

СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗОК В ЭНЕГОСИСТЕМАХ

Куров Б. Н.¹

*(Учреждение Российской академии наук
Институт проблем информатики РАН, Москва)*

Предложен метод сравнения эффективности алгоритмов распределения нагрузок в энергосистемах с учётом условий реализации решений. Метод позволяет выбрать алгоритм, наиболее эффективный в заданных условиях реализации решений.

Ключевые слова: распределение нагрузок в энергосистемах, сравнение эффективности алгоритмов, s-моделирование.

1. Введение

При разработке различных алгоритмов решения оптимизационных задач управления в энергетических системах (ЭС) возникает необходимость оценки их сравнительной эффективности. Исследование сравнительной эффективности алгоритмов решения задач оптимального управления позволяет не только изменять их оценку, но и находить новые подходы к их разработке [5, 8].

Алгоритмы могут соответствовать разным s-моделям [6, 7], определяемым выбранным критерием оптимальности и степенью идеализации объектов управления. Рассматриваемая здесь задача состоит в том, чтобы из сравниваемых алгоритмов распределения нагрузок выбрать такой, который бы в условиях

¹ Борис Николаевич Куров, кандидат технических наук, доцент
(bnkrov@ipiran.ru).

конкретной ЭС обеспечивал оптимальное значение критерия эффективности на рассматриваемом отрезке времени. Критерием сравнительной эффективности будем считать затраты на суммарный расход топлива в ЭС.

Алгоритмы распределения нагрузок предполагают наличие прогнозируемых данных о суммарной нагрузке ЭС. Точность ее прогноза зависит от характера изменения потребления и потерь в электрической сети, а также от совершенства алгоритма прогнозирования. Всё это определяет величину отклонения истинной нагрузки от прогнозируемой, а потому и реализуемость расчетного вектора распределения нагрузок.

При реализации расчётных значений нагрузок на станциях они округляются, затем претерпевают изменения, определяемые точностью ведения режима диспетчерами. Точность ведения режима зависит от интерпретации диспетчерами получаемых сообщений. Поэтому векторы распределения, полученные по сравниваемым алгоритмам, являются лишь начальными приближениями по отношению к тем векторам, которые реализуются в ЭС.

Следовательно, результат сравнения алгоритмов зависит от точности прогноза суммарной нагрузки, от действий диспетчера ЭС, дежурных инженеров станций и, наконец, автоматических регуляторов, обеспечивающих условие баланса в системе.

Выбор в качестве критерия затрат на суммарный расход топлива предполагает, что для каждой электростанции известны затраты на производство электроэнергии как функции нагрузок. Эти функции формируются путём обработки результатов натурных испытаний для дискретных значений нагрузок разными методами. Поскольку истинные характеристики при реализации вектора распределения точно неизвестны (а они-то и определяют расход топлива в ЭС), при сравнении алгоритмов должна учитываться их неопределенность.

Нормализация отношений производителей и потребителей электроэнергии (в соответствии с НЭк-моделью [9]) предполагает применение наиболее эффективных алгоритмов распределения нагрузок в энергосистемах.

2. Постановка задачи

Рассмотрим различные алгоритмы решения задачи оптимального распределения нагрузок между электростанциями ЭС. Чтобы упростить описание метода сравнения конкурирующих алгоритмов, будем рассматривать алгоритмы распределения нагрузок для самого простого случая: энергосистема содержит только тепловые электростанции, не будем учитывать изменений нагрузок в течение рассматриваемого промежутка времени и будем считать, что при изменении распределения нагрузок между станциями потери мощности в системе не меняются. Затраты на производство электроэнергии каждой электростанцией считаем функцией нагрузки (хотя в реальности они зависят и от технического состояния турбин, конденсаторов, циркуляционной воды и т.п.). Усложнение конкурирующих алгоритмов, связанное с учётом перечисленных факторов, не изменяет метода их сравнения.

