# 3 РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТЕЙ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

# 3.1 Методика оптимизации распределения электрических нагрузок генерирующих мощностей Белорусской энергосистемы

Методика оптимизации распределения электрических нагрузок между ТЭС с выбором составов работающих энергоблоков разработана при использовании публикаций [12-15]. При этом реализуется многопоточный итерационный принцип расчета искомых переменных с применением метода динамического программирования, имеющего преимущества перед другими математическими методами оптимизации по эффективности совместного распределения нагрузок и выбора состава основного оборудования. Эффективность обеспечивается достижением глобального оптимума суммарного расхода топлива в энергосистеме при использовании реальных энергетических характеристик основного оборудования ТЭС без введения каких-либо условностей и упрощений для их приведения к требуемой форме («выпуклость», сглаживание «скачков» и пр.)

Исходными данными для определения оптимальных нагрузок тепловых электростанций и оптимального состава работающего оборудования являются:

* график предполагаемых часовых нагрузок ОЭС в суточном (недельном) интервале N = N(t);
* эквивалентные энергетические характеристики ТЭС Bi = Bi(Ni), участвующих в расчете оптимального распределения для трех составов работающего оборудования - текущий, плюс один энергоблок, минус один энергоблок (указанные составы эквивалентных энергетических характеристик ТЭС формируют множество составов оборудования для выбора оптимального состава работающих энергоблоков);



* пусковые характеристики Bпi = Bпi(tпр), отражающие зависимость суммарных пусковых затрат (расход топлива, износ оборудования и т.д.) от времени простоя (tпр=tвк - tот);



* состав агрегатов, работающих в начале рассматриваемого интервала, и предыстория состояния (моменты отключения остановленных агрегатов);
* данные по потерям в сетях для каждого энергоисточника;
* заданная величина «вращающегося» резерва R.



На первом этапе расчетов определяется оптимальный состав работающих энергоблоков без учета потерь топлива. Для каждого из заданных значений нагрузки N энергосистемы определяются значения нагрузок N1, N2, …, Nn отдельных станций (n – число эквивалентных энергетических характеристик станций, участвующих в оптимизации , при с использованием которых минимизируется функция суммарного расхода топлива по энергосистеме BэС).



Целевая функция оптимизации записывается в виде:

BэС = B1(N1) + B2(N2) + … + Bn(Nn) → min  (3.1)



и решается при соблюдении следующих условий:

* соблюдение баланса активной мощности:

N1 + N2 + … + Nn + R - ∑ πi = N , (3.2)



где R – величина вращающегося резерва;



πi – потери электрической энергии, при ее передачи от i-ой ТЭС потребителям энергосистемы (учитывается в виде функции электрической мощности ТЭС πi = f(Ni)).



* соблюдение ограничений по условиям работы энергетического оборудования i-ых ТЭС:

Ni min ≤ Ni ≤ Ni max или Ni=0. (3.3)



Задача поиска оптимальных нагрузок ТЭС сводится к следующему.

Рассматриваются L вариантов состава основного работающего оборудования в энергосистеме. Каждый вариант состава работающего оборудования (l = 1,2,3, … , m) формируется из различных комбинаций энергетических характеристик (текущий, плюс один энергоблок, минус один энергоблок) участвующих в распределении нагрузок электростанций.



Лучший вариант состава работающих энергоблоков определяется путем поочередной оптимизации распределения нагрузок между i-ми ТЭС при каждой из L-ых вариантов.

Оптимальный вариант выбирается по минимальной величине суммарного расхода топлива B∑ L(N). В этом случае целевая функция при методе динамического программирования записывается в виде:

B∑ L(N) = { bL(Ni) + B∑L - 1(N –Ni )} → min. (3.4)

Минимум находится для каждой заданной суммарной мощности N среди значений Ni, удовлетворяющих условиям расчета, что позволяет определить моменты наивыгоднейшего включения и отключения агрегатов, как концы временных интервалов, в которых Ni(t) = 0, а распределение нагрузок между электростанциями в каждый момент времени исследуемого периода является оптимальным.

Следующим этапом оптимизации является определение моментов включения и отключения агрегатов с учетом пусковых расходов. Для ускорения сходимости итерационного процесса агрегаты сортируются в порядке возрастания их номинальной мощности.

