочерки.

Повторяем процедуру для первого столбца, и ищем клетку с минимальной стоимостью, это будет $M_{И3} - M_{П1}$ ($Z=5$). Число, характеризующее мощности источника $M_{И3}$, определено на данный момент в виде остатка 50 ед.м., которое и заносим в клетку $M_{И3} - M_{П1}$.

Так как в источнике мощностей $M_{ИЗ}$ запасы энергии полностью исчерпаны, то в остальные клетки третьей строки ставим прочерки.

Из оставшихся клеток таблицы находим клетку с минимальной удельной стоимостью транспортировки, которой является клетка $M_{И2}-M_{П3}$ ($Z= 5$). Выбираем меньшее из мощностей $M_{И2}= 200$ ед.м. и $M_{П3}= 150$ ед.м. и проставляем в эту клетку $M_{И2}-M_{П3}$ величину равную наименьшему из значений (150 ед.м.), остаток мощности при этом составит 50 ед.м..

Так как потребитель $M_{П3}$ полностью удовлетворен, ставим прочерки во все оставшиеся клетки третьего столбца. Тем самым баланс мощности в этом столбце установлен.

Выбираем клетку $M_{И2} - M_{П4}$. В виду установленного баланса в четвертом столбце и второй строке в оставшиеся клетки второй строки также проставляем прочерки.

Найдем стоимость транспортировки электроэнергии по сети для метода минимальной стоимости (1):

$$Z=50*10+50*5+150*4+150*5+50*7=2450$$

Таблица 3.Опорный план метода минимальной стоимости

Поставщики энергии	Потребители мощности				Мощность поставки
	$M_{П1}$	$M_{П2}$	$M_{П3}$	$M_{П4}$	
$M_{И1}$	50 10	— 8	— 7	— 9	50
$M_{И2}$	— 8	— 6	150 5	50 7	200
$M_{И3}$	50 5	150 4	— 7	— 6	200
Потребители энергии	100	150	150	50	Z=2450

Как видно из расчетов и сводной таблицы 3, стоимость транспортировки энергии значительно ниже, чем при использовании метода «северо-западного угла».

Нахождение оптимального плана транспортировки электроэнергии путем использования метода потенциалов.

Напомним, что если план невырожденный, то в некоторые клетки транспортной матрицы, оставшиеся свободными, можно записать нули и считать такие клетки заполненными, и получить необходимое для данного плана число занятых клеток. При этом особое внимание необходимо уделять при простановке нулей, чтобы не возникло циклов с вершинами в занятых клетках.

Поиск оптимального плана ориентирован на последовательный переход от одного опорного плана к следующему, лучшему плану. Сущность такого перехода в следующем. Известно, что для каждой свободной клетки в невырожденном опорном плане существует единственный, проходящий через нее цикл, все остальные вершины которого лежат в занятых клетках. Для примера рассмотрим полученный по методу северо-западного угла опорный план (таблица 4).

Таблица 4. Исходный опорный план

Поставщики энергии	Потребители мощности				Мощность поставки
	$M_{П1}$	$M_{П2}$	$M_{П3}$	$M_{П4}$	
$M_{И1}$	50 10	0 8	0 7	0 9	50
$M_{И2}$	50 8	150 Φ—6	0 —○ 5	0 7	200
$M_{И3}$	0 5	0 ○ 4	150 —○ 7	50 6	200
Потребители энергии	100	150	150	50	Z=3150

В клетках $M_{И2} - M_{П3}$ поставим ноль и эта клетка считается занятой. Далее, возьмем свободную клетку $M_{И3} - M_{П2}$ и пунктиром отметим содержащий ее цикл $M_{И3} - M_{П2}, M_{И2} - M_{П2}, M_{И2} - M_{П3}, M_{И3} - M_{П3}$.

