

ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОПТИМИЗАЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОТОКОВ В МНОГОУРОВНЕВЫХ ЛОКАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

Н.И. Смоленцев, С.А. Четошников

Приводятся результаты исследования математической модели потоков энергии в локальной сети с использованием ветроэнергетической установки (ВЭУ), солнечной батареи (СБ), дизеля-генератора (ДГ) и накопителя энергии (НЭ). Цель работы — определение оптимальных параметров локальной сети и источников альтернативной энергии, позволяющих проводить технико-экономическую оптимизацию. Работа выполнена в рамках Соглашения о предоставлении субсидии № 14.577.21.0069 от 05.06.2014 г. (RFMEFI57714X0069), заказчик - Министерство образования и науки Российской Федерации.

Ключевые слова: локальная электрическая сеть, накопитель энергии, альтернативный источник электроэнергии, интеллектуальная система управления, высокотемпературная сверхпроводимость (ВТСП).

В настоящее время большое количество потребителей электрической энергии расположены вдали от источников централизованного электроснабжения, что требует построения протяженных линий электропередач и увеличивает потери электрической энергии. В связи с развитием альтернативной энергетики, которая получила название распределенной энергетики, появилась возможность дополнить существующую инфраструктуру децентрализованными возобновляемыми системами генерации электричества и тепла, которые помогут существенно снизить потери при передаче и преобразовании электричества [1]. В качестве возобновляемых источников используют энергию ветра, солнца, воды и другие источники.

Применение возобновляемых источников энергии в составе автономных энергетических систем позволяет снизить топливную составляющую в себестоимости вырабатываемой электроэнергии, что существенно повышает их технико-экономическую эффективность. В настоящее время за рубежом и у нас в стране доля энергии, выработанной в секторе распределенной энергетики, непрерывно растет, более того, разработаны комплексные планы увеличения доли электроэнергии, вырабатываемой альтернативными источниками. В странах ЕС это программа «Горизонт 2020» и в РФ – «Энергетическая стратегия России на период до 2020 года». Аналогичные программы есть и в других странах.

Малые ветроэнергетические установки (ВЭУ) мощностью до 100 кВт находят широ-

кое применение для автономного питания потребителей, т. к. они конструктивно просты, а необходимая ветровая энергия имеется во многих районах страны.

Скорость ветра и потребление мощности нагрузкой являются случайными величинами, что в сочетании с соизмеримостью мощностей основного энергетического оборудования требует согласования в реальном масштабе времени режимов производства и потребления электроэнергии.

Эту проблему можно решить, используя в энергетической системе сетевые накопители энергии. При этом в целом локальная сеть должна быть составлена оптимально с учетом работы и параметров всех элементов. Оптимизировать режимы работы элементов локальной электрической сети и энергетические потоки между ними возможно на основе математической модели. В настоящей статье предложен один из вариантов решения данной проблемы.

Возобновляемые источники электрической энергии работают в составе автономных сетей, получивших название локальных электрических сетей (ЛЭС) [2–7].

Современная локальная электрическая сеть содержит, как правило, следующие основные элементы:

- альтернативный источник электроэнергии;
- систему интеллектуального управления;
- накопитель энергии.

Важным элементом ЛЭС является накопитель энергии [8]. Накопитель энергии вы-

ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОПТИМИЗАЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОТОКОВ В МНОГОУРОВНЕВЫХ ЛОКАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

полняет следующие функции в локальной электрической сети:

- повышает экономическую эффективность сети;
- выравливает электрическую нагрузку при ее значительных колебаниях;
- служит резервным источником электропитания;
- выполняет функции согласования локальных электрических сетей различного уровня.

Накопители энергии могут быть использованы не только в локальных электрических сетях с альтернативными источниками энергии (ветроустановки, солнечные панели и т. д.), но также – в электротранспорте для повышения энергоэффективности силовых устройств (электропоездов, троллейбусов, гибридных силовых установок в автотранспорте и т. д.) [9].

