

УДК 621.311:621.316

## **РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ВЗАИМОСВЯЗАННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СЭС УГОЛЬНОЙ ШАХТЫ**

Ф.С. Непша, ст. преп. кафедры ЭГиПП

Р.В. Беляевский, к.т.н. доцент кафедры ЭГиПП

Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева  
г. Кемерово

### **Введение**

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. Однако существующая система регулирования не обеспечивает выполнение этих задач. Анализ, выполненный в работе [1], позволил выявить следующие особенности системы регулирования напряжения: неиспользование устройств регулирования под нагрузкой (УРПН) в автоматическом режиме, автоматическое управление батареями статических конденсаторов только по критерию обеспечения нормативного  $\text{tg}\varphi$ , установка батарей статических конденсаторов (БСК) непосредственно на шинах главной понизительной подстанции (ГПП), отсутствие согласованности устройств регулирования напряжения. Проведенные исследования [1] показывают, что в процессе функционирования СЭС угольной шахты в нормальном режиме наблюдаются отклонения напряжения в пределах  $-17\div+7\%$ . В послеаварийном режиме снижение напряжения достигает до 25%. Следовательно, существующий алгоритм регулирования напряжения неэффективен т.к. устройства регулирования напряжения не обеспечивают поддержания нормативного уровня напряжения. При этом система регулирования напряжения не обеспечивает минимизацию уровня потребления активной мощности на границе раздела между угольной шахтой и энергоснабжающей организацией.

В связи с этим, для повышения энергоэффективности СЭС угольных шахт Кузбасса особенно актуальным является разработка системы взаимосвязанного регулирования напряжения в СЭС угольной шахты, обеспечивающей повышение энергоэффективности за счет оптимизации уровня напряжения в СЭС по критерию минимума потребления активной мощности на границе раздела с энергоснабжающей организацией. Вопрос создания системы регулирования напряжения в СЭС угольной шахты поднимался в работах [2-4]. Однако до сих пор система взаимосвязанного регулирования напряжения в СЭС угольной шахты не была разработана. Разработанные системы регулирования напряжения [5-6] не учитывают возможность регулирования уровня потребления активной мощности путем регулирования уровня напряжения в СЭС.

Авторы считают, что система взаимосвязанного регулирования напряжения в СЭС угольной шахты должна обеспечить выполнение следующих задач:

1. Поддержание заданного уровня напряжения на зажимах электроприемников;
2. Предотвращение повышения напряжения или тока выше допустимых пределов с целью обеспечения сохранности оборудования;
3. Снижение потребления активной мощности путем регулирования уровня напряжения.
4. Учитывать статические характеристики нагрузки по напряжению.

При этом для осуществления регулирования напряжения в СЭС должны быть задействованы все устройства регулирования.

### Теория

Структурная схема СЭС угольной шахты с малой генерацией представлена на рисунке 1.

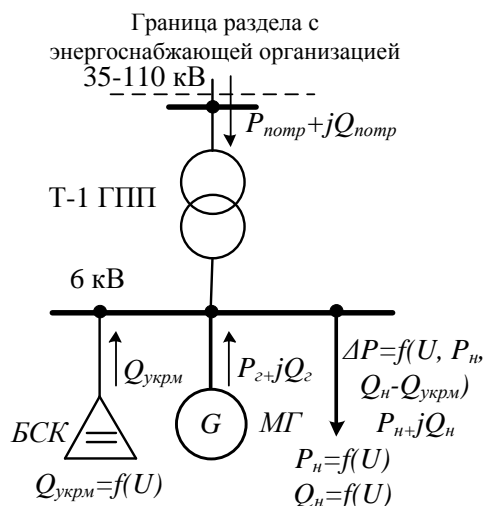


Рисунок 1 – Структурная схема СЭС угольной шахты при работе параллельно с сетью

Для разработки алгоритма оптимизации уровня напряжения в рамках СЭС, представленной на рисунке 1, необходимо определить зависимые переменные, граничные условия и целевую функцию.

