

DOI: 10.26730/1999-4125-2018-1-149-157

УДК 621.311:621.316

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ОПТИМАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ УГОЛЬНОЙ ШАХТЫ

EVALUATION OF EFFICIENCY OF OPTIMUM VOLTAGE REGULATION IN THE POWER SUPPLY SYSTEMS OF COAL MINES

Непша Федор Сергеевич,
старший преподаватель, e-mail: nepshafs@gmail.com
Nepsha Fedor S., senior lecturer
Ефременко Владимир Михайлович,
кандидат техн. наук, профессор, e-mail: evm-47@mail.ru
Efremenko Vladimir M., C.Sc. (Engineering), Professor

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия,
г. Кемерово, ул. Весенняя, 28
T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 street Vesennyaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation

Аннотация: Оптимальное регулирование напряжения в системах электроснабжения угольных шахт является одной из ключевых задач, решение которой может повысить энергоэффективность добычи угля. Ранее авторами был предложен алгоритм определения оптимального уровня напряжения по критерию минимума потребления активной мощности. Для его апробации авторами статьи разработана программа в среде MATLAB с использованием табличного процессора MS Excel. Разработанная программа была апробирована в рамках тестовой схемы угольной шахты, включающей в себя дискретные и недискретные регуляторы уровня напряжения. В качестве исходных данных о нагрузках были приняты реальные данные одной из угольных шахт Кузбасса. Для выполнения оптимизации уровня напряжения были использованы два алгоритма оптимизации: метод последовательной квадратичной оптимизации (SQP) и метод внутренней точки (interior point). Метод SQP показал несколько лучшие результаты. В связи с этим он был принят окончательно для реализации оптимального регулирования напряжения. По итогам проведенного моделирования было установлено, что использование предложенного алгоритма позволит снизить затраты угольного предприятия на приобретение электроэнергии и повысить качество электроэнергии по показателю «отклонение напряжения».

Abstract: Optimal voltage regulation in coal mine power supply systems is one of the key tasks, the solution of which can increase energy efficiency of coal mining. Earlier, the authors proposed an algorithm for determining the optimum level of voltage by the criterion of minimum consumption of active power. To test it, the authors of the article developed a program in the MATLAB environment using the MS Excel spreadsheet. The developed program was tested in the framework of the test scheme of the coal mine, which includes discrete and nondiscrete voltage level regulators. As the initial data on the loads, real data were received from one of the Kuzbass coal mines. To optimize the voltage level, two optimization algorithms were used: the SQP method and the interior point method. The method SQP has shown the best results. In connection with this, this method was finally adopted to implement the optimal voltage regulation. Based on the results of the simulation, it was found that the use of the proposed algorithm will reduce the costs of the coal company to purchase electricity and improve the quality of electricity in terms of "voltage deviation".

Ключевые слова: угольные шахты, регулирование напряжения, оптимизация, повышение энергоэффективности, система регулирования напряжения, методы оптимизации, SQP, interior point.

Key words: Static load characteristics, coal mines, voltage regulation, optimization, energy efficiency improvement, voltage regulation system, optimization methods, SQP, interior point



Рис. 1. Обобщенная структурная схема разработанной программы

Fig. 1. Generalized structural diagram of the developed program

Задача регулирования напряжения в системах электроснабжения (СЭС) угольных шахт является важнейшей задачей, решение которой позволяет обеспечить нормативный уровень напряжения на зажимах электроприемников и повысить энергоэффективность функционирования СЭС [1-3]. В работе [4] авторами было показано, что разработка системы оптимального регулирования напряжения является ключевой задачей для повышения энергоэффективности СЭС угольной шахты. В работе [5] предложена концепция алгоритма определения оптимального уровня напряжения, позволяющего задействовать все устройства регулирования напряжения, в том числе синхронные машины. С целью апробации разработанного алгоритма, необходимо провести его тестирование.

Тестирование предложенного алгоритма оптимального регулирования напряжения сводится к математическому моделированию СЭС угольной шахты и реакции на воздействие при заданных условиях.

Для того чтобы протестировать предложенный алгоритм управления уровнем напряжения в СЭС угольной шахты также необходима среда моделирования. Существует большое количество программно-вычислительных комплексов (ПБК) используемых для симуляции электрических режимов: EUROSTAG, POWERFACTORY, RASTRWIN [13] и др. В работе [6] было отмечено, что наиболее эффективным ПБК для расчета и

оптимизации электрических режимов является RastrWin. ПБК RastrWin обладает достаточным функционалом для использования его в качестве среды для расчета электрического режима в рамках разработанного алгоритма. Однако с целью дальнейшего развития предложенного алгоритма и решения иных задач было решено воссоздать блок для расчета электрических режимов самостоятельно.

