

Электротехника

УДК 628.931

ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ ОСВЕЩЕНИЯ В РОССИИ

Г.Я. Вагин, Е.Б. Солнцев, О.Ю. Малафеев

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Россия, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24

В настоящее время в России отсутствует постоянный мониторинг установленного парка источников света, его характеристик и энергопотребления на освещение. Это затрудняет составление планов производства и внедрения энергосберегающих источников света и анализ их выполнения. В работе выполнена оценка количества установленного парка источников света и объемов электропотребления на освещение как в целом по РФ, так и по секторам потребления. Для верификации результатов предложен метод расчета общего количества светоточек на основании емкости рынка ламп. Сравнение результатов показывает хорошую сходимость обоих методов. Использование полученных результатов позволяет организовать постоянный мониторинг внедрения энергосберегающих источников света и электропотребления на освещение в различных секторах экономики России и более обоснованно разрабатывать планы по производству и внедрению этих источников света.

Ключевые слова: *источники света, характеристики систем освещения, электропотребление на освещение по секторам потребления.*

Введение

В последние годы в России активизировалась работа по внедрению энергосберегающих источников света и светильников. В нормативных документах, таких как 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности...» и «Государственная программа энергосбережения и повышения энергетической эффективности на период до 2020 года», а также в работах [1, 2] намечены соответствующие мероприятия. Однако проведенное авторами исследование показывает, что намеченные сроки внедрения срываются. Это объясняется несколькими факторами: 1) большой долей импорта таких источников света и введенными экономическими санкциями; 2) падением курса рубля; 3) отсутствием технических регламентов на разработку и внедрение энергосберегающих источников света; 4) отсутствием информации о количестве и видах установлен-

Геннадий Яковлевич Вагин (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника».

Евгений Борисович Солнцев (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника».

Олег Юрьевич Малафеев, ассистент кафедры «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника».

ных источников света как в целом по России, так и по отдельным секторам экономики, и другими [1–4].

Целью и задачей данного исследования является разработка методики оценки количества установленных источников света в целом по стране и по отдельным секторам экономики.

В качестве исходных данных послужили результаты энергетических обследований систем освещения России, проведенных в 2013 году, а также данные отчетов по проекту ПРООН-ГЭФ/Минэнерго РФ «Преобразование рынка для продвижения энергоэффективного освещения в России». Исследования проводились в шести основных секторах экономики: промышленном, общественном, жилищном, сельскохозяйственном, транспортном и строительном. Охвачено также наружное освещение. Обработка результатов энергетических обследований проводилась по рекомендациям [5].

Промышленный сектор. Оценка объемов потребления и установленного парка источников света в промышленности может проводиться двумя методами:

- 1) на основе данных о доле освещения в суммарном объеме потребляемой электроэнергии;
- 2) на основе данных по площадям промышленных предприятий и удельным расходам электроэнергии на единицу площади.

Исследование, проведенное авторами, показало, что второй метод дает большую погрешность. Для его применения необходимо большое количество исходных данных, которые можно получить только при энергетических обследованиях предприятий. Поэтому расчет выполнен по первому методу.

В табл. 1 приведены данные по потреблению электроэнергии в 2013 г. и доле потребления на освещение в отраслях промышленности по данным Росстата РФ [6].

Таблица 1

Годовое потребление электроэнергии в промышленности

Отрасли промышленности	Суммарное потребление, млрд кВт·ч [6]	Потребление на освещение	
		% [6]	млрд кВт·ч
Добыча полезных ископаемых	126,0	4,5	5,67
Обрабатывающая промышленность	328,137	7,4	24,282
Производство и распределение электроэнергии, газа и воды	110,85	2,5	2,771
Итого	564,987		32,723

Таблица 2

Потребление электроэнергии на внутреннее и наружное освещение

Отрасли промышленности	Доля распределения потребления, %		Годовое потребление электроэнергии, млрд кВт·ч	
	Внутреннее	Наружное	Внутреннее	Наружное
Добыча полезных ископаемых	10	90	0,567	5,103
Обрабатывающая промышленность	95	5	23,068	1,214
Производство и распределение электроэнергии, газа и воды	95	5	2,633	0,139
Итого			26,268	6,456

В табл. 2 приведено потребление электроэнергии на внутреннее и наружное освещение в промышленности в 2013 г. (доли распределения потребления получены на основании экспертных оценок).

Количество светоточек наружного освещения определяется по выражению

$$N_{\text{н.осв}} = \frac{W_{\text{г.н.осв}}}{T_{\text{г.н.осв}} \cdot P_{\text{ср.н.осв}}}, \quad (1)$$

где $W_{\text{г.н.осв}}$ – годовое потребление электроэнергии;

$T_{\text{г.н.осв}}$ – среднее годовое время работы системы наружного освещения;

$P_{\text{ср.н.осв}}$ – средняя мощность светильников наружного освещения.

На основании [7] принято $T_{\text{г.н.осв}} = 3600$ ч, $P_{\text{ср.н.осв}} = 0,4$ кВт.

В табл. 3 приведены результаты расчетов среднего количества светоточек наружного освещения всех отраслей промышленности в 2013 г.

Таблица 3

Количество светоточек наружного освещения в промышленности

Отрасли промышленности	Количество светоточек, млн шт.
Добыча полезных ископаемых	3,543
Обрабатывающая промышленность	0,845
Производство и распределение электроэнергии, газа и воды	0,096
Итого	4,483

Внутреннее освещение разбивается на освещение производственных помещений и административно-бытовых. Расчет количества светоточек производится по выражению, аналогичному (1). Для производственных помещений принято [7]: $T_{\text{г.п.осв}} = 2600$ ч, $P_{\text{ср.п.осв}} = 0,4$ кВт. Для административно-бытовых принято люминесцентное освещение [7]: $T_{\text{г.а.осв}} = 2600$ ч, $P_{\text{ср.а.осв}} = 0,08$ кВт.

В табл. 4 приведены результаты расчета количества светоточек производственных и административно-бытовых помещений. В табл. 5 приведены сводные данные по количеству светоточек в промышленности.

Таблица 4

Количество светоточек внутреннего освещения в промышленности

Отрасли промышленности	Доля распределения, %		Количество светоточек, млн шт.	
	Производственные помещения	Административно-бытовые	Производственные помещения	Административно-бытовые
Добыча полезных ископаемых	50	50	0,273	1,363
Обрабатывающая промышленность	70	30	15,527	33,271
Производство и распределение электроэнергии, газа и воды	95	5	2,405	0,633
Итого			18,204	35,267

Сводные данные по количеству светоточек в промышленности

Отрасли промышленности	Кол-во светоточек, млн шт.		Всего, млн шт.
	Наружное освещение	Внутреннее освещение	
Добыча полезных ископаемых	3,543	1,636	5,179
Обрабатывающая промышленность	0,845	48,798	49,643
Производство и распределение электроэнергии, газа и воды	0,096	3,038	3,134
Итого	4,483	53,471	57,956

Строительство. По данным Росстата РФ, в 2013 г. потребление электроэнергии на данный сектор составило 12,293 млрд кВт·ч. По данным энергетических обследований и экспертных оценок доля на освещение составляет 2 %, или 245,86 млн кВт·ч; годовое число часов работы системы освещения принимается 5 000 часов, средняя мощность светильников 0,1 кВт. По выражению, аналогичному (1), определяем число светоточек, оно составляет 0,492 млн шт. Мощность системы освещения по данному сектору составляет 49,2 тыс. кВт.