Итак, рассматриваемая ЭС включает n электростанций, экономичность работы которых определяется расходными характеристиками - функциями затрат на топливо $y_j(x_j)$, где x_j - нагрузка j -ой станции. Известны нагрузка $x|c|$ энергосистемы и потери в электрической сети Δx . Задача оптимального распределения нагрузок между электростанциями заключается в минимизации затрат на топливо²

$$(1) y = \sum_j, j=1...n | y_j(x_j) \rightarrow \min$$

при условии выполнения баланса мощностей ЭС:

$$(2) \sum_j | x_j | - x|c| - \Delta x = 0.$$

Для решения сформулированной задачи отыскания условного экстремума используется метод множителей Лагранжа [2].

Приравниваются нулю частные производные функции Лагранжа $F = \sum_j | y_j(x_j) + \lambda * (\sum_j | x_j | - x|c| - \Delta x)$:

$$(3) \partial F / \partial x_j = 0 \quad (j=1...n); \quad \partial F / \partial \lambda = 0.$$

Вычисляя частные производные, получаем систему из $(n+1)$ -го линейного уравнения относительно переменных x_j и λ :

² S-модели описываются средствами TSM-комплекса [7].

$$(4) dy_j/dx_j + \lambda = 0, \sum_j |x_j| - x|c| - \Delta x = 0.$$

Из решения этой системы следует, что оптимальный режим распределения нагрузки между станциями соответствует равенству относительных приростов расходов топлива на выработку электроэнергии на всех станциях энергосистемы (множитель Лагранжа, взятый со знаком минус, - это относительный прирост расхода топлива ЭС).

Применение метода неопределённых множителей Лагранжа требует дифференцируемости функций $y_j(x_j)$. Но на практике значения функций $y_j(x_j)$, формируются в результате натурных испытаний для набора значений x_j , т.е. $y_j(x_j)$ — табличные функции. Поэтому в алгоритмах оптимального распределения должно предусматриваться преобразование табличных функций в функции, имеющие производные в каждой точке.

Сравниваемые алгоритмы используют различные способы преобразования табличных функций. В первом из них (алгоритме А[1]) строятся кубические сплайны [1].

Пусть заданы точки $(x|0|, y|0|)$, $(x|1|, y|1|)$, ..., $(x|N|, y|N|)$ произвольной расходной характеристики. Требуется построить кубический сплайн $S(f, x)$, т. е. функцию, являющуюся многочленом третьей степени на каждом из отрезков $[x|i-1|, x|i|]$:

$$(1) S(f, x) = f|i|(x) = a|i0| + a|i1|*x + a|i2|*x^2 + a|i3|*x^3$$

при $x|i-1| \leq x \leq x|i|$, $i=1...N$, и удовлетворяющую следующим условиям:

$$(2) f|i|(x|i|) = y|i|, f|1|(x|0|) = y|0|,$$

$$(3) f|k|; j|(x|j|) = f|k|; j+1|(x|j|), k = 1, 2; j = 1...(N-1),$$

где k – порядок производной.

Соотношения (2) обеспечивают прохождение сплайна через заданные точки, а соотношения (3) — непрерывность производных первого и второго порядка, т. е. гладкость кубического сплайна. Отметим важное свойство кубического сплайна для решения практических задач интерполяции — свойство минимальной кривизны [1], которое означает то, что сплайн $S(f, x)$ является наиболее гладкой функцией из рассматриваемого класса.

Для построения $S(f, x)$ требуется найти коэффициенты $a|i0|$, $a|i1|$, $a|i2|$ и $a|i3|$. Поскольку функция $f|i|$; $i|$ линейна на отрезке

$[x|i-1|, x|i|]$ то, дважды интегрируя ее и учтя условия (2), получаем выражение для $S(f, x)$ на этом отрезке.

Продифференцировав $S(f, x)$ и приняв во внимание условие (3) для $k=1$, образуем уравнения относительно вторых производных сплайна:

$$(4) \quad h|i|/6*z|i-1| + (h|i| + h|i+1|)/3*z|i| + h|i+1|/6*z|i+1| = (y|i+1| - y|i|)/h|i+1| - (y|i+1| - y|i|)/h|i|,$$

где $h|i|=x|i| - x|i-1|$, а через z с индексами обозначены вторые производные от сплайна в заданных точках.

Для того чтобы система была разрешима, нужно задать краевые условия, т. е. значения первых или вторых производных в точках $x|0|$ и $x|N|$.