В связи с этим, в качестве среды моделирования был выбран пакет прикладных программ MATLAB, т.к. эта среда обладает высокой гибкостью и имеет встроенный пакет расширений Optimization Toolbox, в котором возможно реализовать предложенные в работе [5] методы оптимизации. Ввод исходных данных решено осуществлять посредством табличного процессора MS Excel.

Учитывая особенности алгоритма оптимального регулирования напряжения [2], разрабатываемая программа должна выполнять следующие функции:

1. Обеспечивать ввод данных о параметрах СЭС посредством табличного процессора MS Excel.
2. Выполнение расчета электрических режимов с использованием метода Ньютона по схеме Энеева – Матвеева [7].
3. Формирование матрицы состояний исходя из количества дискретных переменных и их теку-

шего значения.

4. Выполнение оптимизации значений не-дискретных переменных для каждого из состояний СЭС угольной шахты по критерию минимума потерь активной мощности в СЭС угольной шахты с использованием заданного метода оптимизации из пакета расширений Optimization Toolbox.

5. Формирование матрицы значений потерь активной мощности для каждого из состояний.

6. Определение оптимальных значений дискретных и недискретных переменных, а также оптимальных значений напряжений на шинах подстанции.

7. Сохранение полученных данных в табличном процессоре MS Excel.

8. Определение оптимального уровня напряжения.

9. Выполнение расчета и оптимизации режима для заданных значений нагрузки.

С учетом вышеуказанных требований была разработана программа, обеспечивающая апробацию предложенного алгоритма оптимального регулирования. Обобщенная структурная схема программы представлена на рис. 1. Структура разработанной программы включает таблицы ввода/вывода данных (MS Excel) и набор функций реализуемых в среде программирования MATLAB.

Блок 1 реализован в среде MS Excel и представляет совокупность таблиц, включающих в себя информацию о параметрах расчета режимов, элементов СЭС.

В таблицу «общие параметры расчета режима» вводится информация о точности расчета режима, максимальном числе итераций и ограничениях при расчете электрического режима.

В таблицу «Параметры узлов», «Параметры ветвей» вводятся данные об узлах и ветвях СЭС.

В таблицу «Статические характеристики нагрузки» вводятся данные о коэффициентах полиномов, характеризующие статические характеристики нагрузки по напряжению.

В таблицу «Параметры УРПН» вводятся данные об устройствах регулирования под нагрузкой (УРПН) (шаг регулирования, число ступеней регулирования, ширина зоны нечувствительности, число нейтральных ступеней регулирования).

В таблицу «Замеры нагрузок» вводится информация о значениях активной и реактивной нагрузки с разбивкой по временным промежуткам.

Блок 2 реализован в программной среде MATLAB в виде функций осуществляющих обработку исходных данных, формирование матриц для расчета электрического режима, расчет режима и его последующую оптимизацию.

Функция «Расчет $K_{тр}$ и сопротивлений трансформатора» выполняет определение коэффициента трансформации и сопротивлений трансформаторов в соответствии с зависимостями, представ-

ленными в [8].

Функция «Считывание параметров узлов и ветвей» выполняет обработку данных, представленных в среде MS Excel. Данные обрабатываются и приводятся в форму, приемлемую для выполнения расчета и оптимизации электрического режима.

Функция «Расчет электрического режима методом Ньютона по схеме Энеева-Матвеева» выполняет расчет электрического режима и выводит в среду MATLAB результаты расчета. Подфункция расчета электрических режимов была протестирована с использованием схем электроснабжения различной конфигурации. Полученные результаты были сопоставлены с результатами расчета программного комплекса RastWin для аналогичных схем. В результате была выявлена достоверность и правильность функционирования блока расчета электрических режимов.

Функция «Целевая функция оптимизации» включает себя целевую функцию оптимизации с заданными граничными условиями. В рамках этой подфункции выполняется формирование матрицы состояний СЭС.

Пакет расширений Optimization Toolbox служит для выполнения оптимизации уровня напряжения по одному из заданных методов оптимизации (метод внутренней точки и метод последовательного квадратичного программирования).

В командном окне MATLAB вводятся команды для выполнения расчета и оптимизации электрического режима.