Рассмотрим первый по времени интервал простоя n-го агрегата (tот1, t вк1), определенный по приведенной выше методике. Введем уточнение в его границы. Если сократить время отключения агрегата на Δtот (отключить позже, новое время отключения – τот1 = tот1 + Δtот ) и включения на Δtвк (включить раньше, новое время включения – τвк1 = tвк1 + Δtвк ), то при этом несколько сократится величина пусковых расходов топлива (рисунок 3.1). На рисунке сплошной линией показан график оптимальной нагрузки без учета пусковых расходов, пунктиром – тот же график, но с учетом пусковых расходов.

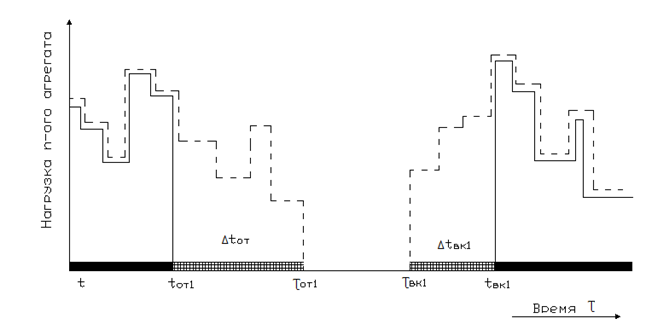


Рисунок 3.1 - Уточнение границ интервала простоя n-го агрегата

Однако, в связи с нарушением оптимальности состава агрегатов расход топлива на выработку электроэнергии в энергосистеме увеличится на [(ΔB(Δt))вк + (ΔB(Δt))от)] (величина ΔB определяется как разница двух расходов топлива в рассматриваемом интервале для случаев: n-ый агрегат в работе и агрегат отключен).



Оптимальными будут такие границы простоя, при которых будет максимальной экономия общего расхода топлива:

ΔBП = BП(tвк – tот) – BП[(tвк – Δtвк) – (tот – Δtот)] – [(ΔB(Δt)от) – (ΔB(Δt)вк). (3.5)

Нахождение максимума величины ΔBП равносильно определению минимума выражения:



ΔB`П = BП [(tвк - Δtвк) – (tот + Δtот)] + [(ΔB(Δt)от) + (ΔB(Δt)вк) . (3.6)

Для нахождения величин Δtвк и Δtот , при которых функция имеет минимум, целесообразно также использовать метод динамического программирования. Величина BП [(tвк - Δtвк) – (tот + Δtот)] зависит только от общей величины сокращения интервала простоя Δt = Δtвк + Δtот, но не зависит от его распределения между Δtвк и Δtот . При фиксированном Δt нахождение минимума функции ΔB`П равносильно определению минимума функции одной переменной Δtот :



ΔB``П = [ΔB(Δt)от + ΔB(Δt)вк ] = [ΔB(Δt)от + ΔB(Δt - Δt )от ] . (3.7)

Для каждого допустимого значения Δt определяется величина Δt от , при которой функция ΔB``П имеет минимум, а из всех значений Δt выбирается то, которое дает наибольшую экономию топлива.



Пусковые расходы пропорциональны времени простоя, и могут быть представлены в виде:

BП n = f(tвк – tот). (3.8)



С учетом этого выражение (3.6) можно записать в виде:

ΔB`П = [f(tвк – tот) – (f(Δt) от)] – [(f(Δt) вк) + ΔB(Δt)от + ΔB(Δt)вк ] . (3.9)

Определение минимума этой функции равносильно нахождению минимума каждой из функций: [ΔB(Δt)от - (f(Δt) от)] и [ΔB(Δt)вк - (f(Δt) вк)].



Если агрегат пускается из холодного состояния , то уточненные моменты изменения состава оборудования совпадают с моментами пуска/останова, не учитывающими пусковых расходов топлива. В этом случае (при малых изменениях момента включения) пусковые расходы не изменяются, но появляется дополнительный перерасход топлива из-за нарушения оптимальности состава работающего оборудования. Поэтому принимается Δtвк – Δtот = 0.