В качестве эффективного аккумулятора предлагается использовать сверхпроводящий электрокинетический накопитель энергии (СПЭНЭ–1) на основе высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП), результаты разработки которого приведены в работе [10]. В данном накопителе энергии применен бесконтактный, пассивный, самоцентрирующийся сверхпроводящий подвес маховика-ротора, который выполняет функции преобразователя электрической энергии в механическую при накоплении энергии и механической в электрическую при его разрядке. Принцип работы сверхпроводящего подвеса маховика-ротора основан на эффекте выталкивания магнитного поля из объема сверхпроводника, что эквивалентно диамагнитному «зеркальному» экрану.

В отличие от управляемого бесконтактного магнитного подвеса, данный тип подвеса не содержит активных систем регулирования, в частности, следящих систем положения ротора-маховика и регуляторов величины напряженности магнитного поля, характеризуется большой подъемной силой подвеса, саморегулированием в осевом направлении подвеса и направлении, перпендикулярном оси подвеса. Кроме того, сверхпроводящий бесконтактный подвес имеет хорошие демпфирующие свойства [11].

Работа локальной электрической сети с накопителем энергии рассмотрена в ряде работ, например, [12–14]. Потребители электрической энергии (ПЭЭ) подключены одновременно к различным источникам питания, в частности, ветроэнергетической установке (ВЭУ), солнечной батарее (СБ), дизель-генератору (ДГ). В блок управления поступа-

ют данные о текущих энергетических потоках Z_1, Z_2, Z_3, Z_n , а также о состоянии накопителя энергии СПЭНЭ-1. В зависимости от выбранного закона оптимизации по тому или иному параметру, или группе параметров, микропроцессор, встроенный в блок управления, оптимизирует распределение энергии между источниками энергии, накопителем энергии, потребителями энергии таким образом, чтобы сохранялся постоянный баланс между потребленной и выработанной электрической энергией в любой момент работы локальной электрической сети.

Выбор режимов работы локальной электрической сети во многом определяется особенностями конкретных потребителей: недельными и сезонными графиками электрической нагрузки, структурой и оборудованием существующих систем энергоснабжения, технической возможностью подключения к централизованным сетям.

Кроме того, при выборе схемных решений необходимо учитывать характеристики собственно энергетической установки и других элементов схемы, климатические условия региона, возможности резервирования электрической мощности и многое другое.

Поскольку накопитель энергии, как указано выше, выполняет важные функции в локальной электрической сети, то его использование в любой ЛЭС даст возможность выровнять графики нагрузок в разные периоды суточного и сезонного спроса на электрическую энергию.

Применение накопителей энергии позволит коммерциализировать производство электроэнергии, что повысит эффективность работы энергетических компаний и качество электроснабжения потребителей за счет компенсации недостаточной пропускной способности элементов системы, управления реактивной мощностью, регулирования напряжения, снижения стоимости электроэнергии и т. п.

Для выбора алгоритма управления энергетическими потоками необходима математическая модель энергетических потоков в локальной электрической сети и метода их оптимизации по какому-либо параметру, например, по минимуму электрических потерь в сети.

Это позволит, при наличии соответствующего программного обеспечения, реализовать интеллектуальное управление работой элементов ЛЭС с целью оптимизации по заданным параметрам. В таком режиме можно достичь высоких технико-экономических показателей работы ЛЭС в сравнении с сетью с централизованными источниками и

преодолеть углеводородную зависимость энергетики.

В работе [12] приведена математическая модель обобщенной схемы энергокомплекса, содержащего электрические и тепловые источники энергии, а также системы аккумулирования энергии. Математическая модель строится на условии баланса потоков тепловой и электрической энергии в виде системы нелинейных уравнений.

В работе [16] описывается локальная сеть с несколькими источниками энергии. Здесь для решения системы линейных уравнений, применены методы линейного программирования, в частности, симплекс-метод. В работе сделано ряд упрощающих предположений, в частности, все источники энергии имеют одинаковую зависимость КПД от мощности, что не всегда оправдано.

В работах [17, 18] рассмотрена возможность применения сетевых накопителей энергии на примере атомной энергетики. Сетевые накопители энергии (СНЭ) позволяют за счет маневрирования электрической мощностью оптимизировать технико-экономические показатели электроэнергетики. Делается вывод о применимости таких накопителей для сетей любого уровня, особенно электрических сетей с распределенной генерацией.

Дальнейшее развитие интеграции локальных электрических сетей и централизованных сетей возможно на основе информационно-интеллектуальных систем управления, что требует развития математических методов анализа сложных гибридных электрических сетей [19].