Данные полученные в блоке 2 передаются в блок 3 «Визуализация данных». Блок 3 позволяет визуализировать данные переданные в MS Excel из среды MATLAB. В нем выполняется визуализация графиков изменения потерь активной мощности, уровня напряжения в заданных точках. Также выдается информация о потерях активной энергии за расчетный период и быстродействию.

Для апробации полученной программы была разработана модель СЭС угольной шахты.

Разработка модели СЭС угольной шахты включала в себя следующие этапы:

- определение топологии сети и длин участков КЛ;
- определение параметров оборудования;
- задание параметров устройств регулирования напряжения;
- определение статических характеристик нагрузки по напряжению;
- задание графиков нагрузки узлов;
- ввод данных в среду табличного процессора MS Excel;
- выполнение тестирования полученной модели посредством выполнения расчета электрических режимов;
- устранение возможных ошибок в исходных данных;

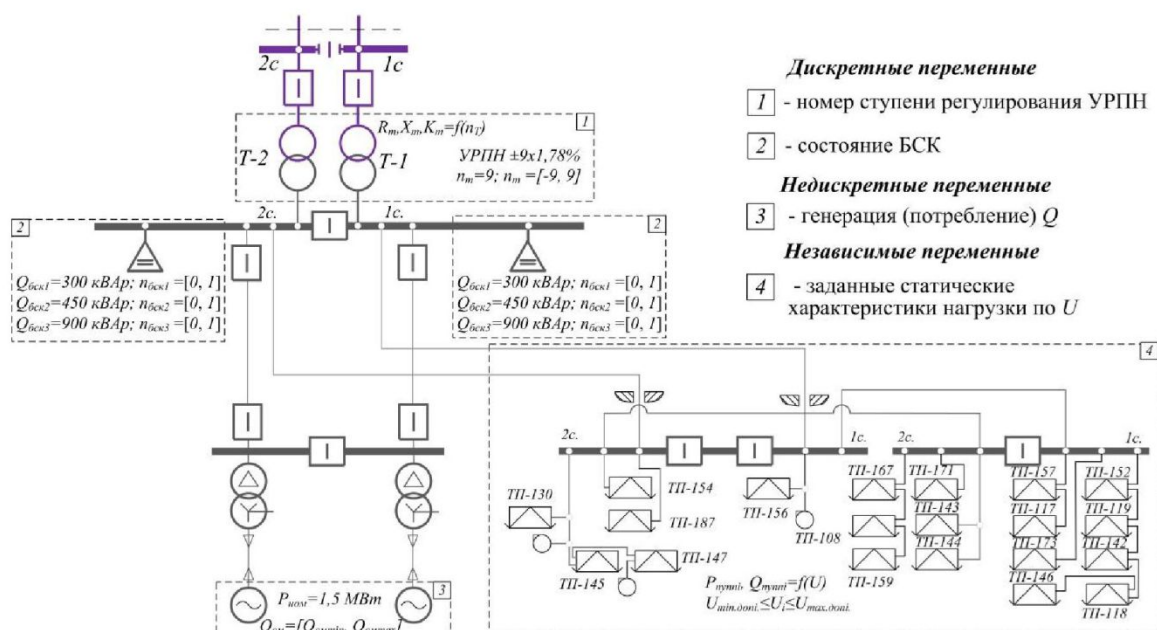


Рис. 2. Исходная схема для моделирования
Fig. 2. The initial scheme for modeling

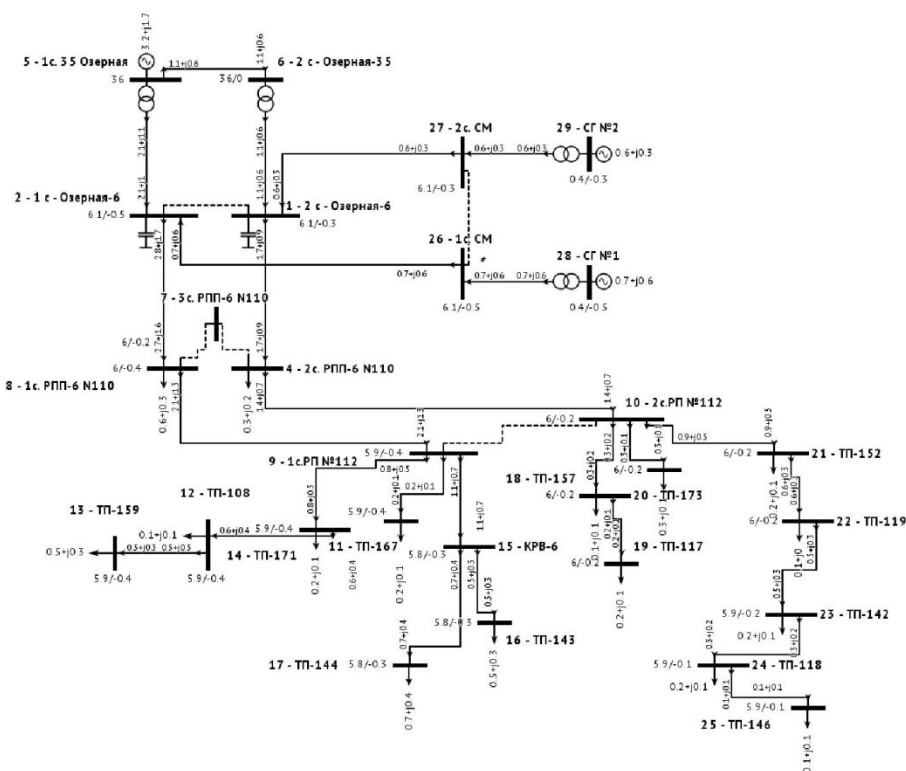


Рис. 3. Имитационная модель СЭС угольной шахты
Fig. 3. Simulation model of coal mine power supply system

В качестве объекта компьютерного моделирования была принята СЭС одной из угольных шахт Кузбасса. Границами моделирования приняты ввода передвижных участковых подземных подстанций (ПУПП) и граница раздела эксплуатационной ответственности с энергоснабжающей организацией.