На последнем этапе распределения электрических нагрузок и выбора состава основного работающего оборудования в энергосистеме производится оценка влияния последующего режима нагрузки энергосистемы. Найденные значения Δtвк и Δtот – уточняют время первого простоя n- го агрегата. Тогда точками наиболее выгодного первого отключения и последующего включения n- го агрегата будут τвк1 = tвк1 – Δtвк1 и τот1 = tот1 + Δtот1 . Аналогично уточняются и границы остальных интервалов простоя n- го агрегата. Эти моменты включения и отключения n-го агрегата все еще не являются окончательными. В нулевом приближении интервалы работы агрегата определены без учета пусковых расходов. Поэтому далее проверятся выгодность работы агрегата с учетом пусковых расходов в каждом из этих интервалов, начиная с первого.



Рассмотрим j-ый интервал работы (tвк j, tот j+1) n-го агрегата (рисунок 3.2).

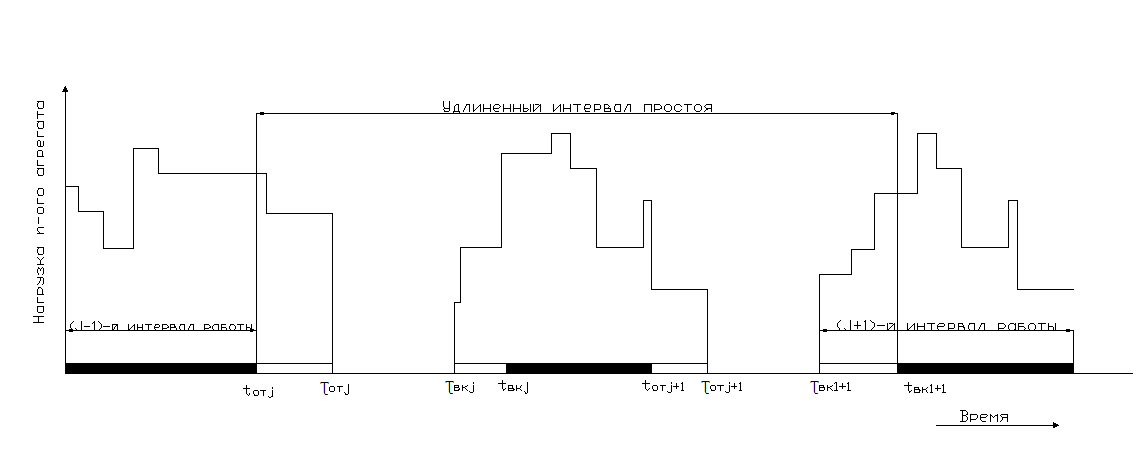


Рисунок 3.2 - Проверка целесообразности запрета работы n-го агрегата на j-м рабочем интервале

Для определения целесообразности работы указанного агрегата выполняется две проверки:

* выгодно ли включать n-ый агрегат в интервале (tвк j, tот j+1), оставляя в этом интервале остальной состав неизменным;
* выгодно ли заменить n-ый агрегат в интервале (tвк j, tот j+1), каким-нибудь другим агрегатом.

Первая проверка производится исходя из запрета работы n-го агрегата на j-ом интервале (tвк j, tот j+1) . При этом остальной состав агрегатов принимается неизменным и используется приведенный выше алгоритм расчета оптимального распределения нагрузки между электростанциями при фиксированном составе работающих агрегатов.



Вследствие указанных действий сократится число пусков агрегата, но увеличится расход топлива на последующий пуск в момент tвк j+1. Запрет на пуск агрегата приведет к изменению расхода топлива в энергосистеме на величину ΔB (tвк j, tот j+1). Расход топлива при двух пусках в интервале (tвк j, tот j+1) равен:



BП (tот j, tвк j) + BП (tот j+1, tвк j+1), (3.10)

а при одном пуске:

BП (tот j, tвк j+1) . (3.11)



Работа n-го агрегата в j-ом интервале выгодна при выполнении условия:

BП (tот j, tвк j+1) - BП (tот j, tвк j) + BП (tот j+1, tвк j+1) – BП (tвк j, tот j+1) > 0. (3.12)



При этом, проверку имеет смысл проводить лишь в том случае, когда интервал (tот j, tвк j+1) больше времени полного остывания агрегата. В противном случае расход топлива на два пуска блока будет больше чем расход на один пуск в конце удлинённого интервала, при этом условие (3.12) не выполняется.