В работе [20] предлагается с помощью сетевых накопителей энергии строить сложную архитектуру многоуровневых локальных сетей подобно информационным сетям. Проблема оптимизации и управления энергетическими потоками имеет здесь особое значение.

В основу предлагаемой математической модели потоков энергии в локальной сети с использованием ВЭУ, солнечной батареи и дизеля-генератора, может быть положен один из методов линейного программирования.

Пусть параметры локальной электрической сети, например энергетические потоки между узлами сети, описываются неизвестными $x_i \geq 0$, где индекс $i = 1, 2, \dots, n$.

Общая задача линейного программирования заключается в отыскании вектора $J = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, оптимизирующего линейную форму [21]

$J = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n \rightarrow \min(\max)$, (1)
при этом удовлетворяющего решению системы линейных уравнений:

$$\begin{aligned} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1j}x_j + \dots + a_{1n}x_n &= b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2j}x_j + \dots + a_{2n}x_n &= b_2 \\ a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + \dots + a_{3j}x_j + \dots + a_{3n}x_n &= b_3 \\ &\dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots (2) \\ a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{ij}x_j + \dots + a_{in}x_n &= b_i \\ &\dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mj}x_j + \dots + a_{mn}x_n &= b_m, \end{aligned}$$

где a_{ij} , b_i , c_j – заданные постоянные величины, причем $m < n$.

Линейная форма (1) называется функцией цели задачи, причем она может принимать как максимальное, так и минимальное значение. В общей постановке проблемы – задачи линейного программирования применяют для отыскания оптимального решения при ограниченном количестве ресурсов. Таким образом, для математического моделирования энергетических потоков в локальных электрических сетях целесообразно применить методы линейного программирования, в частности методы решения транспортной задачи.

Транспортная задача – это отыскание таких путей перевозки продукта от пунктов производства к пунктам потребления, при которых общая стоимость перевозок оказывается минимальной. Математический аппарат транспортной задачи, может быть применим и к задачам электроэнергетики, в частности, к локальным сетям, содержащие различные источники энергии (ВЭУ, СБ, ДГ и т. д.) [22].

Анализируя результаты предыдущих исследований, можно поставить задачу о возможности моделировании многоуровневой архитектуры локальных сетей на основе анализа энергетических потоков с помощью методов линейного программирования. На рисунке 1 приведена схема многоуровневой сети, состоящей из нескольких локальных сетей, объединенных с помощью накопителей в отдельных локальных электрических сетях (НЭ 1-4) и магистральных накопителей энергии (НЭ-Т), объединяющих энергетические потоки W локальных электрических сетей на более высоком уровне [10].

В свою очередь, энергетические потоки W территориальных сетей с помощью накопителей энергии следующего уровня, можно объединить в сети более высокого уровня интеграции. Накопители энергии здесь играют роль собственно накопителя энергии и роль коммутирующего элемента, трансформатора мощности. В зависимости от величины энергетических потоков в сетях различного уровня, накопители энергии будут отличаться запасенной мощностью, временем разряда и заряда, габаритами и другими параметрами.

ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОПТИМИЗАЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОТОКОВ В МНОГОУРОВНЕВЫХ ЛОКАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