Электроснабжение тестовой СЭС осуществля-

ется по двум ВЛ 35 кВ. Уровень напряжения на шинах 35 кВ определяется режимом работы энергосистемы. На главной понизительной подстанции (ГПП) установлены два трансформатора номинальной мощностью 10 МВА. ГПП осуществляет питание только подземных потребителей угольной шахты. Распределительные подземные подстанции (РПП) получают питание по магистральной схеме от двух фидеров ГПП. Далее мощность рас-

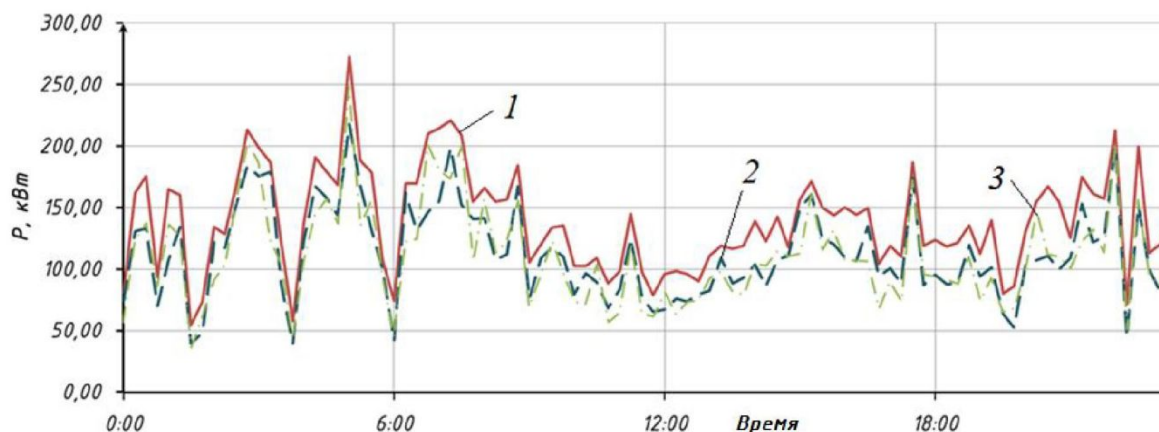


Рис. 4. Суточные графики изменения потерь активной мощности в СЭС угольной шахты (1 – без оптимизации, 2 – при использовании метода SQP, 3 – при использовании метода внутренней точки)
 Fig. 4. Diurnal graphs of the change in active power losses in the coal mine power supply system (1 - without optimization, 2 - using the SQP method, 3 - using the internal point method)

пределяется между ПУПП, к которым подключено горно-шахтное оборудование. Общее число элементов СЭС в сети 6 кВ: - 63, в том числе кабели (35 присоединений общей длиной около 25 км, разброс длин присоединений - от 10 до 2980 м, разброс сечений кабельных жил присоединений от 2х(3 х 120) до 3 х 50 мм², а также 51 АД суммарной установленной мощностью 9515 кВт; средняя мощность двигателей 186,5 кВт (15 имеют мощность свыше 100 кВт; минимальная мощность - 0,75 кВт).