При второй проверке рассматривается выгодность замены n-го агрегата на интервале его работы каким-либо другим агрегатом (рисунок 3.3). С этой целью для каждого часа рассматриваемого интервала времени находится оптимальный( без учета пусковых расходов) состав агрегатов и наивыгоднейшее распределение нагрузок между электростанциями, при условии запрета работы n-го и обязательной работы агрегатов, которые вместе с ним работали при найденном ранее составе. Причем включаются агрегаты, которые ранее в этом интервале не работали.

Затем, с учетом изменения пусковых расходов, сравниваются расходы топлива при новом составе оборудования, в том числе при составе, соответствующем работе n- го агрегата в рассматриваемом интервале.

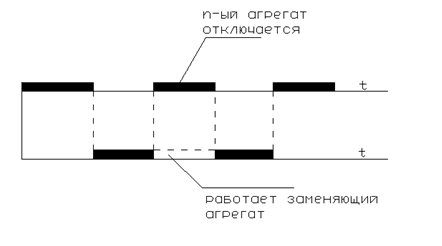


Рисунок 3.3 - Проверка целесообразности замены n-го агрегата на j-м рабочем интервале

Если новый состав агрегатов оказывается невыгодным и включился только один агрегат, который в рассматриваемые часы не работал, то на это накладывается запрет и описанная проверка повторяется.

Если при новом составе включаются несколько агрегатов, ранее не работавших, запрет накладывается на работу того из них, включение которого оказалось наименее выгодным по пусковым расходам.

Когда при новом составе агрегатов расход топлива будет меньше, чем при работающем n-м агрегате, производится замена n-го агрегата на введенный в работу агрегат ему на замену. Проверка указанного интервала заканчивается.

В том случае, если в результате обоих проверок оказалось выгодным запретить работу n-го агрегата в j-ом интервале, следует уточнить границы нового удлиненного интервала простоя (tот j, tвк j+1) и повторно рассмотреть целесообразность запрета работы n-го агрегата в предыдущем (j-1)-ом рабочем интервале.



Моменты включения и отключения n-го агрегата, полученные в результате проверок всех интервалов его работы, считаются окончательным результатом первой итерации для этого агрегата.

Для определения моментов включения и отключения (n-1)-го агрегата фиксируется найденный выше состав всех агрегатов, кроме (n-1)-го, находится оптимальное распределение нагрузки между электростанциями для всего рассматриваемого периода времени. При этом определяются также моменты включения и отключения (n-1)-го агрегата. Далее, производится уточнение интервалов его работы и простоя. По аналоги с первой итерацией определяются моменты включения и отключения остальных агрегатов. Вторая и последующие итерации начинаются с определения моментов включения и отключения n-го агрегата (при фиксированном составе остальных), определенном в конце предыдущей итерации. В остальном, они не отличаются от первой итерации.

В конце каждой итерации определяется суммарный расход топлива в энергосистеме с учетом пусковых расходов топлива. Итерационный процесс прекращается на той стадии, когда расход топлива мало отличается от определенного на предыдущей итерации.

Из всего вышеизложенного следует, что каждый шаг в рассматриваемом итерационном процессе приводит к нахождению такого состава агрегатов, при котором суммарный расход топлива в энергосистеме меньше, чем при составе, найденном в предыдущей итерации. Поэтому расходы топлива при составах агрегатов, найденных в каждой итерации, составляют убывающий ряд чисел, ограниченный снизу. Такой ряд является сходящимся. Соответственно, сходится итерационный процесс.

# 3.2 Алгоритм оптимизации распределения электрических нагрузок генерирующих мощностей Белорусской энергосистемы

Исходными данными для оптимизации распределения электрических нагрузок генерирующих мощностей белорусской энергосистемы является суточный график потребления. График формируется ПТО РУП «ОДУ» для энергосистемы в целом, т.к. данная задача охватывает шесть ТЭС необходимо выделить из графика суточного потребления суммарную нагрузку указанных выше станций. В первом пункте алгоритма производится подготовка заданного суточного графика для задачи оптимизации.