Таблица 6

Результаты расчета характеристик систем освещения на транспорте

Вид транспорта	Потребление электроэнергии, млрд кВт·ч [6]	Доля на освещение, % [6]	Потребление электроэнергии на освещение, млрд кВт·ч	Количество светоточек, млн шт.
Транспорт – всего,	90,378			
в том числе:				
– железнодорожный с электротягой	44,753			
– железнодорожный без электротяги	6,034	7	0,422	1,056
– прочий сухопутный	7,516	7	0,526	1,315
– трамвайный и троллейбусный	2,646	5	0,132	0,331
– метрополитен	2,858	7	0,2	0,333
– перекачка нефти и нефтепродуктов	15,667	2	0,313	0,522
– перекачка газа и продуктов его переработки	10,904	2	0,218	0,363
Итого	90,378		1,811	3,920

Транспорт. По данным Росстата РФ, в 2013 г. потребление электроэнергии по данному сектору составило 90,378 млрд. кВт ч. Средняя мощность светильников принята 0,1 кВт; годовое число часов работы освещения принимается:

- железнодорожный без электротяги, прочий сухопутный, трамвайный и троллейбусный виды транспорта – 4000 ч;
- метрополитен, перекачка нефти и нефтепродуктов, перекачка газа и продуктов его переработки – 6000 ч.

В табл. 6 приведены результаты расчета потребления электроэнергии и количества светоточек на транспорте в 2013 г.

Общественный сектор. Он делится на государственный (муниципальный) и частный. Общая площадь государственного и муниципального нежилого фонда составляет¹ 476 889 тыс. кв. м. Общая площадь частного нежилого фонда составляет 250 290 тыс. кв.м.

Основным источником внутреннего освещения зданий этого сектора являются люминесцентные лампы. Согласно МГСН 2.01-99 среднюю удельную мощность общего равномерного освещения при люминесцентном освещении можно принять равной 2,5 Вт/м² при освещенности 100 лк и КПД светильника 100 %. Годовое число часов работы освещения принято 3 600 часов [7]. Средняя мощность источников света принята равной 0,022 кВт.

Годовое потребление электроэнергии системой внутреннего освещения определяется по выражению

$$W_{\text{Г.общ.с}} = W_{\text{Г.гос.с}} + W_{\text{Г.част.с}} \quad (2)$$

где $W_{\text{Г.гос.с}}, W_{\text{Г.част.с}}$ – годовые потребления электроэнергии государственного и частного секторов, которые определяются по выражению, ТВт·ч [3]:

$$W_{\text{Г.и}} = P_{\text{уд}} \cdot F_i \cdot \frac{E_{\text{норм}i}}{100} \cdot T_{\text{Г}i} \cdot \frac{100}{\eta_{\text{св}}} \cdot K_c \cdot 10^{-9}, \quad (3)$$

- где $P_{\text{уд}}$ – удельная мощность общего равномерного освещения, Вт/м²;
 F_i – площадь основных или вспомогательных помещений, м²;
 $E_{\text{норм}i}$ – нормируемая освещенность, лк (согласно СП 52.13330.2011 принято 300 лк);
 $T_{\text{Г}i}$ – среднее годовое число часов работы освещения, ч;
 $\eta_{\text{св}}$ – КПД светильников (принят 60 %);
 K_c – коэффициент спроса (принят 0,9).

В табл. 7 приведены результаты расчета потребления электроэнергии и количества светоточек в общественном секторе.

Таблица 7

Результаты расчета характеристик систем освещения в общественном секторе

Вид общественного сектора	Годовое потребление электроэнергии, млрд кВт·ч	Установленная мощность систем освещения, млн кВт	Количество светоточек, млн шт.
Государственный и муниципальный	20,846	5,791	263,209
Частный	10,941	3,039	138,142
Итого	31,787	8,830	401,351

¹ Данные предоставлены Эколого-энергетическим рейтинговым агентством Интерфакс-ЭРА и тематическим сообществом «Энергоэффективность и энергосбережение».

Городское и сельское население. По данным Росстата РФ, в 2013 г. потребление электроэнергии по данному сектору составило 140,971 млрд кВт·ч. Доля на освещение составляет 20 %, что равно 28,194 млрд кВт·ч. Годовое число часов работы системы освещения принимаем 1200 ч [7], среднюю мощность источников света принимаем 0,04 кВт. По выражению, аналогичному (1), определяем число светоточек, оно составляет 587,379 млн шт. Установленная мощность системы освещения составляет 23,495 млн кВт.

Сельское хозяйство. По данным Росстата РФ, в 2013 г. потребление электроэнергии на данный сектор экономики составило 15,286 млрд кВт·ч. По данным энергетических обследований, доля на освещение составляет 15 %, или 2,293 млрд кВт·ч; годовое число часов работы системы освещения принимается 4000 ч, средняя мощность светильников 0,1 кВт. По выражению, аналогичному (1), определяем число светоточек, оно составляет 5,732 млн шт. Мощность системы освещения по данному сектору составит 573,2 тыс. кВт.

Наружное освещение. Протяженность освещенных улиц, проездов и набережных в России составляет² 335 598 км. Расстояние между опорами уличного освещения – 35–45 м. Средняя мощность светильников – 0,2 кВт. Время работы освещения – 3600 ч в год.

Таблица 8

Оценка электропотребления на освещение по секторам экономики в 2013 г.

Статьи расходного баланса	Годовое потребление на освещение, млрд кВт·ч	Установленная мощность освещения, млн кВт	Количество светоточек, млн шт.
Промышленный сектор	32,723	11,896	57,956
Сельское хозяйство	2,293	0,573	5,732
Строительство	0,246	0,049	0,492
Транспорт	1,811	0,392	3,92
Общественный сектор	31,787	8,830	401,351
Городское и сельское население	28,194	23,495	587,379
Наружное освещение	6,131	1,703	8,390
Итого	103,186	46,9	1065,22

² Источники данных:

– данные отчета «Исследование и сбор информации для формирования базы данных проектов для тиражирования пилотного проекта по уличному освещению» ПРООН/ГЭФ (www.undp-light.ru/results/16/file/0/235/PROPERTY_25/74/?download=y);

– данные, найденные в сети (преимущественно сайты муниципалитетов городов и сайты Горсвета различных городов);

– результаты анкетирования и данные опросных листов;

– единая межведомственная информационно-статистическая система (<http://www.fedstat.ru/>).