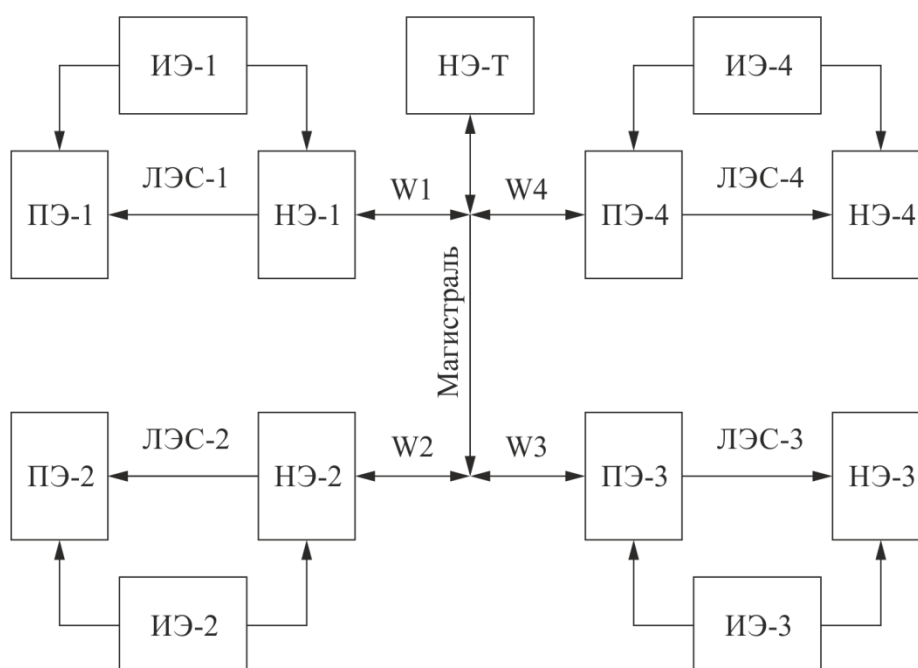


Рисунок 1 – Функциональная схема применения накопителей энергии в сетевых технологиях
 ЛЭС-1, ЛЭС-2, ЛЭС-3, ЛЭС-4 – локальные электрические сети;
 ИЭ-1, ИЭ-2, ИЭ-3, ИЭ-4 – источники энергии;
 ПЭ-1, ПЭ-2, ПЭ-3, ПЭ-4 – потребители энергии;
 НЭ-1, НЭ-2, НЭ-3, НЭ-4 – накопители энергии локальных электрических сетей;
 НЭ-Т – накопитель энергии территориальный;
 W1, W2, W3, W4 – энергетические потоки

Накопители энергии НЭ-1, НЭ-2, НЭ-3, НЭ-4, локальных сетей ЛЭС-1, ЛЭС-2, ЛЭС-3, ЛЭС-4 оптимизируют энергетические потоки на уровне конкретной локальной сети. Присоединение локальных сетей к магистрали с помощью накопителей энергии, позволяет создать сеть более высокого порядка, например территориальную, в которой могут быть оптимизированы энергетические потоки с помощью накопителей энергии НЭ-1, НЭ-2, НЭ-3, НЭ-4 и территориального накопителя энергии НЭ-Т.

Для построения математической модели многоуровневых электрических сетей, возьмем за основу метод энергетических потоков. Поставим задачу оптимизации энергетических потоков не только по оптимальному выбору параметров источников энергии, но и оптимизируем сложную сеть по параметру баланса генерируемой и потребляемой мощности в любой момент времени.

Это позволит реализовать максимально возможный режим энергосбережения в электрической сети, поскольку вся выработанная энергия в сети будет использована электроприемниками, а излишняя энергия будет передана в накопитель энергии или недостаю-

щая электрическая энергия поступит из накопителя энергии соответствующего уровня.

Накопитель энергии в локальной электрической сети позволяет производить оптимизацию баланса генерируемой и потребляемой энергии в многоуровневых сетях, приведенных на рисунке 1. Покажем это на примере простейшей локальной электрической сети первого уровня, причем для сравнения рассмотрим локальную электрическую сеть с накопителем энергии (рисунок 2) и без накопителя энергии (рисунок 3).

Источники электрической энергии обозначены на рисунках 2 и 3 S1-S3, потребитель электрической энергии обозначен D1, накопитель энергии T1. Потоки электрической мощности обозначим, соответственно, x_{ij} , где индекс $i = 1, 2, \dots, n$, – число источников электрической энергии, индекс $j = 1, 2, \dots, m$ – число потребителей электрической энергии.

Накопитель энергии T1 присоединен ко всем источникам энергии и к потребителю электрической энергии D1.

На рисунке 4 приведены условный график мощностей источников электрической энергии S1-S3, (ВЭУ, СБ, ДГ), график нагрузки D1 и график изменения мощности накопителя энергии T1. Поставим вопрос о том, как

должны быть связаны потоки мощности, чтобы в локальной сети выполнялось условие равенства генерируемой и потребляемой энергии. Для решения этой задачи применим

метод решения транспортной задачи к локальной сети с накопителем энергии и без него.