Зависимые переменные представляют собой совокупность параметров СЭС, регулируя которые, возможно изменить значение целевой функции. Эти переменные могут быть дискретными или недискретными. В случае оптимизации режима СЭС по напряжению дискретными переменными являются: номер анцапфы УРПН трансформаторов ГПП пт, номер ступени регулирования БСК пбск. Недискретными переменными являются значения генерации реактивной мощности малой генерацией  $Q_{ген}$ .

Целевая функция и граничные условия оптимизации режима работы СЭС угольного предприятия по критерию минимума потребления активной мощности представлены в (1).

$$\begin{cases} P_{номр} = \sum_{i=1}^{N_1} P_{ni}(U_i) + \Delta P - \sum_{j=1}^{N_2} P_{ej}, P_{номр} \rightarrow \min \\ \Delta P = f(U, P_n, Q_n - Q_{укрм}, K_m); \\ P_n = f(U), Q_n = f(U); Q_{укрм} = f(U); \\ U_{\min} \leq U_i \leq U_{\max}; \\ K_{m.\min} \leq K_m \leq K_{m.\max}; \\ Q_{e.\min j} \leq P_{ej} \leq Q_{e.\max j}; \end{cases}$$

где  $N_1$  - число нагрузочных узлов;  $N_2$  - число генераторных узлов, в которых  $P_g = \text{const}$ ;  $U$  – уровень напряжения на зажимах электроприемников;  $\Delta P$  – потери активной мощности в СЭС угольной шахты;  $U_{\min}$ ,  $U_{\max}$  – максимальные и минимальные ограничения по уровню напряжения, определяемые требованиями ГОСТ и паспортными данными электроприемников;  $P_{g\min j}$ ,  $P_{g\max j}$ ,  $Q_{g\min j}$ ,  $Q_{g\max j}$  – максимальные и минимальные ограничения по уровню генерации активной и реактивной мощностей, определяемые паспортными данными генераторов и  $P$ - $Q$  диаграммой;  $P_n = f(U)$ ,  $Q_n = f(U)$  – статические характеристики нагрузки электроприемников угольной шахты,  $K_{t.\min}$ ,  $K_{t.\max}$  – минимальный и максимальный коэффициенты трансформации трансформатора ГПП.

На основе проведенного анализа, а также с учетом различия целевых функций для различных режимов функционирования объектов малой генерации был разработан алгоритм оптимизации уровня потребления активной мощности в СЭС угольной шахты.

Алгоритм предполагает раздельное выполнение операций симуляции текущего режима и его оптимизации. Это позволяет осуществлять мониторинг состояния СЭС угольной шахты и обеспечивать максимальную эффективность использования устройств регулирования напряжения.

Общее представление алгоритма оптимизации уровня потребления активной мощности в СЭС угольной шахты с малой генерацией представлен на рисунке 2.