Определяем количество светоточек:

$$N_{\text{св.н}} = 3355980,04 = 8,39 \text{ млн шт.}$$

Суммарная установленная мощность:

$$P_{\Sigma\text{осв.}} = 0,2 \cdot 8,39 = 1,703 \text{ млн кВт.}$$

Годовой объем потребления электроэнергии:

$$W_{\text{г.осн.н}} = 1,703 \cdot 3600 = 6,131 \text{ млрд. кВт}\cdot\text{ч.}$$

Оценка суммарного электропотребления и установленного парка светотехнического оборудования в России в 2013 г. приведена в табл. 8. Доля потребления на освещение составила 11,1 % от общего электропотребления. Современные световые технологии позволяют сэкономить около 40 % потребляемой электроэнергии [8], что соответствует 41,3 млрд кВт·ч в год.

Верификация результатов. Для оценки корректности полученных результатов (табл. 8) проведено сравнение общего количества светоточек на основании емкости рынка ламп (производство и импорт) в 2013 г. Для этого, зная средний срок службы каждого типа ламп и среднее время их использования в течение года (табл. 9), вычислим интенсивность замены каждого типа ламп:

$$K_{\text{и}} = \frac{T_{\text{сл.л.}}}{T_{\text{и.г}}}, \quad (4)$$

где $T_{\text{сл.л}}$ – срок службы ламп, ч; $T_{\text{и.г}}$ – среднее время использования ламп в течение года, ч.

Таблица 9

Средний срок службы и среднее время использования ламп в течение года

Тип ламп	Средний срок службы, ч [8]	Среднее время использования, ч [7]
Лампы накаливания (ЛН)	1000	1400
Галогенные (ГЛН)	2000	2000
Люминесцентные (ЛЛ)	10000	4000
Компактные люминесцентные (КЛЛ)	6000	3000
Светодиодные (СИД)	20000	4000
Натриевые (ДНаТ)	12000	3000
Металлогалогенные (МГЛ)	10000	4000
Ртутные (ДРЛ)	10000	4000

Количество установленных ламп (табл. 10) каждого типа определяется по выражению

$$N_{\text{л.и}} = N_{\text{л.р}} \cdot K_{\text{и.и}}. \quad (5)$$

Количество установленных ламп*

Тип ламп	Емкость рынка ламп (производство и импорт), $N_{л.р}$, млн шт. [3]	K_n (4)	Количество установленных ламп, $N_{ли}$, млн шт.
ЛН	436,4	0,714	311,714
ГЛН	53	1,0	53
ЛЛ	121,7	2,5	302,5
КЛЛ	124,5	2,0	249
СИД	53,9	–	71,04*
ДНаТ	2,4	4,0	9,2
МГЛ	1,5	2,5	3,75
ДРЛ	8,7	2,5	21,5
ИТОГО	802,1		1021,704

* В связи со стремительным ростом рынка светодиодного оборудования и достаточно большим сроком его службы количество СИД определялось по динамике изменения рынка СИД в 2011-2014 гг. [3].

Сравнение итоговых результатов расчета (табл. 8 и 10) показывает хорошую сходимость обоих методов расчета количества установленных ламп. Расхождение результатов не превышает 5 %.

Заключение

Проведены оценки установленного парка источников света и объемов электропотребления как в целом по РФ, так и по всем секторам экономики. Это позволяет организовать постоянный мониторинг энергоэффективности электропотребления на освещение в различных секторах экономики России, более обоснованно разрабатывать планы по разработке и внедрению энергоэффективных источников света.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Циссис Ж., Айзенберг Ю.Б., Шевченко А.С. Формирование светотехнического рынка России для повышения энергоэффективности освещения // Светотехника. – 2009. – № 6. – С. 42–48.
2. Шевченко А.С. Программа продвижения энергоэффективного освещения в России // Светотехника. – 2014. – № 1–2. – С. 112–117.
3. Анализ состояния и перспектив рынка светотехнической продукции в странах Евразийского экономического союза / Программа развития Организации Объединенных Наций (ПРООН), 2015. – 78 с.
4. Вагин Г.Я., Терентьев П.В., Малафеев О.Ю. О необходимости корректировки нормативных документов по показателям энергетической эффективности источников света // Промышленная энергетика. – 2015. – № 12. – С. 30–33.
5. Жежеленко И.В., Кротков Е.А., Степанов В.П. Методы вероятностного моделирования в расчетах характеристик электрических нагрузок потребителей: 2-е изд., перераб. и доп. – Самара: СамГТУ, 2001. – 195 с.
6. Российский статистический ежегодник. 2013: Стат. сб. / Росстат. – М., 2013. – 717 с.
7. Экономия энергоресурсов в промышленности, бюджетных организациях, жилищно-коммунальном хозяйстве: справ.-метод. пособие / Авт.-сост. Г.Я. Вагин, С.Ф. Сергеев. – НГТУ, ДПИ. – Н. Новгород, 2007. – 280 с.

8. Энергоэффективное электрическое освещение: Учеб. пособие / С.М. Гвоздев, Д.И. Панфилов, В.Д. Поляков и др.; под ред. Л.П. Варфоломеева. – М.: Издательский дом МЭИ, 2013. – 288 с.

Статья поступила в редакцию 11 июля 2016 г.

ESTIMATION OF CHARACTERIZATION OF LIGHTING SYSTEMS IN RUSSIA

G.Ya. Vagin, E.B. Solntsev, O.Yu. Malafeev

Nizhny Novgorod State Technical University
24, Minina str., Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation

At present in Russia there is no continuous monitoring of the set number of light sources, characteristics and energy consumption for lighting . This complicates the planning of production and introduction of energy-saving light sources. Estimation of the total number of installed lamps and the electrical energy consumption for lighting both in Russia as a whole and by sectors: residential buildings, commercial buildings, industrial buildings, agricultural sector, transport sector and outdoor lighting. To verify the results a method of calculating the total number of installed lamps based on the capacity of lamps market was proposed. Comparison of the results shows a good convergence of both methods. The obtained results allow to organize continuous monitoring of energy efficiency of power consumption on lighting in Russia and more reasonably develop plans for implementation of energy-efficient light sources.

Keywords: *light sources, characteristics of lighting systems, electrical energy consumption for lighting by sectors.*

*Gennady Ya. Vagin (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Evgeny B. Solntsev (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Oleg Yu. Malafeev, Assistant.*

УДК 621.365: 621.785

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НАГРЕВА ФЕРРОМАГНИТНЫХ ЗАГОТОВОК В ИНДУКЦИОННОМ НАГРЕВАТЕЛЕ ДИСКРЕТНО-НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ**С.В. Князев**ООО «Красноярскгазпром нефтегазпроект»
Россия, 443086, г. Самара, ул. Складенко, 26

E-mail: sknyaz86@mail.ru

Рассматривается методика постановки и численного расчета электромагнитных и тепловых полей в установившемся и переходных режимах функционирования индукционных нагревателей непрерывного и дискретно-непрерывного действия с ферромагнитной загрузкой для нагрева до температур пластической деформации. Решение краевых задач для электромагнитного и теплового полей выполнено методом конечных элементов. Специфической особенностью исследуемого процесса является переход нагреваемой заготовки через точку магнитных превращений, причем координата этого перехода в неуставившемся режиме работы изменяется в широком диапазоне. В этом случае существенно изменяется сопротивление системы, что приводит к изменению распределения мощности по длине индуктора. Кроме того, изменяется и полная мощность, подводимая к индуктору, и коэффициент мощности.