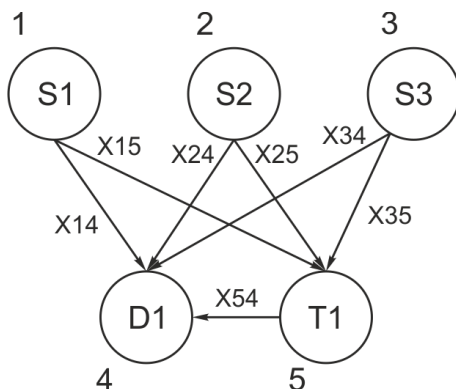


Рисунок 2 – Локальная электрическая сеть 1 уровня с накопителем энергии S1, S2, S3 – источники электрической энергии (ВЭУ, СБ, ДГ); D1 – потребитель энергии; T1 – накопитель энергии; x_{ij} – мгновенные мощности электрической энергии

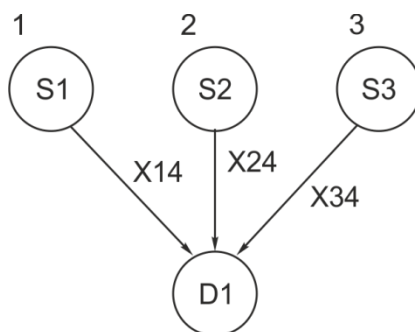


Рисунок 3 – Локальная электрическая сеть без накопителя энергии S1, S2, S3 – источники электрической энергии (ВЭУ, СБ, ДГ); D1 – потребитель энергии; x_{ij} – мгновенные мощности электрической энергии

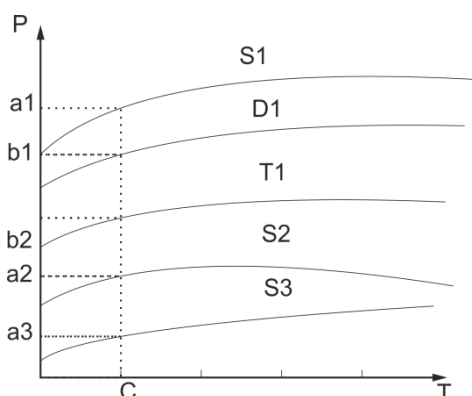


Рисунок 4 – Зависимость мощности источников электрической энергии от времени T S1–S3 – источники электрической энергии (ВЭУ, СБ, ДГ); D1 – потребитель электрической энергии; T1 – накопитель энергии

На рисунке 4 по оси x отложен момент времени C. Отметим на графике для этого момента времени значения мощностей источников электрической энергии; $S1 = a_1$, $S2 = a_2$, $S3 = a_3$, мощность нагрузки $D1 = b_1$, мощность накопителя энергии $T1 = b_2$.

Произведение $C \cdot x_{ij} = W_{ij}$, где W_{ij} – энергия, переданная от i-го узла сети к j-му элементу.

ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОПТИМИЗАЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОТОКОВ В МНОГОУРОВНЕВЫХ ЛОКАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

менту электрической сети. Поскольку C константа и не зависит от номера узла, в дальнейшем, для упрощения вычислений, можно положить $C=1$, что означает выбор единичного интервала времени, например, один час.

С учетом данных предположений, перепишем функцию цели (1) в следующем виде

$$J = x_1 + x_1 + \dots + x_j + \dots + x_n \Rightarrow \min, \quad (9)$$

при ограничениях

$$x_j \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, 7, \quad (10)$$

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} = A_i. \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = B_j. \quad (12)$$

Запишем эти ограничения в виде таблицы 1.

Таблица 1 – Таблица ограничений

| | D1 | T1 | n |
|-------|-----------------|-----------------|----------------|
| S1 | X ₁₁ | X ₁₂ | a ₁ |
| S2 | X ₂₁ | X ₂₂ | a ₂ |
| S3 | X ₃₁ | X ₃₂ | a ₃ |
| S4=T1 | X ₄₁ | X ₄₂ | a ₄ |
| m | b ₁ | b ₂ | |

Запишем систему уравнений и ограничения в соответствии с таблицей 1.

$$\begin{aligned} x_{11} + x_{12} &= a_1 \\ x_{21} + x_{22} &= a_2 \\ x_{31} + x_{32} &= a_3 \\ x_{11} + x_{21} + x_{31} + x_{41} &= b_1 \\ x_{12} + x_{22} + x_{32} + x_{42} &= b_2 \end{aligned} \quad (13)$$