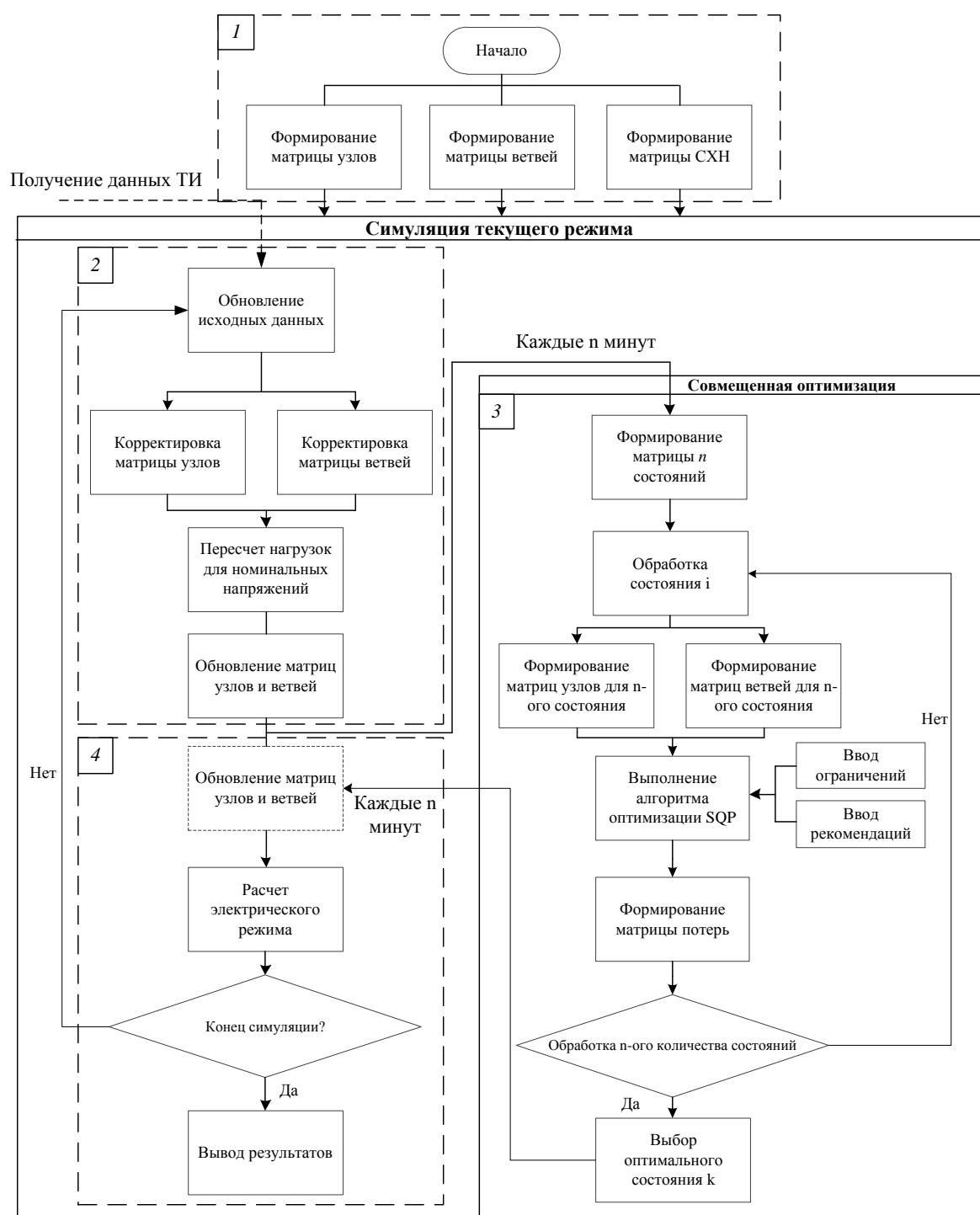


Рисунок 2 – Общее представление алгоритма оптимизации уровня потребления активной мощности в СЭС угольной шахты с малой генерацией

Предложенный алгоритм включает в себя выполнение следующих блоков:

Блок 1 - подготовка исходных данных. В нем выполняется сбор данных о топологии электрической сети и формируется матрица статических характеристик нагрузки по напряжению.

Блок 2 – обновление исходных данных и симуляция текущего режима. Выполняется сбор данных телеизмерений и корректировка исходных данных. По полученным данным выполняется определение нагрузок для номинального уровня напряжения и обновляются матрицы узлов и ветвей. Далее выполняется симуляция текущего режима. Для симуляции электрического режима выбран метод Ньютона с определением коэффициента демпфирования по схеме Энеева – Матвеева. Обоснование выбранного метода расчета режимов приведено в [7].

Блок 3 - Совмещенная оптимизация. В нем с определенной периодичностью осуществляется определение значений зависимых переменных для получения минимума целевой функции (1).