В тестовую схему дополнительно включены не дискретные источники реактивной мощности, представленные генераторами с номинальной мощностью 1,5 МВт.

Исходная схема для моделирования представлена на рис. 2.

На основании исходной схемы для моделирования была разработана имитационная модель, которая представлена на рис.3.

В рамках разработанной модели было выполнено моделирование режима работы СЭС угольной шахты в течение суток согласно заданному графику электрических нагрузок. При этом моделирование выполнялось отдельно для каждой секции 35 кВ, согласно указаниям в разработанном алгоритме [5].

Далее в соответствии с графиком нагрузки была выполнена симуляция режима работы СЭС угольной шахты с дискретностью 15 минут. В результате были получены графики изменения уровня напряжения, потребления активной мощности с учетом статических характеристик нагрузки, суммарный уровень потерь активной электроэнергии.

Суммарный уровень потерь активной электрической энергии за 24 часа определяется по формуле:

$$\Delta W_p = \int_0^t \Delta P dt = \frac{\sum_{i=1}^{96} \Delta P_i}{4}, \text{ кВт} \cdot \text{ч} \quad (1)$$

где ΔP - потери активной мощности в момент времени i , кВт; i - порядковый номер временного промежутка, начиная с 00:00.

В результате моделирования режима работы СЭС угольной шахты было получено, что суммарный уровень потребления активной электрической энергии за 24 часа составляют 82,7 тыс. кВт·ч, при этом потери активной энергии составили 8,22 тыс. кВт·ч.

Предложенный алгоритм регулирования уровня напряжения базируется на одном из двух методов оптимизации: метод последовательной квадратичной оптимизации и метод внутренней точки [9,11]. Несмотря на то, что теоретически они должны давать практически идентичные результаты их нужно сравнить по различным параметрам. В результате будет возможно выбрать наиболее эффективный алгоритм и использовать его для оптимизации уровня напряжения в СЭС угольной шахты.

Суточные графики изменения потерь активной мощности при использовании двух методов оптимизации в результате проведенного моделирования представлены на рис.4.

Уровень потерь активной мощности при использовании метода SQP незначительно ниже уровня потерь активной мощности при использовании метода внутренней точки. Различие не превышает 2-3%. Причина подобного отклонения связана с отличием уровня напряжения в сети при использовании разных алгоритмов. При использовании метода SQP уровень напряжения в сети на 1-2% выше, чем при использовании метода внутренней точки. Это связано с отличием положений анцапф УРПН на

Таблица 1. Результаты оптимизации с использованием двух методов
 Table 1. Optimization results using two methods

Наименование параметра	Наименование метода оптимизации		
	Без оптимизации	Метод SQP	Метод внутренней точки
$W_{номр}$, тыс. кВт·ч	82,7	81,4	81,6
ΔW , тыс. кВт·ч	8,22	7,65	7,85
ΔU , %	-12 ÷ (+5)	-8 ÷ (+6)	-10 ÷ (+6)
U_{min} , кВ	5,8	5,9	5,8
U_{max} , кВ	6,3	6,4	6,3
Среднее время оптимизации, с	-	2,5	5

трансформаторе ГПП (при использовании метода SQP – 8 положение, при использовании метода внутренней точки – 9 положение).

Таким образом, проведенный сравнительный анализ двух методов оптимизации показал, что два метода оптимизации могут давать разные результаты при использовании одних и тех же исходных данных. При использовании двух методов оптимизации соблюдаются граничные условия и получаются близкие результаты, но значения зависимых переменных не одинаковы. Это показывает, что могут существовать решения с близкими значениями целевой функции, но различными значениями переменных. При этом функция регулирования напряжения не является выпуклой, что связано с тем, что в регулировании участвуют БСК и УРПН трансформаторов.

Итоговые результаты, полученные с использованием двух методов оптимизации, представлены в таблице 1.

Данные таблицы показывают, что метод SQP оказался наиболее эффективным и позволил снизить уровень потребления активной мощности на 7 % (с 8,22 до 7,65 тыс. кВт·ч в сутки), при этом снизился диапазон отклонения напряжения. Необходимо отметить, что при практически одинаковой эффективности алгоритм SQP обладает незначительным преимуществом в быстродействии. В связи с этим, для реализации предложенной системы регулирования окончательно будет принят метод SQP.

С целью определения эффективности полученных результатов был также произведен расчет экономического эффекта.

