

Active Power Flow Optimization of Industrial Power Supply with Regard to the Transmission Line Conductor Heating

Leyzgold D.Yu., Chudinov A.V.

Perm National Research Polytechnic University
Perm, Russia

Abstract. This article studies the problem of the transmission line conductor heating effect on the active power flows optimization in the local segment of industrial power supply. The purpose is to determine the optimal generation rating of the distributed power sources, in which the power flow values will correspond to the minimum active power losses in the power supply. The timeliness is the need to define the most appropriate rated power values of distributed sources which will be connected to current industrial power supply. Basing on the model of active power flow optimization, authors formulate the description of the nonlinear transportation problem considering the active power losses depending on the transmission line conductor heating. Authors proposed a new approach to the heating model parameters definition based on allowable current loads and nominal parameters of conductors as part of the optimization problem. Analysis of study results showed that, despite the relatively small active power losses reduction to the tune 0,45% due to accounting of the conductors heating effect for the present configuration of power supply, there are significant fluctuations in the required generation rating in nodes of the network to 9,32% within seasonal changes in the outer air temperature. This fact should be taken into account when selecting the optimum power of distributed generation systems, as exemplified by an arbitrary network configuration.

Keywords: active power flow distribution, optimization of load in power supply, heating conductors.

Optimizarea distribuirii fluxurilor puterii active în sistemul de alimentare cu energie electrică ținând cont de încălzire a conductoarelor

Leizgolid D.Iu., Ciudinov A.V.

Universitatea Națională Politehnică din Permi
or. Permi, Federația Rusă

Rezumat. În articolul se investigează problema optimizării distribuirii fluxurilor de putere activă într-un segment local al rețelei de distribuție de energie electrică, la o întreprindere, ținând cont de încălzirea conductoarelor. Scopul lucrării constă în identificarea valorilor optime de putere ale instalațiilor de generare distribuită, cu condiție, că valorile fluxurilor de putere vor asigura minimum pierderilor de putere activă în rețea. Actualitatea problemelor abordate constă în necesitatea determinării puterii optime a instalațiilor de generare distribuită, conectate la rețeaua de întreprindere industrială existentă. Pe bază de un model de optimizare a fluxurilor de putere activă autorii formula descriere problemei neliniare de transport, care ține cont de schimbare a pierderilor puterii activă în dependență de valorile de încălzire a conductoarelor. În soluționarea problemei de optimizare, autorii au propus o nouă abordare pentru determinarea parametrilor modelului de încălzire a conductoarelor care folosește informații cu privire la valorile admisibile de curenților și de temperaturilor de încălzire izolației. Analiza rezultatelor studiului a demonstrat că, în ciuda reducerii relativ mică a pierderilor de putere activă la 0,45%, luând în considerare efectul de încălzire a conductoarelor, pot fi observate fluctuații esențiale ale puterii necesare în nodurile rețelei (pînă la 9,32%) în cadrul schimbării sezonieră a temperaturii exterioare, ce la rândul său, ar trebui de a fi luat în considerare atunci când se alege puterea optimă a instalațiilor de generare distribuită, ce este demonstrat prin exemplu a unei configurații arbitrare de rețea.

Cuvinte-cheie: distribuție fluxurilor energiei activă, optimizarea sarcinilor sistemului de alimentare cu energie electrică, încălzirea conductoarelor.

Оптимизация распределения потоков активной мощности в системе электроснабжения предприятий с учетом величины нагрева проводников

Лейзгольд Д.Ю., Чудинов А.В.

Пермский Национальный Исследовательский Политехнический Университет
г. Пермь, Российская Федерация

Аннотация. В данной статье рассматривается проблема учета влияния нагрева проводников при проведении оптимизации распределения потоков активной мощности локального сегмента распределительной сети электроснабжения промышленного предприятия. Целью работы является определение оптимальных значений мощности установок распределенной генерации, при которых распределение потоков будет соответствовать минимуму потерь активной мощности в сети электроснабжения. Актуальность решаемых задач заключается в необходимости определения