Ключевые слова: индукционный нагрев, численная математическая модель, метод конечных элементов, электромагнитные и тепловые поля.

Предметом исследования является нагревательная установка для индукционного дискретно-непрерывного нагрева стальных цилиндрических заготовок перед обработкой на деформирующем оборудовании. Односекционный нагреватель рассчитан на нагрев цилиндрических заготовок диаметром 22–40 мм. Температура нагрева – 1200–1300 °С. Столб из 22 заготовок движется по направляющим из жаропрочной стали. Очередная нагретая заготовка выталкивается в приемный лоток и транспортируется к обжимному устройству штампа или пресса. Загрузка холодных заготовок осуществляется автоматически из приемного бункера. Для перемещения заготовок по направляющим служит механизм возвратно-поступательного действия с электроприводом.

Особенностью расчета параметров индукционных нагревателей дискретно-непрерывного действия является сложный характер взаимосвязанных электромагнитных и тепловых процессов, ярко выраженная неравномерность пространственного распределения внутренних источников тепла при нагреве ферромагнитных заготовок в нагревателе дискретно-непрерывного действия, зависимость мощности внутреннего тепловыделения нагревателя от температуры нагреваемых заготовок.

Сергей Валерьевич Князев (к.т.н.), инженер ООО «Красноярскгазпром нефтегазпроект».

В связи с этим для создания методики расчета индукционной системы, оптимизации переходных режимов в работе рассматривается численная математическая модель, учитывающая специфические особенности распределения внутренних источников тепла по длине нагревателя, а также существенные нелинейности, обусловленные потерей магнитных свойств металла при переходе через точку Кюри. Исходя из физической сущности рассматриваемой задачи при моделировании процесса дискретно-непрерывного нагрева был принят ряд общепринятых допущений, позволивших получить удовлетворительную точность описания температурного поля с помощью численного метода:

- электромагнитные процессы принимаются безынерционными;
- электрофизические и теплофизические характеристики материала заготовки для каждого интервала дискретности остаются неизменными, изменяясь лишь при переходе на следующую позицию.

В общем случае процесс индукционного нагрева описывается нелинейной взаимосвязанной системой уравнений Максвелла и Фурье соответственно для электромагнитного и теплового полей с соответствующими краевыми условиями [1, 2].

Система уравнений дополняется граничными условиями для электромагнитной задачи: используются условия равенства функции нулю на бесконечно удаленной границе S_1 (ГУ1) и условие симметрии на осевой линии S_2 , которое заключается в равенстве нулю производной от функции. Решение краевых задач для электромагнитного и теплового полей выполнено методом конечных элементов (МКЭ), который дает возможность достаточно точно учитывать все нелинейности путем изменения всех нелинейных величин с каждым шагом по времени.

Аналитические методы решения взаимосвязанной системы уравнений Максвелла и Фурье, несмотря на их быстрдействие, компактность и другие преимущества, имеют существенные ограничения по области применения. Такие методы применяются для моделирования одномерных и пространственно-двумерных полей при индукционном нагреве геометрически простых систем или частей сложной системы, как правило, в линейной постановке. В рассматриваемой ситуации технологического нагрева ферромагнитных заготовок под обработку на деформирующем оборудовании необходимо учитывать ряд изменяющихся в функции температуры заготовок факторов и существенных нелинейностей:

- в процессе нагрева теплофизические и электрофизические свойства материала заготовки существенно изменяют свои значения с ростом температуры;
- в связи с изменением свойств материала заготовки изменяются интегральные электрические параметры нагревателя, что приводит в процессе выхода на установившийся режим к изменению координат «холодного» и «горячего» режимов и, как следствие, к перераспределению удельной мощности нагрева по длине нагревателя;
- учет этих факторов приводит к необходимости решать нелинейную задачу с зависящими от температурного распределения источниками тепла.

Достаточно точно эти зависимости могут быть получены только численными методами.

При построении сетки наибольший интерес представляет поведение электромагнитного поля в непосредственной близости к загрузке и катушке индуктора. В этих областях плотность сетки должна быть максимальной. Плотность сетки можно уменьшать по мере удаления к границе области. В настоящей работе для разбиения исследуемого пространства выбран треугольный тип элементов.

Специфической особенностью исследуемого процесса является переход нагреваемой заготовки через точку магнитных превращений, причем осевая координата этого перехода в переходных режимах работы изменяется в широком диапазоне. В этом случае существенно изменяется сопротивление системы, что приводит к изменению распределения мощности по длине индуктора. Кроме того, изменяется и полная мощность, подводимая к индуктору. При построении конечно-элементной тепловой модели такие сложные процессы, как теплообмен на границе двух твердых тел, заменяются комбинацией соседних элементов с различными свойствами.

Решение краевой задачи расчета магнитного поля численным методом основывается на минимизации энергетического функционала.

Мощность внутренних источников тепла, характеризующих нагрев проводящих тел индукционной системы, вычисляется для каждого элемента по закону Джоуля – Ленца.

Для практического использования предлагаемого алгоритма решения электромагнитной задачи в работе применяется программный пакет ELCUT, который при некоторых допущениях позволяет решать нелинейные задачи гармонического анализа. Так, при значительном превышении длины индуктора по отношению к диаметру, что имеет место для исследуемых систем, можно не учитывать влияние краевых эффектов на торцах индуктора.

Конечно-элементная методика электромагнитного расчета, описанная в работе, реализована в виде программного пакета на персональном компьютере.

Как показывают результаты расчета, участок загрузки с ферромагнитными заготовками составляет примерно пятую часть от всей загрузки (на долю ферромагнитного участка приходится пять заготовок, в то время как на долю горячих (немагнитных) заготовок приходится 17 заготовок). Анализ графиков электромагнитных характеристик позволяет сделать вывод о том, что переход от ферромагнитного состояния металла в немагнитное занимает незначительную часть длины загрузки, составляющую меньше длины одной заготовки, поэтому ее влияние на температурное распределение можно не учитывать. Это полностью согласуется с выводами, полученными ранее рядом авторов [3, 4].

Полученные в результате численного расчета электромагнитной задачи внутренние источники тепла используются далее при решении задачи расчета температурного поля заготовок в процессе дискретного перемещения через нагреватель.

В тепловой модели мощность внутренних источников на каждом интервале задается в соответствии с расчетной мощностью, определенной при решении электромагнитной задачи. В исследуемой индукционной нагревательной установке процесс моделирования происходит поэтапно. Вначале производится расчет температурных полей в каждой заготовке нагревателя. При расчете свойства металла цилиндрической загрузки, такие как удельная проводимость, теплоемкость, теплопроводность, задаются в соответствии с изменяющейся на каждом интервале постоянства температурой.