Критерием экономической эффективности в данном случае является минимум приведенных затрат, которые складываются из затрат на систему регулирования и затрат на потери активной мощности в СЭС.

Затраты на потери активной электроэнергии Z_n в СЭС угольной шахты выражаются по формуле [10,14]:

$$Z_n = c_3 \Delta W_p, \text{ тыс.руб.} \quad (2)$$

где c_3 – удельная стоимость потерь активной энергии, руб./кВт·ч; ΔW_p – активные потери электрической энергии, кВт·ч.

При отсутствии устройства автоматического регулирования напряжения или его неисправности потребуется установка нового УРПН и устройство автоматического регулирования напряжения трансформатора (АРНТ). В таком случае затраты на установку подобной системы можно оценить по формуле:

$$Z_k = c \cdot Z_{РПН}, \text{ тыс.руб.} \quad (3)$$

где $Z_{РПН}$ – затраты на приобретение УРПН и АРНТ, тыс. руб; c – коэффициент учитывающий затраты на монтаж УРПН и АРНТ;

В процессе расчета экономического эффекта от внедрения системы взаимосвязанного регулирования напряжения также был определен срок окупаемости мероприятий.

Получаемая годовая экономия от использования системы оптимального регулирования напряжения определяется по формуле:

$$\Delta = \Delta P_{\Delta} c_3 \tau, \text{ тыс.руб.} \quad (4)$$

где ΔP_{Δ} – разность потерь активной мощности до и после внедрения системы оптимального регулирования напряжения, кВт; c_3 – стоимость электроэнергии, руб/(кВт·ч); τ – число часов максимальных потерь в год, ч.

Тогда с учетом формулы (4) срок окупаемости системы оптимального регулирования напряжения составит:

$$T_{ок} = \frac{Z_k}{\Delta P_{\Delta} c_3 \tau}, \quad (5)$$

Стоимость потерь электроэнергии для предприятий угольной промышленности была принята равной 2,0 руб./кВт·ч. Число часов максимальных потерь 5760 часов. Результаты расчетов сведены в таблицу 2.

Таблица 2. Результаты расчета экономической эффективности
 Table 2. Results of calculation of economic efficiency

Характеристики	Схема без использования алгоритма оптимального регулирования напряжения	Схема с использованием алгоритма оптимального регулирования напряжения
Затраты на потери электроэнергии Z_n , тыс. руб.	9151,7	8711,7
Затраты на установку УРПН и АРНТ, тыс. руб.	-	1430/500*
Приведенные затраты Z , тыс. руб.	9151,7	10179,7/8711,7*
Экономический эффект, тыс. руб.	-	440
Срок окупаемости $T_{ок}$, лет	-	3,25/1,14*

*при наличии УРПН и АРНТ в нормальном эксплуатационном состоянии.

Результаты проведенного компьютерного моделирования показали, что внедрение системы взаимосвязанного регулирования позволило снизить затраты на потери электроэнергии с 9151,7 тыс. руб. до 8711,7 тыс. руб. Затраты на реализацию оптимального регулирования напряжения составили 1430 тыс. рублей при условии, что УРПН требует замены. Срок окупаемости составит 3,25 года. При наличии УРПН в нормальном эксплуатационном состоянии срок окупаемости составил 1,14 лет.

Выводы

1. Разработана программа на базе языка программирования MATLAB, позволяющая реализовать разработанный алгоритм оптимизации уровня напряжения в СЭС угольной шахты по критерию минимума потерь активной мощности.

2. Разработана имитационная модель СЭС электроснабжения угольной шахты, на основе которой выполнено апробирование разработанного алгоритма. Апробирование производилось с использованием двух алгоритмов оптимизации: метод последовательной квадратичной оптимизации и метод внутренней точки. В результате анализа установлено, что наиболее эффективным алгоритмом является

метод последовательной квадратичной оптимизации (SQP).

3. По итогам реализации предложенного алгоритма доказано, что взаимосвязанное регулирование позволяет снизить потери активной электроэнергии на 7%.

4. В результате симуляции разработанного алгоритма в сетях одной из угольных шахт Кузбасса доказано, что экономический эффект от внедрения предложенного алгоритма составит 440 тыс. рублей. При сроке окупаемости от 1,14 до 3,25 лет. Учитывая тенденцию к внедрению Smart Grid, предложенный алгоритм обладает высокой эффективностью и рекомендован для внедрения в проектируемых и модернизируемых СЭС угольных шахт.