оптимальной мощности присоединяемых установок распределенной генерации к уже существующей сети электроснабжения промышленного предприятия. Основываясь на модели оптимизации потоков активной мощности, авторы формулируют описание нелинейной транспортной задачи, учитывающей изменение потерь активной мощности в зависимости от величины нагрева проводников. В рамках решения задачи оптимизации авторами предложен новый подход к определению параметров модели нагрева проводников с использованием данных о допустимых значениях токов и температур нагрева изоляции. Анализ результатов исследования показал, что, несмотря на сравнительно небольшое снижение потерь активной мощности до 0,45 % при учете влияния нагрева проводников, могут наблюдаться существенные колебания требуемой мощности генерации в узлах сети до 9,32 % в рамках сезонного изменения температуры наружного воздуха, что в свою очередь должно учитываться при выборе оптимальной мощности установок распределенной генерации, что показано на примере произвольно выбранной конфигурации сети.

Ключевые слова: распределение потоков активной мощности, оптимизация нагрузок системы электроснабжения, нагрев проводников.

Введение

Существующие сети централизованного электроснабжения спроектированы с учетом перспективного развития, однако исключить неконтролируемое разрастание сетей практически невозможно. Возникающая при этом неравномерность загрузки линий системы электроснабжения обуславливает наличие нерациональных потерь активной мощности, а следовательно, и энергии.

Разработка проектов в рамках концепции распределенной генерации частично нивелирует описанную выше проблему, но зачастую конфигурация сети электроснабжения от централизованного источника является неоптимальной с точки зрения распределения генерации, что снижает предполагаемые эффекты при ее реализации.

Полная замена распределительной сети электроснабжения является достаточно затратной, поэтому с точки зрения развития электроэнергетики в России [1] необходим более «мягкий», постепенный ввод распределенных генерирующих мощностей. Согласно этому, одной из актуальных задач является выбор оптимальной мощности генерирующих установок при заранее известных местах возможного присоединения к сети (ограничение мест присоединения может быть обусловлено наличием или отсутствием соответствующих энергоресурсов, наличием резервных ячеек на распределительных и трансформаторных подстанциях и другими технико-экономическими аспектами).

Решаемые при этом задачи по оптимизации потерь включают только основной критерий изменения потерь – нагрузку, при этом множество дополнительных критериев, например,

влияние нагрева проводников на сопротивление, старение изоляции проводников, качество электрической энергии [2] и др., не учитываются в диапазоне допустимой погрешности расчетов, ввиду увеличения сложности расчетов при большом количестве узлов и ветвей сети. Развитие и использование информационно-измерительных и управляющих систем [3-5], имеющих большие вычислительные мощности, в рамках концепции интеллектуальной электроэнергетической сети (Smart-Grid) позволяет использовать большое количество критериев в оптимизационной модели сети электроснабжения, а увеличение стоимости энергетических ресурсов и, как следствие, стоимости потерь, делает целесообразной их минимизацию даже в размере, не превышающем допустимую погрешность.

Описание оптимизационной задачи минимизации потерь мощности при распределении потоков мощности в электроэнергетике может быть представлено в виде транспортной задачи (ТЗ) [6, 7], в классическом описании представляющей задачу линейного программирования. Однако потери имеют квадратичную зависимость от мощности, внося нелинейность, что требует отличных от обычных способов решения ТЗ. Анализ описанных в литературе [8, 9] способов решения нелинейных ТЗ показал, что из таких методов, как методы штрафных функций, методы потокового и нелинейного программирования, генетические алгоритмы и методы линейной аппроксимации, последние являются наиболее целесообразными при решении задач с вогнутыми целевыми функциями низкой степени нелинейности, к которым

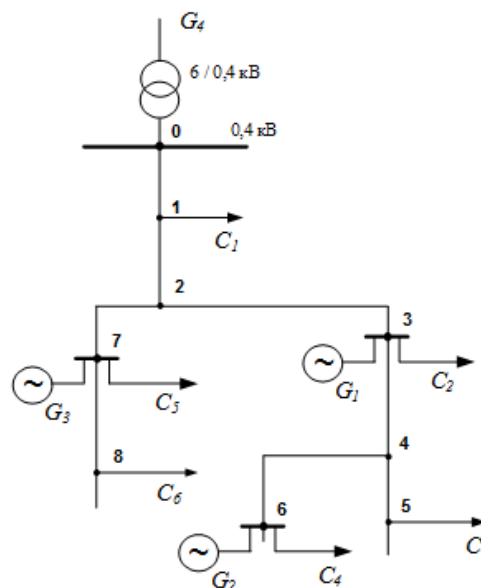
принадлежит рассматриваемая нелинейная ТЗ в электроэнергетике.

I. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью работы являлась минимизация потерь активной мощности в распределительной сети электроснабжения. Для этого необходимо было разработать оптимизационную модель, включающую зависимость сопротивления от нагрева проводника нагрузочным током.

В качестве объекта исследования был выбран участок распределительной сети предприятия, в котором планируется установка источников распределенной генерации, входящих в состав информационно-измерительной и управляющей системы локальной интеллектуальной электроэнергетической сети (рис. 1).

Параметры локального сегмента электроэнергетической системы представлены в табл. 1. В данном случае расчетное значение нагрузки отдельных участков сети определено в режиме потребления электрической мощности от одного источника — внешней энергосистемы (G_4).



C_1 – электротермическое оборудование, 63,84 кВт; C_2 – металлообрабатывающие станки, 76,63 кВт; C_3 – насосное оборудование, 71,4 кВт; C_4 – конвейерное оборудование, 47,3 кВт; C_5 – бытовые потребители, 46,8 кВт; C_6 – система освещения, 37,44 кВт; G_1, G_2, G_3 – планируемые места подключения элементов распределенной генерации, G_4 – внешняя энергосистема.

Рис. 1. Локальный сегмент системы электроснабжения

Таблица 1 – Параметры распределительной сети при питании от внешней энергосистемы

Участок на схеме	Тип линии	Длина линии (L), км	Сечение проводника на фазу (S), мм ²	Длительно допустимый ток (I_d), А	Расчетный нагрузочный ток (I_p), А	Активное сопротивление при температуре 20 °C (R_{20}), Ом
0-1	СБ-2*(3x70)	0,03	140	612	522,4	0,004
1-2	СБ-2*(3x50)	0,3	100	513	425,3	0,05
2-3	ВВГ-3x95	0,15	95	330	297,1	0,03
3-4	ВВГ-3x50	0,12	50	225	180,6	0,04
4-5	АВВГ-3x35	0,15	35	140	108,6	0,12
4-6	АВВГ-3x16	0,2	16	90	72,0	0,36
2-7	ВВГ-3x25	0,2	25	150	128,1	0,14
7-8	ВВГ-3x10	0,11	10	90	57,0	0,20
1- C_1	АВВГ-3x25	0,04	25	115	97,1	0,05
3- C_2	АВВГ-3x35	0,05	35	140	116,6	0,04
5- C_3	АВВГ-3x35	0,05	35	140	108,6	0,04
6- C_4	АВВГ-3x16	0,04	16	90	72,0	0,07
7- C_5	АВВГ-3x16	0,05	16	90	71,2	0,09
8- C_6	АВВГ-3x10	0,05	10	70	57,0	0,15

Примечание – удельное сопротивление меди и алюминия приняты равными 0,018 и 0,029 Ом·мм²/м, соответственно

Ввиду того, что активные мощности установок распределенной генерации не были известны, отсутствовала информация о

располагаемой реактивной мощности, исходя из чего, было решено на данном этапе исследования не учитывать распределение

потоков реактивной мощности в сети. Наличие распределенной генерации в системе электроснабжения обуславливает сокращение расстояния (электрического сопротивления) до самого удаленного потребителя и, как следствие, потери напряжения, поэтому изменение потерь активной мощности от потерь напряжения также не рассматривалось.

II. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Работа электрооборудования и питающих проводников сопровождается их нагревом и характерным для металлов увеличением активного сопротивления проводников. Для описания влияния температуры проводников на потери активной мощности была разработана модель нагрева проводников на базе номинальных и допустимых параметров сети с учетом моделей, представленных в [10-12].

С целью определения установившегося превышения температуры проводника над температурой окружающей среды было предложено использовать данные о допустимых значениях токов и температур нагрева изоляции согласно ПУЭ [13].