Для решения проблемы применяются конечные элементы более высоких порядков, что позволяет обеспечивать нелинейные законы изменения функции между узлами внутри элемента. Тем не менее иногда для ускорения процесса вычисления приходится увеличивать допустимую погрешность, чтобы получить приемлемое число итераций и общее время счета.

Исследуемая в численных расчетах математическая модель процесса теплопроводности с внутренними источниками тепла в цилиндрических координатах имеет вид [5, 6, 7]

$$\frac{\partial T(r, x, t)}{\partial t} = a(T) \left[\frac{\partial^2 T(r, x, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(r, x, t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T(r, x, t)}{\partial x^2} \right] + \frac{1}{c(T)\gamma} W(r, x, t, \xi(T)) \quad (1)$$

с краевыми условиями

$$T(r, x, 0) = T_0(r, x); \quad \frac{\partial T(R, x, t)}{\partial r} = \alpha(T) [T(R, x, t) - T_{\text{вн}}(R, x)]; \quad \lambda \frac{\partial T(0, x)}{\partial r} = 0, \quad (2)$$

здесь $T(r, x, t)$ – температурное распределение по объему цилиндра; a – коэффициент теплопроводности; r, x – радиальная и аксиальная координаты соответственно; $W(r, x, t, \xi(T))$ – функция распределения внутренних источников тепла; t – время процесса; $T_{\text{вн}}(R, x)$ – температура внешней среды; α – коэффициент теплообмена.

Следуя методу конечных элементов [8], дифференциальному уравнению (1) ставим в соответствие вариационную формулировку о минимизации энергетического функционала, характеризующего тепловое состояние тела.

Исследуемая область аппроксимируется совокупностью элементов с конечным числом узловых точек. Полученный функционал заменяем суммой отдельных вкладов элементов, определяя таким образом функциональные соотношения относительно узловых неизвестных.

Решение тепловой задачи методом конечных элементов реализовано в среде FemLab 3.5.

Приведены результаты расчетов электромагнитных и тепловых полей (рис. 1–3) в стационарном режиме. Анализ полученных численных экспериментов показал, что перепад температуры между поверхностью и центром загрузки при любых реальных значениях мощности индуктора в течение всего времени нахождения заготовки в индукторе не выходит за пределы допустимых значений, поэтому при решении задачи оптимизации переходных режимов в качестве выходного параметра можно рассматривать среднюю по сечению температуру заготовки.

Ввиду того, что нагреваемое тело является ферромагнитным, необходимо учитывать переход его через точку магнитных превращений. Используемый программный пакет не позволяет отразить зависимость магнитной проницаемости среды от температуры, поэтому решение задач производится итерационно, заготовка рассматривается как многослойное тело, по мере прогрева цилиндра пересчитывается распределение внутренних источников тепла и полученные данные переносятся в задачу теплового расчета для заготовки.

Геометрическая модель тепловой задачи полностью повторяет модель электромагнитной задачи, источником тепла является мощность тепловыделения в заготовках.

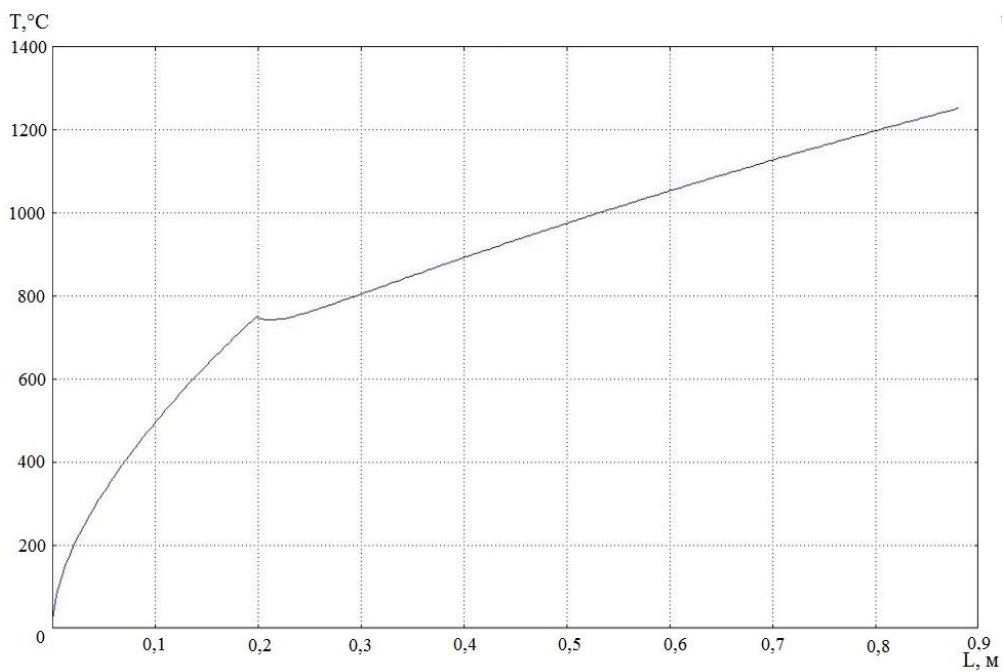


Рис. 1. Распределение температуры по длине на поверхности загрузки в установившемся режиме

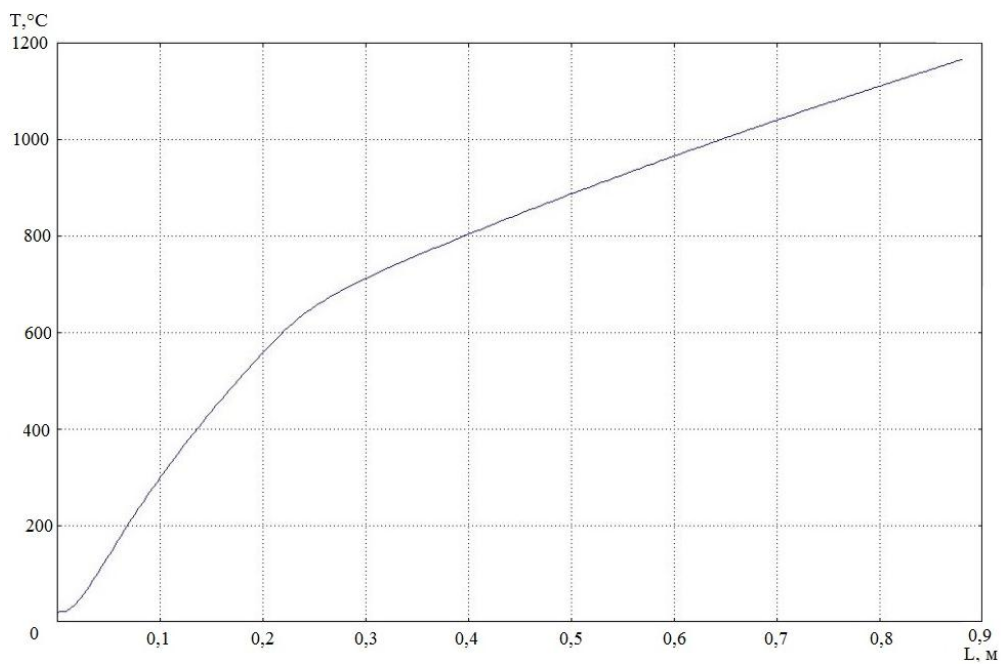


Рис. 2. Распределение температуры по длине на оси загрузки в установившемся режиме