Таким образом, реализация, предложенного алгоритма оптимального регулирования напряжения по критерию минимума потерь активной мощности показала достаточную эффективность. В результате оптимизации снизился уровень потребления и потерь активной мощности, повысились технико-экономические показатели сети. Применение разработанной системы регулирования напряжения обеспечивает повышение энергоэффективности СЭС угольной шахты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Миновский Ю.П. Эффективность электроснабжения забоев угольных шахт. – М.: Недра, 1990. – 158 с.: ил.
2. Тарасов Д. М. Управление режимом напряжения территориально рассредоточенных электроприемников горных предприятий: Дис. канд. техн. наук: 05.09.03: Санкт-Петербург, 2003 147 с.
3. Шевчук А. П. Повышение эффективности группового регулирования напряжения в распределительных сетях промышленных предприятий в условиях территориально рассредоточенных электропотребителей: диссертация ... кандидата технических наук, 2014.- 135 с.
4. Ефременко В.М. Особенности регулирования уровня напряжения в системах электроснабжения угольных шахт Кузбасса/ В.М. Ефременко, Ф.С. Непша // Промышленная энергетика, 2017. № 11. – С. 16–22.
5. Непша Ф.С. Разработка алгоритма оптимизации уровня напряжения в системе электроснабжения

угольных шахт по критерию минимума потребления активной мощности / Ф.С. Непша, В.М. Ефременко // Сборник статей по материалам II Всероссийской молодежной научно-практической конференции «Экологические проблемы промышленно развитых и ресурсодобывающих регионов: пути решения» (21-22 декабря 2017 г.) [электронный ресурс] / ФГБОУ ВО «Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т.Ф. Горбачева»; редкол.: С.Г. Костюк (отв. ред.) [и др.]. – Кемерово, 2017.

6. Непша Ф.С. Сравнение функциональных возможностей существующих программных средств расчета и анализа электрических режимов. / Ф.С. Непша, Г.В. Отдельнова, О.А. Савинкина // Вестник КузГТУ. - 2013. - №2. - С. 116-118.

7. Непша Ф. С. Анализ методов расчета электрических режимов в рамках системы электроснабжения угольной шахты / Ф. С. Непша, В. М. Ефременко // Интеллектуальные энергосистемы: труды V Международного молодежного форума, 9-13 октября 2017 г., г. Томск: в 3 т. — Томск : Изд-во ТПУ, 2017. — Т. 3. — С. 83-87.

8. Непша Ф.С. Оценка влияния работы устройства регулирования под нагрузкой на уровень потерь активной мощности в силовых трансформаторах / Ф.С. Непша, В.М. Ефременко // Вестн. Кузбасского гос. тех. унив., 2017. – № 4. – С. 84–89.

9. J. Nocedal and S. J. Wright, Numerical Optimization, Eds. Springer, 2006.

10. Железко Ю.С., Артемьев А.В., Савченко О.В. Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях: Руководство для практических расчетов. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004. – 280 с.: ил.

11. Bhowmik P. S., Rajan D. V., Bose S. P. Load Flow Analysis: An Overview. World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering Vol:6, No:3, 2012.

12. Simulink Design Optimization. User's Guide. User's Guide. The Math Works, Inc. USA, 2015.

13. ПК «RastrWin3». Руководство пользователя / Неймин В.Г., Машалов Е.В., Александров А.С., Багрянцев А.А., - Екатеринбург: 2015. - 276 с.

14. Герасименко А.А., Федин В.Т. Передача и распределение электрической энергии / Герасименко А.А., Федин В.Т. — Изд. 4-е. — М.: КНОРУС, 2014. — 648 с. — (Бакалавриат).

15. Идельчик, В.И. Расчеты и оптимизация режимов электрических сетей и систем / В.И. Идельчик. - М.: Энергоатомиздат, 1988

REFERENCES

1. Minovskiy, Yu. P. Effektivnost' elektrosnabzheniya zaboev ugol'nykh shakht [Electricity efficiency of coal mine faces]. Moscow: Nedra, 1990.158 p.

2. Tarasov D. M. Upravlenie rezhimom napryazheniya territorial'no rassredotochennykh jelektropriemnikov gornyyh predpriyatij [Management of a mode of voltage of territorially dispersed electric receivers of the mountain enterprises.]: Dis. kand. tehn. nauk[Thesis of candidate of technical sciences]: 05.09.03: St. Petersburg, 2003 147 p.