Определение параметров модели влияния температуры на потери активной мощности определяются по следующему алгоритму:

1) согласно материалу проводника выбирается температурный коэффициент сопротивления α ($1/^\circ\text{C}$);

2) для соответствующего сечения, материала жилы и изоляции и условий прокладки определяется допустимый ток I_d (А);

3) допустимое превышение температуры жилы над температурой окружающей среды, соответствующее допустимому длительному току, определяется как:

$$T_d = T_d - T_{nOC}, \quad (1)$$

где T_d — допустимая температура, $^\circ\text{C}$; T_{nOC} — нормируемая температура окружающей среды ($+25^\circ\text{C}$ для воздуха и $+15^\circ\text{C}$ для земли, согласно [12]);

4) согласно решению уравнения теплового баланса определяется температура жилы проводника при токовой нагрузке I :

$$T = \tau_d \cdot \left(\frac{I}{I_d} \right)^2 + T_{OC}, \quad (2)$$

где T_{OC} — температура окружающей среды, в которой проложен проводник, $^\circ\text{C}$;

5) с учетом формулы (2) определяется сопротивление при текущей токовой нагрузке:

$$R = R_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T) = R_{20} \cdot \left[1 + \alpha \cdot \left(\tau_d \cdot \left(\frac{I}{I_d} \right)^2 + T_{OC} - 20 \right) \right], \quad (3)$$

где R_{20} — активное сопротивление проводника, определенное по удельным значениям проводимости материала жилы при 20°C .

После определения параметров нагрузки модель влияния температуры проводника на потери активной мощности описывается следующей зависимостью, выраженной относительно мощности (P), протекающей по проводнику, и напряжения (U):

$$\begin{aligned} \Delta P &= f(P, T) = \\ &= P^2 \cdot R_{20} / U^2 + \\ &+ P^2 \cdot R_{20} \cdot \alpha \cdot (T_{OC} - 20) / U^2 + \\ &+ P^4 \cdot R_{20} \cdot \alpha \cdot \tau_d / U^4 \cdot I_d^2 \end{aligned} \quad (4)$$

В данной зависимости можно выделить 3 части:

1) $P^2 \cdot R_{20} / U^2$ — постоянная часть при постоянной нагрузке, определяемая сопротивлением проводника при 20°C ;

2) $P^2 \cdot R_{20} \cdot \alpha \cdot (T_{OC} - 20) / U^2$ — часть, обусловленная отличием температуры окружающей среды от 20°C ;

3) $P^4 \cdot R_{20} \cdot \alpha \cdot \tau_d / U^4 \cdot I_d^2$ — часть, обусловленная влиянием нагрева проводников под нагрузкой.

На базе модели потерь активной мощности была разработана модель оптимизации распределения потоков активной мощности, на основании которой была сформулировано интерпретированное описание нелинейной ТЗ. Проводя аналогию оптимизационной задачи в электроэнергетике и классической ТЗ, можно выявить следующее подобие терминов:

- ресурс — электроэнергия;
- потребности — активная мощность потребителей C_1, C_2, \dots, C_6 ;

- запасы — мощность генерации источников G_1, G_2, G_3, G_4 ;
- расходы на поставку — потери в распределительной сети;
- тарифы (коэффициенты связи) — сопротивление проводников.

Однако явным отличием от классической ТЗ является то, что потери при доставке электроэнергии от генератора к потребителю зависят от матрицы коэффициентов, которая в процессе решения непостоянна (решение ТЗ со случайной (переменной) стоимостью приведено в [14]), так как для каждого режима изменяется сопротивление линий, которое зависит от температуры, а следовательно, от нагрузки проводника. Модель ТЗ является сбалансированной, так как суммарная потребностей в электроэнергии равна суммарной генерации.

Описание ТЗ следующее:

$$\begin{aligned} \Delta P_{\Sigma} &= \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^G \Delta P_{ij} = \\ P_{11}^2 \cdot R_{11} / U^2 + \dots + P_{ij}^2 \cdot R_{ij} / U^2 &\Rightarrow \min \\ \sum_{i=1}^G P_{ij} &= P_{nj} \\ \sum_{j=1}^N P_{ij} &= P_{gi} \\ \sum_{i=1}^G P_{gi} &= \sum_{j=1}^N P_{nj} \\ I_k &\leq I_{dk} \\ i &= \overline{1, G} \quad i = \overline{1, N} \quad k = \overline{1, K}, \end{aligned} \quad (5)$$

где ΔP_{ij} — потери при передаче мощности от i -го генератора к j -му потребителю; P_{ij} — переток мощности от i -го генератора к j -му потребителю; R_{ij} — суммарное активное сопротивление между i -ым генератором и j -ым потребителем; P_{nj} — мощность j -го потребителя; P_{gi} — мощность i -го генератора; G — количество генераторов; N — количество потребителей; K — количество участков распределительной сети.