Параметры индуктора

Наименование	Условное обозначение	Величина
Производительность, кг/ч	П	200
Диаметр заготовки, мм	D_2	28
Длина заготовки, мм	l_2	40
Плотность заготовки, кг/м ³	ρ	7800
Масса заготовки, кг	m	0,192
Материал заготовки	СтШХ15	–
Температура поверхности на выходе, °С	T_2	1250
Перепад температуры по радиусу на выходе, °С	ΔT	100
Размер трубки индуктора, мм	–	2×15
Диаметр индуктора, мм	D	48
Длина индуктора, мм	L	880
Число витков индуктора	–	59
Частота, Гц	f	8000
Напряжение питания, В	U	538,34
Полезная мощность, кВт	P_2	72,64
Полная активная мощность, кВт	P_i	90,1
КПД электрический	η	0,8
Коэффициент мощности	cos ϕ	0,118

После проверки результатов на соответствие накладываемых ограничений решение задачи нагрева для системы «индуктор – заготовка» считается законченным. Заключительным этапом расчета является определение интегральных параметров системы – расчет и выбор числа витков и сечения проводов катушки индуктора в соответствии с выбранным напряжением источника питания и расчет системы охлаждения.

На основе численной модели процесса определены интегральные параметры индуктора (данные приведены в таблице), реализующего в стационарном режиме основное технологическое требование, предъявляемое к нагревательной установке, – минимизацию абсолютного отклонения температуры на выходе из нагревателя от заданного значения.

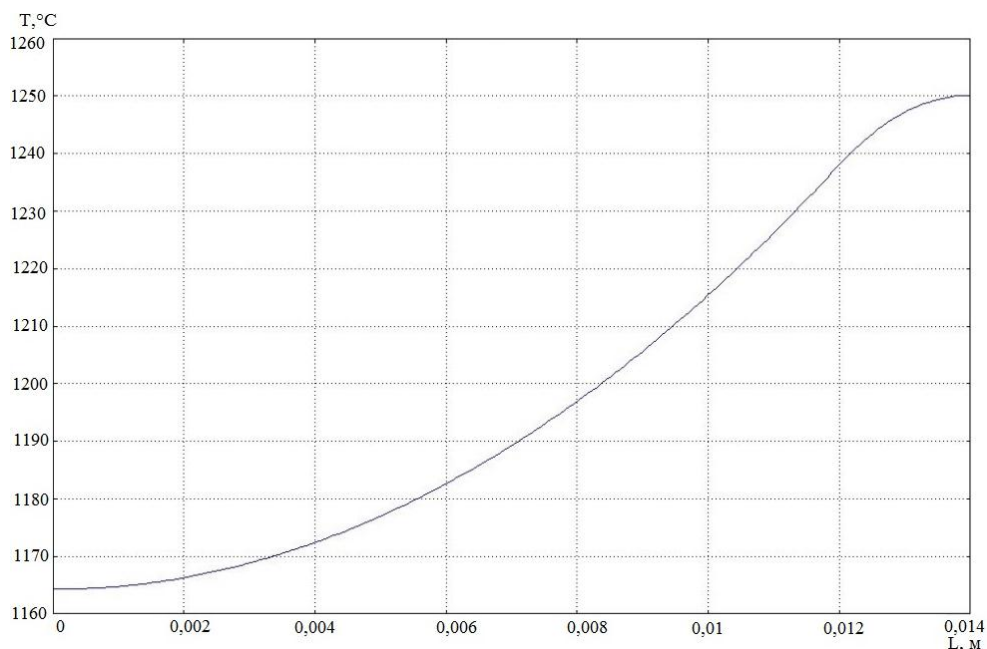


Рис. 3. Распределение температуры по радиусу загрузки на выходе из нагревателя в установившемся режиме

Разработаны алгоритм и программа расчета электромагнитных и температурных полей в установившемся режиме работы нагревателя дискретно-непрерывного действия. Определено, что для получения удовлетворительного по точности описания температурного поля, наиболее удобного для последующего решения задач оптимизации, необходимо использовать численную электро-тепловую модель процесса непрерывного нагрева.

Полученные в результате расчета параметры для одной конкретной реализации процесса могут быть применимы для решения задачи оптимизации переходных режимов индукционного нагревателя дискретно-непрерывного действия для нагрева ферромагнитных цилиндрических заготовок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Вайнберг А.М.* Индукционные плавильные печи. – М.: Энергия, 1967. – 415 с.
2. *Лыков А.В.* Теория теплопроводности. – М.: Высш. школа, 1967. – 599 с.
3. *Немков В.С., Демидович В.Б.* Теория и расчет устройств индукционного нагрева. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 280 с.
4. *Слухоцкий А.Е., Рыскин С.Е.* Индукторы для индукционного нагрева машиностроительных деталей. – Л.: Энергия, 1975. – 183 с.
5. *Данилушкин А.И., Осипов О.О., Фрыгин И.В.* Аналитическая модель процесса непрерывного индукционного нагрева заготовок подшипниковых колец // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Физико-математические науки. – 2000. – Вып. 9. – С. 200–203.
6. *Коломейцева М.Б.* Методология и опыт применения цифрового моделирования для оптимизации процессов промышленного нагрева металла: Автореф. ... дис. доктора техн. наук. – М., 1986. – 37 с.
7. *Рапопорт Э.Я.* Оптимизация процессов индукционного нагрева металла. – М.: Metallurgia, 1993. – 279 с.
8. *Зенкевич О.* Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 541 с.

Статья поступила в редакцию 2 июля 2015 г.

RESEARCH OF THERMAL AND ELECTROMAGNETIC FIELDS ON THE BASIS OF NUMERICAL MATHEMATICAL MODEL OF HEATING OF FERROMAGNETIC PREPARATIONS IN THE INDUCTION HEATER OF DISCRETE AND CONTINUOUS ACTION

S.V. Knyazev

Krasnoyarskgazprom Neftegazproyekt
26, Skljarenko st., Samara, 443086, Russian Federation

E-mail: sknyaz86@mail.ru

The technique of statement and numerical calculation of electromagnetic and thermal fields in established and the transitional modes of functioning of induction heaters of continuous and discrete and continuous action with ferromagnetic loading for heating to temperatures of plastic deformation is considered. The solution of regional tasks for electromagnetic and thermal fields is executed by method of final elements. Specific feature of the studied process is transition of the heated preparation through a point of magnetic transformations, and, the coordinate of this transition in the unsteady operating mode changes in the wide range. In this case resistance of system that leads to change of distribution of power on inductor length significantly changes. Besides, also the full capacity brought to the inductor and power factor changes.