Зависимые переменные, которые могут изменяться для получения оптимального режима, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Виды зависимых переменных, регулируемых в процессе оптимизации режима работы СЭС

Наименование переменной	Обозначение	Тип	Примечание
Реактивная мощность, выдаваемая или потребляемая синхронными генераторами	$Q_{ген}$	Недискретная	Для каждого синхронного генератора в СЭС угольной шахты определена величина $Q_i$ , входящая в интервал $Q_i = [Q_{imin}, Q_{imax}]$ . Верхняя и нижняя граница определяется особенностями каждого синхронного генератора.
Положение РПН трансформатора	$n_i$	Дискретная	Для каждого трансформатора определено дискретное значение переменной $n_i$ , находящейся в пределах $n_i = [n_{imin}, n_{imax}]$ .
Номер ступени БСК	$n_{бск i}$	Дискретная	Каждый БСК имеет определенное количество ступеней. При этом мощность БСК равна дискретной величине из ряда $Q_{укрм} = [Q_{укрм min}, Q_{укрм max}]$ .

Принцип предлагаемого алгоритма совмещенной оптимизации состоит в раздельном рассмотрении дискретных и недискретных переменных.

На первом этапе оптимизации выполняется формирование матрицы состояний СЭС угольной шахты. Составляемая матрица состояний позволяет получить математическое представление о возможных состояниях СЭС угольной шахты, т.е. отображает совокупность всех возможных состояний системы в текущий момент времени.

Каждая строка матрицы представляет собой возможное состояние системы, а каждый столбец число возможных вариаций отдельной переменной.

Число колонок в матрице соответствует числу дискретных регуляторов напряжения, а число строчек соответствует возможному числу дискретных состояний системы. Число возможных состояний СЭС промышленного предприятия напрямую зависит от числа дискретных регуляторов уровня напряжения. Число возможных состояний очень важно т.к. оно напрямую влияет на скорость вычислений. Например, если на ГПП угольной шахты установлены 2 силовых трансформатора с числом положений УРПН 19, а на шинах ГПП установлены 2 устройства БСК с 3 ступенями регулирования, то число возможных состояний системы составит  $172 \cdot 32 = 2601$ . Условно принимая, что время оптимизации целевой функции для недискретных переменных составит 1 секунду, время необходимое для анализа всех возможных состояний СЭС промышленного предприятия может занять длительный промежуток времени. Следовательно, необходимо уменьшить количество возможных комбинаций.

Одним из способов снижения возможного числа комбинация является раздельное рассмотрение сетей питаемых от каждого трансформатора ГПП. Данный способ является вполне приемлемым т.к. в нормальном режиме сети, запитанные от каждого трансформатора можно считать независимыми. Таким образом, при рассмотрении радиальных сетей, становится возможным уменьшить число возможных комбинаций дискретных переменных.

Второй способ заключается в том, что УРПН трансформатора не может сразу перейти из текущего состояния в крайнее. Другими словами УРПН переключает анцапфы последовательно. Время переключения составляет от 3 до 10 секунд. При этом независимо от длительности переключения УРПН имеют блокировку, разрешающую переход избирателя только на одну ступень. Следовательно, рассматривать матрицу состояний с числом возможных положений УРПН более 3 не имеет смысла. Таким образом, рассматриваются 3 положения УРПН: птек, птек+1, птек-1. Принимая во внимание две вышеуказанные гипотезы, число возможных комбинаций снижается до  $31 \cdot 3 = 9$ .

Второй этап состоит в распознавании матрицы сети и выполнении оптимизации недискретных параметров. На каждом этапе поиска целевой функции, выполняется обращение к матрице состояний СЭС.

Для решения задачи нелинейной условной оптимизации авторами предлагается рассмотреть метод последовательного квадратичного программирования (SQP) и метод внутренней точки. Эти методы согласно [8] являются наиболее совершенными для такого рода задач. Предлагается в рамках практической реализации разработанного алгоритма рассмотреть эти алгоритмы оптимизации и сравнить их по двум показателям:

1. Эффективность алгоритма оптимизации, которая оценивается величиной снижения мощности потребляемой из питающей сети  $\Delta P_{\text{потр}}$  (кВт).
2. Скорость выполнения алгоритма (мс). Процесс оптимизации должен осуществляться в режиме реального времени с заданной периодичностью. Поэтому для исключения принятия решений с запозданием важно, чтобы реализация алгоритма была максимально быстрой.