Таблица 3.1 - Исходная информация, используемая в алгоритме

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| №  пар-ра | Наименование параметра | Обозна-  чение | Размер-  ность |
| 1 | 2 | 3 | 4 |
|  | Вращающийся, холодный резерв | *,* | МВт |
|  | Величина расхода топлива, определяющая сходимость расчета |  | т у.т./ч |
|  | Сумма прогнозируемых электрической мощности потребителей, собственных нужд ТЭС и потерь электроэнергии в сетях в энергосистемы |  | МВт |
|  | Суммарная электрическая мощность перетоков электроэнергии между энергосистемами Белоруссии, Украины, России и Литвы |  | МВт |
|  | Сумма электрических мощностей «брутто» малых ТЭС, блок станций и их потерь электроэнергии в сетях |  | МВт |
|  | Сумма электрических мощностей ТЭС«брутто», не участвующих в оптимизации, и потерь электроэнергии в сетях |  | МВт |
|  | Коэффициент, определяющий суммарные потери в сетях для основных ТЭС, (участвующих в распределении нагрузок) |  | отн.ед. |
|  | Коэффициент, определяющий суммарные собственные нужды основных ТЭС |  | отн.ед |
|  | Длительность простоев энергоблоков | tпр | ч |
|  | Граничные (минимальные и максимальные нагрузки ТЭС | Nminтэс, Nmaxтэс | МВт |

Таблица 3.2 - Список графических зависимостей, используемых в расчетах

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| №  пар-ра | Наименование параметра | Обозна-  чение | Размер-  ность |
|  | График потребления электроэнергии в энергосистеме |  | МВт |
|  | Эквивалентные энергетические характеристики тепловых электрических станций |  | т у.т./ч |
|  | Пусковые характеристики энергоблоков ТЭС, участвующих в распределении нагрузок |  | т у.т./ч |
|  | Потери электроэнергии в сетях |  | МВт |

Таблица 3.3 – Алгоритм оптимизации распределения электрических нагрузок генерирующих мощностей белорусскойэнергосистемы