В этом цикле сделаем следующее, переставим из клетки $M_{И2} - M_{П2}$ число 150 ед.м. в клетку $M_{И2} - M_{П3}$, чтобы по столбцам и строкам,

включающий этот цикл соблюдался баланс мощностей. Переставим из клетки $M_{ИЗ} - M_{ПЗ}$ число 150 ед.м. в свободную клетку $M_{ИЗ} - M_{П2}$.

Таким образом, получим новый опорный план (таблица 5).

Так как удельная стоимость транспортировки электроэнергии в клетке $M_{ИЗ} - M_{П2}$ меньше ($Z=4$), то и стоимость перевозок для этого

Таблица 5 Новый опорный план

Поставщики энергии	Потребители мощности				Мощность поставки
	$M_{П1}$	$M_{П2}$	$M_{П3}$	$M_{П4}$	
$M_{И1}$	50 10	0 8	0 7	0 9	50
$M_{И2}$	50 8	0 - 	150 + 	0 7	200
$M_{И3}$	0 5	150 + 	0 - 	50 6	200
Потребители энергии	100	150	150	50	$Z=2450$

опорного плана меньше. Пометим вершины цикла в свободной клетке «+» и «-», учитывая, что «+» - энергия поступает, а «-» - энергия передается.

Для характеристики полученного опорного плана подсчитаем сумму удельных стоимостей транспортировки электрической энергии, стоящих в вершинах цикла, с учетом знаков, в этих клетках. Получим $4-6+5-7=-4<0$ - эта сумма называется *ценой цикла*.

Очевидно, что если цена отрицательна, то циклический перенос уменьшает стоимость транспортировки, равную произведению цены на транспортируемую мощность электрической энергии, что в конечном итоге приводит к уменьшению плана. Если цена плана положительна, то циклический перенос увеличивает стоимость транспортировки и, как следствие, новый опорный план хуже предыдущего.

На основе вышесказанного можно сделать промежуточное заключение – если среди свободных клеток в опорном плане найдутся

клетки, для которых цикл отрицательный, то опорный план будет оптимальным.

Определение для каждой свободной клетки содержащего ее цикла и подсчет цены построенного плана является весьма трудоемким процессом. Избежать этого можно, если воспользоваться методом потенциалов. Для этого необходимо каждому поставщику электроэнергии M_{ui} ($i=1, \dots, n$) и потребителю ее M_{lj} ($j=1, \dots, n$) поставить в соответствие некоторое число (потенциал U_i и V_j – соответственно для источников и потребителей), удовлетворяющее следующим условиям [1, 2]:

$$U_i + V_j = Z_{ij} \quad (5)$$

где Z_{ij} – матрица удельных стоимостей транспортировки электроэнергии от поставщика к потребителю.

$$Z_{ij} = \begin{pmatrix} 10 & 8 & 7 & 9 \\ 8 & 6 & 5 & 7 \\ 5 & 4 & 7 & 6 \end{pmatrix}$$

Вернемся к первоначальному опорному плану (таблица 2). Как видно из транспортной таблицы план является вырожденным. С целью полного построения системы потенциалов одну из свободных клеток, а именно M_{12} - M_{13} ставим ноль, то есть полагаем, что $U_2 = 0$. С помощью $U_2 = 0$ можно достаточно просто определить наибольшее число других потенциалов, используя соотношение (5). Например, $U_2 + V_1 = 8$, отсюда $V_1 = 8$.

Аналогично определяем все остальные потенциалы [3]. Манипулируя таким образом можно подойти к следующему опорному плану (таблица 6).