Целевую функцию в виде

$$\sum_{ij}^{n,m} x_{ij} \Rightarrow \min \quad (14)$$

Зададим условные численные значения ограничений (таблица 2):

Таблица 2

| a ₁ | a ₂ | a ₃ | b ₁ | b ₂ |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 3 | 2 | 1 | 4 | 3 |

Для решения задачи (9-14) с численными данными, приведенными в таблице 2, применим прикладную программу линейного программирования. После ввода условий задачи, получим условие минимума целевой функции, равного нулю, при значениях мощностей, приведенных в диалоговом окне программы (рисунок 5).

| SN \ DN | D1 | T1 | Дунны | Поставк. | U(j) |
|--------------|-------|-------|-------|----------|--------|
| S1 | 1.000 | 1.000 | 0 | 3.000 | 0 |
| S2 | 1.000 | 1.000 | 0 | 2.000 | 0 |
| S3 | 1.000 | 1.000 | 0 | 0 | 0 |
| T1 | 1.000 | 0 | 0 | 5.000 | -1.000 |
| Потреб. U(j) | 0 | 5.000 | 5.000 | 0 | |
| | 1.000 | 1.000 | 0 | | |

Minimum Значение U.Ф. = 0 with multiple optimals.

Рисунок 5 – Диалоговое окно программы линейного программирования и значения оптимальных мощностей источников электрической энергии с накопителем энергии

Решим эту задачу для сети без накопителя энергии с условиями, приведенными в таблице 3.

Таблица 3

| a ₁ | a ₂ | a ₃ | b ₁ | b ₂ |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 3 | 2 | 1 | 4 | 0 |

После ввода условий задачи, приведенных в таблице 3, получим условие минимума целевой функции, которое приведено в диалоговом окне программы (рисунок 6).

Как следует из сравнения рисунков 5 и 6, минимум целевой функции, равный нулю, достигается только при работе локальной электрической сети с накопителем энергии. Это означает, что минимизировать целевую функцию без накопителя энергии невозможно.

Статистические данные, полученные для конкретной локальной сети вышеуказанным

методом, можно реализовать в алгоритм управления ее элементами. Это позволит достичь максимальной энергоэффективности в локальной электрической сети с любым количеством источников энергии и потребителей.

Этот метод можно распространить на многоуровневые локальные электрические сети, что предполагается сделать в следующих работах.

| ИЗ \ В | D1 | Факт. | ПОСТАВК. | U(i) |
|--------------|-------|-------|----------|--------|
| S1 | 1.000 | 0 | 3.000 | 0 |
| S2 | 3.000 | 0 | 2.000 | 0 |
| S3 | 1.000 | 0 | 1.000 | -1.000 |
| ПОТРЕБ. U(j) | 4.000 | 2.000 | 0 | 0 |
| | 1.000 | 0 | | |

MIN величина ЦФ = 3 (возм. н-во решений)

Рисунок 6 – Диалоговое окно программы линейного программирования и значения оптимальных мощностей источников электрической мощности без накопителя энергии

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Филиппов, С. П. Малая энергетика в России. Теплоэнергетика, № 8, 2009.
2. Кувшинов, В. В. Некоторые результаты исследования комбинированной установки для фототермопреобразования солнечной энергии / В. В. Кувшинов, В. А. Сафонов // 36. наук.пр. СНУЯЕтаП. – Севастополь: СНУЯЭиП, 2009. – Вып. 3 (31). – С. 158–163.
3. Кирпичникова, И. М. Виброгасители мачт сверхмалых вертикально-осевых ветроэнергетических установок / И. М. Кирпичникова, Е. В. Солонин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2010. – № 14 (190). – С. 78–81.
4. Харченко, В. В. Солнечная электростанция для параллельной работы / В. В. Харченко, В. А. Гусаров, В. А. Майоров, В. А. Панченко // Альтернативная энергетика и экология. – 2013. – № 2. – С. 37–43.
5. Гашо, Е. Г. Пути и проблемы модернизации распределенных энерготехнологических систем регионов / Е. Г. Гашо // Электрика. – 2011. – № 2. – С. 12–17.
5. Чиндяскин, В. И. Разработка компьютерной модели для расчёта эффективной локальной системы электроснабжения сельских поселений / В. И. Чиндяскин, Е. Ф. Киселева // Известия Орен-