Начальное решение ТЗ было задано как текущее распределение мощностей при питании всех нагрузок от внешней энергосистемы (источник G_4) (табл. 2).

Описанная ТЗ с переменными коэффициентами связи из задач линейного программирования переходит в разряд нелинейных ТЗ. Решение проводилось посредством метода линейной аппроксимации — методом Ньютона, — с допустимой относительной погрешностью не более 0,1 %.

С целью изучения влияния нагрева проводников на активные потери и значения оптимальных перетоков мощности ТЗ была решена для 3-х состояний модели потерь: без учета влияния температуры на потери активной мощности, с учетом влияния для летнего режима работы энергосистемы при температуре окружающего воздуха $+30^\circ\text{C}$ и для зимнего — -35°C .

Таблица 2 – Начальное решение задачи (кВт)

Генераторы	Потребители						Генерация
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	
G1	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
G2	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
G3	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
G4	63,84	76,63	71,4	47,3	46,8	37,44	343,41
Потребление	63,84	76,63	71,4	47,3	46,8	37,44	

III. РЕЗУЛЬТАТЫ

А. Оптимизация сети без учета влияния температуры на потери активной мощности

Определено оптимальное распределение активной мощности без учета влияния температуры на потери активной мощности в системе электроснабжения с учетом планируемых мест присоединения установок распределенной генерации. Результаты определения оптимальных потоков мощности представлены в табл. 3.

Согласно модели влияния температуры проводника на потери активной мощности были определены суммарные потери активной мощности (значение целевой функции транспортной задачи), которые составили 6,98 кВт. Данное значение потерь характеризует оптимальное распределение мощности при температуре проводников равной 20°C (при сопротивлении проводников равном R_{20}). Поэтому целесообразным является проведение оптимизации потоков активной мощности с учетом наибольшей и наименьшей

температуры окружающего воздуха при работе энергосистемы (летний и зимний режимы).

Таблица 3 – Оптимальное распределение потоков мощности без учета влияния температуры проводников (кВт)

Генераторы	Потребители						Генерация
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	
G1	16,648	49,556	27,746	5,105	9,153	9,452	117,66
G2	4,327	4,511	10,687	34,309	3,583	5,354	62,771
G3	9,318	9,439	15,018	3,756	26,412	14,024	77,967
G4	33,547	13,124	17,949	4,13	7,652	8,61	85,012
Потребление	63,84	76,63	71,4	47,3	46,8	37,44	

В. Оптимизация сети с учетом влияния температуры в летнем режиме работы

Модель влияния температуры проводника на потери активной мощности для летнего режима работы была построена для температуры окружающей среды принятой согласно СНиП 23-01-2003 равной среднемесячной максимальной температуре в течение теплого времени года для г. Перми $T_{OC} = +30^{\circ}C$. При этом расчетное значение потерь активной мощности в данной модели при использовании оптимальных значений

потоков активной мощности, определенных по табл. 3, равно 8,508 кВт.

Результаты решения транспортной задачи с учетом влияния температуры проводников на потери активной мощности в летнем режиме работы представлены в табл. 4.

Значение целевой функции составляет 8,472 кВт. Таким образом, разница потерь с учетом и без учета влияния температуры при оптимизации потерь активной мощности составляет 0,42 %.