Таблица 6 Опорный план, полученный методом минимальной стоимости

Поставщики энергии	Потребители мощности				Мощность поставки
	$M_{П1} V_1=1$	$M_{П2} V_2=0$	$M_{П3} V_3=1$	$M_{П4} V_4=1$	
$M_{И1} U_1=8$	0 10	50 8	0 7	0 9	50
$M_{И2} U_2=6$	0 8	50 6	150 5	0 7	200
$M_{И3} U_3=4$	100 5	50 4	0 7	50 6	200
Потребители энергии	100	150	150	50	Z=2450

При нахождении опорного плана в таблице 6 положим $V_2=0$, тогда для всех свободных клеток цена цикла будет неотрицательна, а полученный план будет оптимальным. Стоимость транспортировки электроэнергии по сети составит:

$$Z = 100 * 5 + 50 * 8 + 50 * 6 + 50 * 4 + 150 * 5 + 50 * 6 = 2450$$

Следует отметить, что опорный план полученный методом минимальной стоимости имеет ту же стоимость транспортировки и является оптимальным. В тоже время метод потенциалов менее трудоемкий по сравнению с методом минимальной стоимости, обеспечивает получение ожидаемого результата за меньшее число шагов.

Литература:

1. Лаптев В.Н, Степанов В.В., Атрощенко В.А., Кабанков Ю.А., Степанова М.В. К вопросу нахождения оптимальных потерь мощности в электроэнергетических сетях на основе решения транспортной задачи методом потенциалов. Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2016. – №09(120). С. 870–887. – IDA [article ID]: 1031409014. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2016/06/pdf/59.pdf>, 0,90 у.п.л.
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., Кабанков Ю.А. Применение транспортной задачи для оптимизации в межрегиональных сетевых компаниях передачи электроэнергии. В сборнике: VI Международная научно-практическая конференция молодых ученых, посвященная 55-й годовщине полета Ю.А. Гагарина в космос сборник научных статей. КВВАУЛ им. А.К. Серова. 2016. с. 217-221.

4. Степанов В.В., Степанова М.В., Степанов В.В. Оптимизация поставки электроэнергии на примере использования транспортной задачи В сборнике: V Международная научно-практическая конференция молодых ученых, посвященная 54-й годовщине полета Ю.А. Гагарина в космос сборник научных статей. КВВАУЛ им. А.К. Серова. 2015.

5. Курицкая Б.Я. Поиск оптимальных решений средствами Excel 7,0 - С-Пб; BHV, 1997г.

References

1. Laptev V.N, Stepanov V.V., Atroshhenko V.A., Kabankov Ju.A., Stepanova M.V. K voprosu nahozhdenija optimal'nyh poter' moshhnosti v jelektrojenergeticheskikh setjah na osnove reshenija transportnoj zadachi metodom potencialov. Politematicheskij setevoj jelektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. (Nauchnyj zhurnal KubGAU) [Jelektronnyj resurs]. – Krasnodar: KubGAU, 2016. – №09(120). S. 870–887. – IDA [article ID]: 1031409014. – Rezhim dostupa: <http://ej.kubagro.ru/2016/06/pdf/59.pdf>, 0,90 u.p.l.

2. Kostin V.N. Optimizacionnye zadachi jelektrojenergetiki. Uchebnoe posobie SZ GZTU. Izdatel'sko-poligraficheskaja associacija vuzov Sankt-Peterburg, 2003.

3. Stepanov V.V., Stepanova M.V., Kabankov Ju.A. Primenenie transportnoj zadachi dlja optimizacii v mezhhregional'nyh setevykh kompanijah peredachi jelektrojenergii. V sbornike: VI Mezhdunarodnaja nauchno-prakticheskaja konferencija molodyh uchenyh, posvjashhennaja 55-j godovshhine poleta Ju.A. Gagarina v kosmos sbornik nauchnyh statej. KVVAUL im. A.K. Serova. 2016. s. 217-221.

4. Stepanov V.V., Stepanova M.V., Stepanov V.V. Optimizacija postavki jelektrojenergii na primere ispol'zovanija transportnoj zadachi V sbornike: V Mezhdunarodnaja nauchno-prakticheskaja konferencija molodyh uchenyh, posvjashhennaja 54-j godovshhine poleta Ju.A. Gagarina v kosmos sbornik nauchnyh statej. KVVAUL im. A.K. Serova. 2015.

5. Kurickaja B.Ja. Poisk optimal'nyh reshenij sredstvami Excel 7,0 - S-Pb; BHV, 1997g.