| №  п/п | Наименование показателя | Обознач. | Размерность | Формула вычисления |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|  | **Этап 1. Определение заданной суммарной электрической мощности основных ТЭС «нетто»** | | | |
|  | Сумма электрической мощности основных ТЭС, их собственных нужд и потерь электроэнергии в сетях |  | МВт |  |
|  | Потери электроэнергии в сетях для основных ТЭС, в первом приближении |  | МВт |  |
|  | Мощность собственных нужд основных ТЭС, принимаемая в первом приближении |  | МВт |  |
|  | Заданная электрическая мощность основных ТЭС, «нетто» |  | МВт |  |
|  | **Этап 2. Определение оптимального состава работающих агрегатов без учета пусковых потерь топлива** | | | |
|  | Цикл по часам в графике потребления нагрузок –число часов в заданном графике работы ТЭС ОЭС | | | |
|  | Нахождение оптимального состава работающего оборудования, и распределения нагрузки между ними при заданной мощности | | | |
|  | Нагрузка, которую необходимо распределить |  | МВт |  |
|  | Число шагов f –число агрегатов, участвующих в распределении нагрузки и выбора состава оборудования | | | |
|  | Нагрузка, которую необходимо установить агрегату |  | МВт |  |
|  | Общее потребление топлива |  | т у.т./ч |  |
|  | Нагрузка, оставшаяся для распределения на i-м шаге |  | МВт |  |
|  | Основное функциональное уравнение |  |  |  |
|  | **Этап 3. Определение моментов включения и отключения агрегатов с учетом пусковых расходов** | | | |
|  | Цикл по агрегатам, участвующим в распределении нагрузки и выбора состава оборудования, (i = 1,2,3,…, f), f –число агрегатов | | | |
|  | Нахождение моментов включения и отключения i-го агрегата | | | |
|  | Число интервалов простоя i-го агрегата | k |  | k =1 |
|  | Цикл по часам в графике потребления нагрузок –число часов в графике потребления энергосистемой | | | |
|  | Мощность i-го агрегата в момент времени |  | МВт |  |
|  | Время отключения i-го агрегата в k-ом интервале |  | ч | Если и |
|  | Время включения i-го агрегата в k-ом интервале |  | ч | Если и |
|  | Увеличение числа интервалов простоя i-го агрегата | k |  | Если и  k = k+1 |
|  | Определение оптимальных моментов включения и отключения i-го агрегата | | | |
|  | Цикл по интервалам простоя агрегата в рамках рассматриваемого графика потребления (k = 1,2,3,…, s),  где s –число интервалов простоя i-го агрегата | | | |
|  | Уточненное время отключения i-го агрегата в k-ом интервале |  | ч |  |
|  | Уточненное время включения i-го агрегата в k-ом интервале |  | ч |  |
|  | Исходный интервал простоя i-го агрегата в k-ом интервале |  | ч |  |
|  | Цикл по длительности измененного интервала простоя i-го агрегата, } | | | |
|  | Цикл по длительности измененного интервала отключения i-го агрегата, } | | | |
|  | Экономия расхода топлива из-за изменения интервала простоя i-го агрегата на и времени отключения на |  | т у.т./ч |  |
|  | Экономия расхода топлива из-за изменения интервала простоя i-го агрегата |  | т у.т./ч | Если |
|  | Этап 4. Оценка влияния последующей нагрузки энергосистемы | | | |
|  | Суммарный расход условного топлива в энергосистеме |  | т у.т./ч |  |
|  | Цикл по агрегатам, участвующим в распределении нагрузки и выбора состава оборудования –число агрегатов | | | |
|  | Цикл по удлиненным интервалам работы агрегата k в рамках рассматриваемого графика потребления , (k = 1,2,3,…, s),  где s –число интервалов работы i-го агрегата | | | |
|  | *Проверка целесообразности отключения i-го агрегата в интервале k, при неизменном остальном составе работающих энергоблоков* | | | |
|  | Цикл по часам в графике потребления нагрузок, в рамках интервала, ( | | | |
|  | Мощность, необходимая для распределения между электростанциями |  | МВт |  |
|  | Нагрузка, которую необходимо распределить |  | МВт |  |
|  | Число шагов - число агрегатов, участвующие в распределении нагрузки (проверка производится при неизменном составе работающих агрегатов, i-й агрегат отключается) | | | |
|  | Нагрузка, которую необходимо установить энергоблоку |  | МВт |  |
|  | Общее потребление топлива |  | т у.т./ч |  |
|  | Нагрузка, оставшаяся для распределения на i-м шаге |  | МВт |  |
|  | Основное функциональное уравнение |  |  |  |
|  | *Проверка целесообразности замены i-го агрегата в интервале k* | | | |
|  | Мощность, необходимая для распределения между электростанциями |  | МВт |  |
|  | Нагрузка, которую необходимо распределить |  | МВт |  |
|  | Число шагов, все агрегаты участвуют в распределении нагрузки за исключением проверяемого i-го агрегата | | | |
|  | Нагрузка, которую необходимо установить энергоблоку |  | МВт |  |
|  | Общее потребление топлива |  | т у.т./ч |  |
|  | Нагрузка, оставшаяся для распределения на i-м шаге |  | МВт |  |
|  | Основное функциональное уравнение |  |  |  |
|  | Оценка результатов, проведенных проверок |  |  | Если , переходим к проверке следующего интервала  Если , накладывается запрет на работу включившегося агрегата и повторяется вторая проверка (п. 44)  Если и , то  По алгоритму этапа 2 выполняется уточнение нового удлиненного интервала простоя, проверка целесообразности включения i-го агрегата в интервале k-1 |
|  | **Конец цикла по интервалам работы агрегата** | | | |
|  | Суммарный расход условного топлива в энергосистеме, полученный в результате последней итерации |  | т у.т./ч |  |
|  | Признак завершения итерационного процесса выбора оптимального состава оборудования и оптимального распределения нагрузок |  |  | Если  то i = i+1, переход к пункту 33  Если  Окончание оптимизационных расчетов |
|  | Уточненные потери электроэнергии в сетях |  | МВт |  |
|  | Уточненная электрическая мощность собственных нужд ТЭС |  | МВт |  |
|  | Уточненная планируемая электрическая мощность ТЭС, участвующих в распределении нагрузок, «нетто» |  | МВт |  |
|  | Повторение расчетов начиная с этапа 2 с уточненной планируемой электрической мощности ТЭС | | | |

Ниже, на рисунке 3.4 приведена блок-схема алгоритма, на которой показана взаимосвязь циклов итерационного расчета.









Рисунок 3.4 - Блок-схема алгоритма совместной оптимизации распределения электрических нагрузок и выбора состава работающего оборудования основных ТЭС

Данная блок-схема изображена на плакате 3.