Keywords: *induction heating, numerical mathematical model, method of final elements, electromagnetic and thermal fields.*

УДК 620.9.001.5

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АКТИВНО-АДАПТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ И УПРАВЛЕНИЕ ИМИ ПРИ ПОМОЩИ МУЛЬТИАГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ

Ю.П. Кубарьков, Я.В. Макаров, К.А. Голубева, В.М. Дашков

Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Подняты вопросы оптимизации уровня напряжения на шинах потребителей при использовании батарей статических конденсаторов, увеличения пропускной способности линий электропередач путем внедрения источника распределенной генерации. Рассмотрена диспетчеризация имеющихся и вновь вводимых электроэнергетических элементов с целью создания активно-адаптивной системы и обеспечения надежности электроснабжения потребителей. Отмечается возможность использования в качестве системы управления мультиагентной системы, обладающей необходимой гибкостью и приспособляемостью к изменяющимся условиям.

Ключевые слова: *электрические сети, активно-адаптивные элементы, оптимизация уровня напряжения, мультиагентная система.*

Введение

В настоящее время остаются актуальными вопросы улучшения качества электроэнергии, надежности электроснабжения потребителей и внедрения новых элементов, позволяющих сократить потери электроэнергии и управлять потоками мощности [1]. Однако внедрение активно-адаптивных элементов осуществляется преимущественно на низких классах напряжений 6–35 кВ. И связано это в первую очередь с необходимостью оптимизации режимов работы потребителей и сокращения собственных потерь в сетях крупных предприятий.

При этом наиболее распространенными мерами являются: увеличение пропускной способности линий электропередач путем замены существующих проводов на провода с большим сечением или проведения дополнительной линии электропередач; установка батарей статических конденсаторов. В настоящее время во всем мире все более широкое внедрение находят также источники распределенной генерации, которые могут быть расположены в непосредственной близости от потребителей и, таким образом, обеспечивать их электроэнергией, существенно сокращая ее потери при передаче в электрических сетях. Но, несмотря на эти преимущества, они обладают и собственными недостатками, главный из которых заключается в необходимости диспетчеризации имеющихся источников распределенной генерации.

Для решения этой задачи возможно использование автоматизированных систем управления, в основе которых лежит принцип децентрализованного принятия решений [2]. Системы, основанные на мультиагентной архитектуре, могут сыграть ключевую роль в дальнейшем преобразовании систем электроснабжения, поскольку позволяют учитывать располагаемые и вновь вводимые ресурсы,

*Юрий Петрович Кубарьков (д.т.н.), профессор кафедры «Электрические станции».
Ярослав Викторович Макаров, ассистент кафедры «Электрические станции».
Кристина Анатольевна Голубева, ассистент кафедры «Электрические станции».*

спрос потребителей на электроэнергию и большое количество ограничений, обусловленных как самими элементами электрических сетей, так и изменением топологии, выходом из строя оборудования или его выводом в ремонт [3].

Моделирование электрической сети

Возможные пути оптимизации режима работы электрической сети и в частности уровня напряжения на шинах потребителей рассмотрены на примере радиальной электрической схемы 10,5 кВ.

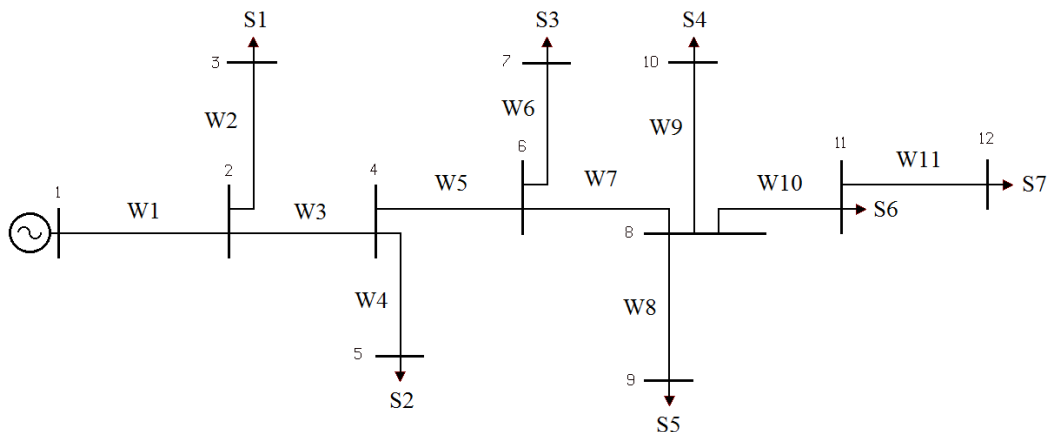


Рис. 1. Схема электрической сети 10,5 кВ

На рис. 1 представлена схема радиальной электрической сети напряжением 10,5 кВ. Линии электропередач имеют одинаковое сечение и выполнены проводом марки АС-50/8. Длина ЛЭП указана в табл. 1, характеристики подключенных нагрузок приведены в табл. 2.

Таблица 1

Длина ЛЭП

№ линии	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8	W9	W10	W11
L, км	0,15	0,15	0,77	0,15	0,15	0,15	0,31	0,3	0,23	0,3	0,3

Таблица 2

Характеристики подключенных нагрузок

Потребитель	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
P, кВА	160	100	400	250	160	250	400
Q, квар	80	50	200	120	80	120	200

Ограничение по напряжению в узлах сети можно описать следующим образом:

$$U_{i\text{мин}} \leq U_{i\tau} \leq U_{i\text{макс}}; \quad i = \overline{1, N}; \quad \tau = \overline{1, T},$$

где τ – дискретное время.

Исследования и расчеты

Для данной сети рассмотрены основные меры по оптимизации уровня напряжения, отмеченные ранее: установка батарей статических конденсаторов (БСК) и проведение дополнительной ЛЭП [4]. Мощность устанавливаемых БСК выбиралась в соответствии с номиналами промышленно производимых установок (табл. 3).

Таблица 3

Мощность устанавливаемых БСК

Потребитель	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
Мощность БСК, квар	75	50	200	100	75	100	200

Наибольшее падение напряжения в нормальном режиме наблюдается на линии W3. Как известно, падение напряжения на участке сети определяется по формуле

$$\Delta U = \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U},$$

где R и X – соответственно активное и индуктивное сопротивление участка сети; P и Q – величины активной и реактивной мощностей, протекающих по участку сети.

С другой стороны, снижая величину сопротивления связи, возможно добиться уменьшения падения напряжения, поэтому прокладка дополнительной ЛЭП того же сечения на этом участке позволит уменьшить это значение, а также благотворно повлияет на уровни напряжения на шинах потребителей S2–S7.

Уровни напряжения в узлах сети по наиболее загруженному пути представлены на рис. 2. Можно отметить, что согласно ГОСТ 32144-2013 отклонение уровней напряжения от номинального не превышает нормально допустимых значений ($\pm 5\% U_{ном}$).