Таблица 4 – Оптимальное распределение мощности для летнего режима работы (кВт)

Генераторы	Потребители						Генерация
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	
G1	15,413	45,813	26,303	5,571	9,411	9,425	111,931
G2	3,749	4,65	10,874	32,849	3,68	5,343	61,145
G3	8,397	9,920	15,116	4,150	25,244	13,75	76,577
G4	36,281	16,247	19,107	4,730	8,465	8,922	93,752
Потребление	63,84	76,63	71,4	47,3	46,8	37,44	

С. Оптимизация сети с учетом влияния температуры в зимнем режиме работы

Оптимизация в зимнем режиме работы проводилась на модели влияния температуры на потери активной мощности при температуре окружающей среды принятой согласно СНиП 23-01-2003 равной температуре наиболее холодной пятидневки с обеспеченностью 0,92 в холодный период года для г. Перми $T_{OC} = -35^{\circ}C$.

При использовании оптимальных значений потоков активной мощности, определенных по табл. 3, в данной модели значение потерь активной мощности составляет 6,486 кВт.

Результаты решения транспортной задачи в зимнем режиме работы представлены в табл. 5. Значение целевой функции составляет 6,457 кВт. Таким образом, разница потерь с учетом и без учета влияния температуры при

оптимизации потерь активной мощности составляет 0,45 %.

Анализ значений генерации в табл. 3-5 показал, что требуемая активная мощность генераторов варьируется в пределах: для G_1 от 111,905 до 117,66 кВт (разница 4,89 %), для G_2 от 61,117 до 62,771 кВт (2,63 %), для G_3 от 76,577 до 77,967 кВт (1,78 %), для G_4 85,012 до 93,752 кВт (9,32 %). Это свидетельствует о том, что выбор мощности установок распределенной генерации только по данным табл. 3 (без учета влияния температуры) не обеспечит минимизации потерь при изменении температуры окружающего воздуха.

Следует отметить, что решение транспортной задачи не показывает то, что, например (см.табл. 3), генератор G_1 питает нагрузку C_1 с величиной мощности 16,648

кВт, но позволяет определить суммарную выработку каждого из генераторов,

при которой в сети будут наименьшие потери мощности.

Таблица 5 – Оптимальное распределение мощности для зимнего режима работы (кВт)

Генераторы	Потребители						Генерация
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	
G1	15,524	45,712	26,167	5,727	9,358	9,417	111,905
G2	3,879	4,582	11,097	32,372	3,754	5,433	61,117
G3	8,631	10,149	15,02	4,31	25,238	13,711	77,059
G4	35,806	16,187	19,116	4,891	8,45	8,879	93,329
Потребление	63,84	76,63	71,4	47,3	46,8	37,44	

Для определения потоков мощности, протекающей через конкретный участок, необходимо использовать метод наложения.

Выводы

1) Анализ оптимальных значений генерируемой активной мощности в установках распределенной генерации показал, что даже при постоянной мощности нагрузок наблюдаются колебания мощности генерации в пределах 1,78-9,32 %, что будет иметь значение при выборе мощности установок распределенной генерации и определении диапазона их регулирования.

2) Значение целевой функции (потерь активной мощности) с учетом влияния температуры на 0,42 % меньше, чем ее значение без учета влияния температуры на оптимизационной модели летнего режима работы, на модели зимнего режима работы — на 0,45 % ниже. Данные величины характеризуют эффективность предлагаемого подхода для рассматриваемой конфигурации сети электроснабжения, доказывая эффективность использования разработанной оптимизационной модели, учитывающей изменение сопротивления проводников при нагреве нагрузочным током, но не являются универсальными.

3) Решение оптимизационной задачи для режимов «летнего» и «зимнего» максимума позволит определить колебания требуемой генерируемой мощности в узлах подключения устройств распределенной генерации, а следовательно, определить их номинальную мощность.

Работа выполнена в рамках гранта Президента Российской Федерации по государственной поддержке молодых российских ученых - кандидатов наук, МК–

5279.2014.8 «Синтез эффективных технологий удаленного мониторинга и управления состоянием интеллектуальной электро-энергетической системы с активно-адаптивной сетью».