После выполняется оптимизация каждого из возможных состояний СЭС угольной шахты, включенного в матрицу состояний. Из рассмотренных состояний выбирается состояние с наименьшим значением потребляемой активной мощности.

Блок 4 – Блок формирования управляющих сигналов на изменение значений зависимых переменных. После выполнения оптимизации выполняется корректировка матриц узлов и ветвей, а также формируется сигнал на изменение зависимых переменных. Затем операция оптимизации зависимых переменных повторяется с заданной периодичностью.

Периодичность выполнения оптимизации зависимых параметров определяется коммутационным ресурсом УРПН на ГПП.

### **Выводы**

1. На основе проведенных исследований разработан алгоритм оптимизации уровня напряжения по критерию минимума потребления активной мощности в СЭС угольной шахты.

2. Предложенный алгоритм учитывает СХН по напряжению электроприемников, что повышает его точность и достоверность и позволяет использовать электроприемники для регулирования величины потребления активной и реактивной мощности.

3. Разработанный алгоритм позволяет учитывать работу устройств компенсации реактивной мощности, в случае если они имеют дискретный диапазон регулирования.

4. Предложено выполнять совместную оптимизацию дискретных и недискретных переменных путем формирования матриц состояний. Для ускорения расчетов, при формировании матрицы состояний в отношении УРПН трансформаторов ГПП предложено учитывать только соседние положения анцапф УРПН.

5. В качестве методов оптимизации недискретных переменных предложено рассмотреть два наиболее современных метода: метод внутренней точки и метод последовательной квадратичной оптимизации. В рамках практической части будет выполнено сравнение этих алгоритмов по двум параметрам: эффективность оптимизации и скорость выполнения оптимизации.

6. Поскольку устройство РПН трансформаторов на ГПП обладает ограниченным ресурсом, предложено выполнять переключения анцапф трансформаторов с определенной периодичностью, с целью исключения преждевременного износа контактов устройства РПН.

7. Разработанный алгоритм оптимизации уровня потребления можно развить в рамках концепции SmartGrid и применять в СЭС промышленных предприятий любых отраслей промышленности.

Для дальнейшей апробации разработанного алгоритма необходимо реализовать разработанный алгоритм в программной среде и применить его в отношении имитационной модели СЭС угольной шахты.

### Список литературы:

1. Непша Ф. С., Ефременко В. М. Особенности регулирования уровня напряжения в системах электроснабжения угольных шахт Кузбасса // Промышленная энергетика. 2017. №11.
2. Миновский Ю.П. Эффективность электроснабжения забоев угольных шахт. – М.: Недра, 1990. – 158 с.: ил.
3. Конюхова Е.А. Регулирование электропотребления промышленного предприятия при взаимосвязанном выборе режима напряжения и компенсации реактивной мощности. Автореферат дисс. ... доктора техн. наук. М.: 1998. – 36 с.
4. Полищук В. В.. Регулирование режима напряжения в распределительных сетях 6(10) кВ горных предприятий. Автореферат дис. ... кандидата технических наук. гос. горный ин-т.- Санкт-Петербург, 1996.- 22 с.
5. Тарасов Д. М. Управление режимом напряжения территориально рассредоточенных электроприемников горных предприятий: Дис. канд. техн. наук: 05.09.03: Санкт-Петербург, 2003 147 с.
6. 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.
7. Непша Ф.С. Анализ методов расчета электрических режимов в рамках системы электроснабжения угольной шахты / Ф.С. Непша // Интеллектуальные энергосистемы: труды IV Международного молодёжного форума. В 3т. Томск 9 - 13 октября 2017 г. Т.1.-Материалы IV Международного форума «Интеллектуальные энергосистемы», 377 с.
8. J .Nocedal and S . J . Wright , Numerical Optimization, Eds. Springer, 2006 .