3. Shevchuk A. P. Povyshenie jeffektivnosti gruppovogo regulirovaniya napryazheniya v raspredelitel'nykh setyah promyshlennykh predpriyatij v usloviyakh territorial'no rassredotochennykh jelektropotrebitelej [A.P. Shevchuk, Increase of efficiency of group regulation of voltage in distributive networks of industrial enterprises in the conditions of territorially distributed electric consumers. Thesis of candidate of technical sciences]: disertacija ... kandidata tehniceskikh nauk [Thesis of candidate of technical sciences], St. Petersburg, 2014, 135 p.

4. Nepsha F.S., Efremenko V.M. Osobennosti regulirovaniya urovnya napryazheniya v sistemakh elektrosnabzheniya ugol'nykh shakht Kuzbassa [Features of voltage level regulation in power supply systems of coal mines of Kuzbass]. Promyshlennaya energetika [Industrial power engineering], 2017. No.11, P. 16–22.

5. Nepsha F.S., Efremenko V.M. Razrabotka algoritma optimizatsii urovnya napryazheniya v sisteme elektrosnabzheniya ugol'nykh shakht po kriteriyu minimuma potrebleniya aktivnoy moshchnosti [Elaboration of an algorithm for optimizing the voltage level in the coal mine electricity supply system based on the minimum of active power consumption]. Sbornik statey po materialam II Vserossiyskoy molodezhnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Ekologicheskie problemy promyshlenno razvitykh i resursodobyvayushchikh regionov: puti resheniya» [Collection of articles on the materials of II All-Russian Research and Practice Conference of Young Scientists “Environmental Problems of Industrial and Resource-Producing Regions: Ways of Solution”] (Kemerovo, December 21-22, 2017)

6. Nepsha F.S. Analiz metodov rascheta elektricheskikh rezhimov v ramkakh sistemy elektrosnabzheniya ugol'noy shakhty [Analysis of methods for calculating electrical regimes within the coal mine electricity supply system]. Intellektual'nye energosistemy: trudy V Mezhdunarodnogo molodezhnogo foruma [Intellectual energy systems: proceedings of the IV International Youth Forum] (Tomsk, October 9 - 13, 2017).

7. Nepsha F.S., Otdel'nova G.V., Savinkina O.A. Sravnenie funktsional'nykh vozmozhnostey

sushchestvuyushchikh programmykh sredstv rascheta i analiza elektricheskikh rezhimov [Comparison of the functionality of existing software tools for calculating and analyzing electrical modes]. Vestnik KuzGTU [Bulletin of Kuzbass State Technical University]. - 2013. No.2, P. 116-118.

8. Nepsha F.S., Efremenko V.M. Otsenka vliyaniya raboty ustroystva regulirovaniya pod nagruzkoy na uroven' poter' aktivnoy moshchnosti v silovykh transformatorakh [Evaluation of the influence of the on-load tap-changing device on the level of active power losses in power transformers]. Vestnik KuzGTU [Bulletin of Kuzbass State Technical University]. - 2017. No.4, P. 84-89.

9. J. Nocedal and S. J. Wright, Numerical Optimization, Eds. Springer, 2006.

10. Zhelezko Yu.S., Artem'ev A.V., Savchenko O.V. Raschet, analiz i normirovanie poter' elektroenergii v elektricheskikh setyakh: Rukovodstvo dlya prakticheskikh raschetov [Calculation, analysis and normalization of electricity losses in electrical networks: A guide for practical calculations]. Moscow: Izd-vo NTs ENAS, 2004. 280 p.

11. Bhowmik P. S., Rajan D. V., Bose S. P. Load Flow Analysis: An Overview. World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering Vol:6, No:3, 2012.

12. Simulink Design Optimization. User's Guide. User's Guide. The Math Works, Inc. USA, 2015.

13. PK «RastrWin3». Rukovodstvo pol'zovatelja [The program complex "RastrWin3". User's manual] / Neujmin V.G., Mashalov E.V., Aleksandrov A.S., Bagrjancev A.A., Ekaterinburg: 2015. 276 p.

14. Gerasimenko A.A., Fedin V.T. Predacha i raspredelenie elektricheskoy energii [Transmission and distribution of electrical energy]. Izd. 4-e. Moscow: KNORUS, 2014. 648 p.

15. Idel'chik, V.I. Raschety i optimizatsiya rezhimov elektricheskikh setey i sistem [Calculations and optimization of modes of electrical networks and systems]. Moscow: Energoatomizdat, 1988. 286 p.

Поступило в редакцию 12.01.2018

Received 12.01.2018