- бургского государственного аграрного университета. – 2009. – Т2, № 24-1. – С. 88–92.
7. Четошникова, Л. М. Снижение колебаний энергии в локальных сетях с распределенной энергией / Л. М. Четошникова, Н. И. Смоленцев, С. А. Четошников, А. Н. Смоленцев // Электрика. – 2013. – № 5. – С. 37–39.
8. Алексеев, Б. А. Применение накопителей энергии в энергетике. – Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2005. – № 2.
9. Ковалев Л. К., Конев С. М. А., Полтавец В. Н., Гончаров М. В., Ильясов Р. И. Магнитные подвесы с использованием объемных ВТСП элементов для перспективных систем высокоскоростного наземного транспорта. – Труды МАИ. – 2010. – № 38. – С. 39.
10. Смоленцев, Н. И. Разработка накопителя энергии на основе высокотемпературной сверхпроводимости и перспективы его применения в локальных электрических сетях / Н. И. Смоленцев, Л. М. Четошникова, Ю. Л. Бондарев // Ползуновский вестник. – 2015. – № 1. – С. 73–77.
11. Ковалев, Л. К. Сверхпроводниковые магнитные опоры с объемными ВТСП элементами / Л. К. Ковалев, С. М. Конев, С. А. Ларионов, В. Н. Полтавец // Электричество. – 2003. – № 6.
12. Смоленцев, Н. И. Накопитель энергии на основе высокотемпературных сверхпроводников

ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОПТИМИЗАЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОТОКОВ В МНОГОУРОВНЕВЫХ ЛОКАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

(ВТСП) для альтернативной энергетики / Н. И. Смоленцев, Л. М. Четошникова // Электрика. – 2011. – № 5. – С. 38–41.

13. Смоленцев, Н. И. Локальная электроэнергетическая сеть в технологической платформе SmardGrid / Н. И. Смоленцев, Л. М. Четошникова // Электрика. – 2011. – № 8. – С. 25–28.

14. Четошникова, Л. М. Система управления энергией в локальных электрических полях низкого напряжения / Л. М. Четошникова, Н. И. Смоленцев, С. А. Четошников, Д. В. Дегтярев // Ползуновский вестник. – 2015. – № 1. – С. 103–107.

15. Директор Л. Б., Майков И. Л. Решение задач оптимизации сложных энергетических систем. Управление большими системами. Выпуск 28.2010.

16. Майков И. Л., Директор Л. Б., Зайченко В. М. Решение задач оптимизации энергетических систем с несколькими автономными энергоустановками. Управление большими системами. Выпуск 35. 2011.

17. Воропай, Н. И. Интегрированные интеллектуальные энергетические системы / Н. И. Воропай, В. А. Стенников // Изв. АН. Энергетика. – 2014. – № 1.

18. Кононенко, В. Ю. Возможности использования сетевых накопителей энергии и их эффек-

тивность / В. Ю. Кононенко, Д. О. Смоленцев, О. В. Вещунов // Изв. АН. Энергетика. – 2014. – № 3.

19. Майков И. Л., Директор Л. Б. Решение задач оптимизации и управления гибридными энергетическими комплексами в структуре распределенной генерации. Управление большими системами: сборник трудов. 2011. № 35.

20. Смоленцев, Н. И. Локальная электроэнергетическая сеть в технологической платформе SMARDGRID / Н. И. Смоленцев, Л. М. Четошникова // Электрика. – 2011. – № 8.

21. Ашманов, С. Л. Линейное программирование / С. Л. Ашманов. – М. : Наука, 1981. – 304 с.

22. Четошникова, Л. М. Использование локальных источников в умных сетях с требованиями качества энергии / Л. М. Четошникова // Ползуновский вестник. – 2013. – № 4-2.

Смоленцев Н.И. – к.т.н., доцент, e-mail: smolenzev@rambler.ru, Россия, Челябинская область, г. Миасс, Филиал ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ), 8(3513)63-28-85.

Четошников С.А. – аспирант, e-mail: tchetser@gmail.ru, Россия, г. Челябинск, ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ), 8(3513)63-28-85.