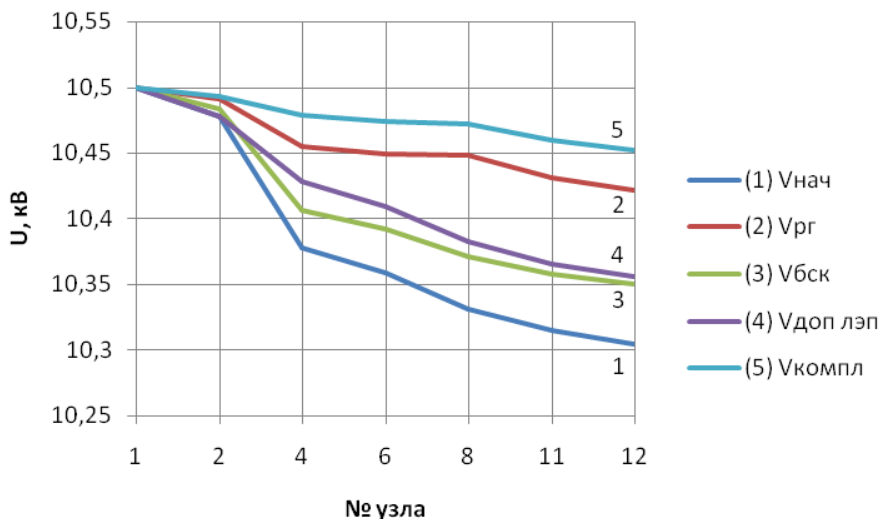


Рис. 2. Режимы работы сети для вариантов ее усиления

Проведенные расчеты показали, что при реализации этих мероприятий будет получен сопоставимый результат и напряжение на шинах наиболее удаленного потребителя составит 10,350 и 10,355 кВ соответственно. Однако проведение дополнительной ЛЭП является более затратным мероприятием и является целесообразным в случае дальнейшего расширения производства и увеличения количества подключаемых потребителей, а установка БСК требует наличия устройств регулирования, т. к. в случае перекомпенсации во время минимальной нагрузки возможны отклонения от номинального значения напряжения в большую сторону.

При перспективе развития сети была рассмотрена возможность использования источников распределенной генерации или возобновляемых источников в частности. Установка большого количества источников распределенной генерации малой мощности вблизи (на шинах) потребителей даст определенный эффект, но усложнит процесс диспетчеризации, в то время как установка одного дополнительного источника в узле максимальной нагрузки позволит получить сопоставимый результат [5]. Таким образом, наиболее рациональной принята установка источника распределенной генерации мощностью 1,5 МВт в 8-й узел, который в нормальном режиме будет обеспечивать электроэнергией потребителей S4-S7, что позволит сохранить изначальное направление потоков мощности в сети. Уровни напряжения в узлах сети в этом случае представлены на рис. 2.

Последний режим предполагает реализацию всех ранее рассмотренных мер для оптимизации уровня напряжения.

Мультиагентная система управления

Стоит отметить, что для достижения полученных результатов необходимо применение современных систем распределенной диспетчеризации, которые обладают достаточной гибкостью для своевременного реагирования на изменение нагрузки и управления распределенными источниками электроэнергии. Для этих целей, как уже отмечалось ранее, может быть использована мультиагентная система (МАС).

МАС состоит из определенного количества различных агентов. Каждый агент моделирует элемент сети (трансформатор, ЛЭП и т. д.) и его свойства, а также может обладать определенными целями и задачами. Таким образом, система может управлять активными элементами сети (такими как БСК и источники РГ), перераспределяя потоки электроэнергии и добиваясь снижения ее потерь и стабилизации уровня напряжения на шинах потребителей.

Решение об изменении характеристик конкретного элемента, например выдаваемой источником распределенной генерации мощности, принимается агентами коллективно исходя из того, будет ли это действие удовлетворять имеющимся ограничениям и целям других агентов.

Кроме всего прочего при возникновении аварии и выходе из строя определенных элементов сети МАС может реконфигурировать электрическую сеть, а затем и оптимизировать режим работы источников и потребителей с учетом вновь возникших ограничений. В случае подключения к сети нового элемента он сразу же интегрируется в МАС в виде соответствующего агента, а система подстраивается под работу с этим элементом автоматически.

Выводы

Реализация концепции развития интеллектуальной электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью и внедрение адаптивной системы управления на основе МАС позволят достичь следующих результатов:

- оптимизация уровня напряжения на шинах потребителей;
- снижение уровня потерь в сети;
- повышение пропускной способности линий электропередач;
- увеличение надежности электроснабжения потребителей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Кубарьков Ю.П., Голубева К.А., Макаров Я.В.* Оптимизация уровней напряжения в сети с распределенной генерацией // 2-я международная научно-практическая конференция «Инновационные технологии в энергетике». 30 ноября 2014 г. – Пенза: Приволжский дом знаний, 2014. – С. 76–79.
2. *Гольдштейн В.Г., Кубарьков Ю.П., Макаров Я.В.* Сохранение стабильного уровня напряжения в сетях с помощью мультиагентных систем // Электрооборудование, эксплуатация и ремонт. – 2015. – № 8.
3. *Кубарьков Ю.П., Макаров Я.В.* Решение задач управления в энергетике с применением мультиагентов // Интеллектуальные энергосистемы: Труды III Международного молодежного форума. В 3 т. – Томск, 2015. Т. 3. – С. 149–152.
4. *Elnashar M.M. R. El-Shatshat and M. A. Salama*, “Optimum Siting and Sizing of a Large Distributed Generators in a Mesh Connected System,” *International Journal of Electric Power System Research*, Vol. 80, June 2010, pp. 690–697.
5. *Abdolreza Sadighmanesh, Kazem Zare, Mehran Sabahi*. Distributed Generation unit and Capacitor Placement for Loss Voltage profile and ATC Optimization. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. 2012; 2(6): 774-780.

Статья поступила в редакцию 1 августа 2016 г.

THE USE OF ACTIVE ADAPTIVE ELEMENTS IN THE POWER SUPPLY AND MANAGEMENT BY MULTI-AGENT SYSTEMS

Y.P. Kubarkov, Ya.V. Makarov, K.A. Golubeva

Samara State Technical University
244, Molodogvardeiskaya str., Samara, 443100, Russian Federation

The paper discusses how to optimize the voltage level on the consumers' buses using static capacitor batteries, increasing the capacity of transmission lines and by implementing distributed generation sources. As well as organizing the scheduling of existing and newly introduced electric elements in order to create an active-adaptive system and ensure the reliability of electricity supply to consumers. As a control system is marked the possibility of using multi-agent system with the necessary flexibility and adaptability to changing conditions.

Keywords: *electric networks, active-adaptive elements, the optimization of voltage level, multi-agent system.*

*Yury P. Kubarkov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Yaroslav V. Makarov, Assistant.
Kristina A. Golubeva, Assistant.*