Литература (References)

- [1] Nigmatulin B.E. *Sostoyanie i razvitie elektroenergetiki v Rossii do 2020 goda* [Condition and development of the electrical power industry in Russia until 2020]. Available at: http://electro.problema.ru/conference_2012-12_moscow.php (accessed 12.06.2013).
- [2] Leyzgold D.Yu., Romodin A.V., Trushnikov K.P. Power quality indicators as effectiveness indicators of power management. *Fundamentalnie issledovaniia – Fundamental research*, 2014, no. 11-7, pp. 1501-1506 (in Russian) Available at: www.rae.ru/fs/?section=content&op=show_article&article_id=10005063 (accessed 01.02.2015)
- [3] Romodin A.V., Leyzgold D.Yu. Model of situational management system of flexible transmission lines in power system normal state. *Sovremenniye problemy nauki i obrazovaniya – Modern problems of science and education*, 2013, no. 6, (in Russian) Available at: <http://www.science-education.ru/113-11670> (accessed 01.02.2015).
- [4] Petrochenkov A.B. Energoinformatsionnaya model' elektrotehnicheskikh kompleksov promyshlennykh predpriyatii. *Elektrotehnika – Electrical engineering*. 2014, no. 11, pp. 47-51 (in Russian).
- [5] Petrochenkov A.B. Romodin A.V. Develop an approach to construction of the complex «Energy Optimizers» *Elektro, elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotehnicheskaya promyshlennost' – Electro, Electrical engineering, Electric power industry*, 2013, no. 4, pp. 20-25 (in Russian).
- [6] Svezhentceva O.V. *Metody optimizatsii v elektroenergetike* [Optimization methods in the

- electricity] Irkutsk, Irkutsk State Technical University publ. 2014, 70 p.
- [7] Grechishnikov V.A., Fedotov E.V. Energy policy and energy problems of transport infrastructure. *Moskovskiy gosudarstvennyiy universitet putey soobscheniya – Moscow State University of Railway Engineering*. 2005, vol. 12, no. 4, pp. 100-105 (in Russian).
- [8] Emel'yanova T.S. Analysis of solution methods for nonlinear transportation problem. *Perspektivnye informatsionnye tehnologii i intellektual'nye sistemy – Advanced information technologies and intelligent Systems*, 2007, no. 1, pp. 38-49 (in Russian).
- [9] Vasil'eva E.M., Levit B.Yu., Livshits V.N. *Nelineinye ztransportnye zadachi na setyah* [Nonlinear transportation problems in the networks] Moscow, Finance and Statistics Publ. 1981, 104 p.
- [10] Grishin S.S. *Raschet i optimizatsiya poter' moshhnosti i energii v elektricheskikh raspredelitel'nykh radial'nykh setyah promyshlennogo tipa s uchetom nagreva provodnikov*. Diss. kand. tehn. nauk [Calculation and optimization of power and energy losses in the radial type electrical distribution networks of industrial with regard to heat conductors. Cand. tech. sci. diss.]. Omsk, 2002. 161 p.
- [11] Gudzovskaya V.A., Ermakov V.F., Balykin E.S., Zaytseva I.V. Mathematical model of the change process of the conductor heating temperature. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedeniy. Elektromehnika – News of Higher Schools. Electromechanics*, 2012, no. 2, pp. 42-43 (in Russian).
- [12] Dmitrichenko A.S., Yanovsky S. Yu., Ivanov Yu.S., Chaichyts N.I. Simulation of a stationary heating of insulated conductor taking into account the capacity of heat source and heat exchange with environment. *Pozharnaya bezopasnost' – Fire safety*, 2012, no. 1, pp. 67-73 (in Russian).
- [13] *Pravila ustroystva elektroustanovok. 7-e izdanie* [Rules for the Design and Operation of Electrical Installations. 7th edition]. Novosibirsk, Siberian University Publ., 2010. 464 p.
- [14] Dunaevskaya O.I., Raskin L.G. Task of the transport logistics with the arbitrary transportation cost. *Vestnik Har'kovskogo natsional'nogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta – Bulletin of Kharkiv National Automobile and Highway University*, 2007, no. 37, pp. 87-89 (in Russian).

Сведения об авторах:



Лейзгольд Дмитрий Юрьевич – аспирант кафедры микропроцессорных средств автоматизации, Пермский Национальный Исследовательский Политехнический Университет.
E-mail: dmleyz@mail.ru



Чудинов Александр Валерьевич – студент кафедры микропроцессорных средств автоматизации, Пермский Национальный Исследовательский Политехнический Университет.
E-mail: aleksander.tchudinov@yandex.ru