Пусть, например, $z|0|=z|N|=0$. Тогда после подстановки $z|0|=0$ и $z|N|=0$ в первое и последнее уравнения (4) получим систему из $(N-1)$ уравнения с $(N-1)$ неизвестным.

Известно [3], что разрешимость такой системы будет обеспечена, если главная диагональ матрицы коэффициентов при неизвестных является доминирующей. Нетрудно видеть, что все коэффициенты на главной диагонали равны двум, а остальные — менее единицы или равны ей, т. е. условие доминирования главной диагонали выполнено. Эта система решается методом прогонки [4]. Алгоритм укладывается в $O(N)$ арифметических операций, что свидетельствует о его высокой эффективности. Имея вторые производные, легко найти коэффициенты $a|i0|$, $a|i1|$, $a|i2|$ и $a|i3|$ сплайна.

Таким образом завершается решение задачи построения кубического сплайна $S(f, x)$. Далее применяется метод неопределённых множителей Лагранжа.

Построенный сплайн $S(f, x)$ не всегда является наилучшим. Дело в том, что при интерполяции таким сплайном возникают посторонние точки перегиба, что требует алгоритмического контроля монотонности функции. Такого недостатка лишён кубический сплайн «с растяжением» [10], который применяется в конкурирующем алгоритме $A|2|$. Для кубического сплайна «с растяжением» вместо линейности вторых производных потребуем линейность разности $f'';i|(x) - \alpha*f|i|(x)$ на $[x|i-1|, x|i|]$:

(5) $f''_{i|}(x) - \alpha f_{i|}(x) = (z_{|i-1|} - \alpha y_{|i-1|})(x_{|i-1|} - x)/h_{|i|} + (z_{|i|} - \alpha y_{|i|})(x - x_{|i-1|})/h_{|i|}$, $\alpha > 0$,
сохранив условия (2) и (3).

Решением дифференциального уравнения (5) является функция $f(x)$:

(6) $f_{i|}(x) = z_{|i-1|}/\alpha \cdot \text{sh}(\alpha^{1/2}(x_{|i|} - x))/\text{sh}(\alpha^{1/2}h_{|i|}) + (y_{|i-1|} - z_{|i-1|})/\alpha \cdot (x_{|i|} - x)/h_{|i|} + z_{|i|}/\alpha \cdot \text{sh}(\alpha^{1/2}(x - x_{|i-1|}))/\text{sh}(\alpha^{1/2}h_{|i|}) + (y_{|i|} - z_{|i|})/\alpha \cdot (x_{|i|} - x_{|i-1|})/h_{|i|}$.

Продифференцировав это выражение и приняв во внимание непрерывность первых производных, образуем систему из (N-1) линейного уравнения.

Для ее разрешимости зададим краевые условия $f'_{i|}(x|0|) = y'_{i|}(0|)$, $f'_{i|}(x|N|) = y'_{i|}(N|)$. Снова дифференцируя (6) при $i=1, N$, получаем два дополнительных уравнения, которые вместе с предыдущими (N-1) образуют систему из (N+1) линейного уравнения с неизвестными $z|0|, z|1|, \dots, z|N|$. Нетрудно видеть, что матрица этой системы является также трёхдиагональной, а главная диагональ — доминирующей. Решая эту систему методом прогонки, получаем требующийся кубический сплайн «с растяжением». Он будет близок к кусочно-линейной функции при $\alpha < 0,001$ и к обычному кубическому интерполяционному сплайну (1) при $\alpha > 50$.

В качестве третьего конкурирующего алгоритма (A|3|), рассмотрим алгоритм, для которого исходными данными являются предварительно построенные характеристики относительных приростов электростанций. При их построении для вычисления производных от таблично заданных расходных характеристик применяется метод численного дифференцирования. Используется трёхточечная формула для равномерной сетки: $y'_{i|} = (y_{|i+2|} - y_{|i|})/2\Delta x$, где $y_{|i|}, y_{|i+1|}, y_{|i+2|}$ — три последовательных значений функции, а Δx — шаг дискретизации. Полученной табличной зависимости производных ставим в соответствие интерполирующую кусочно-линейную функцию. При известных функциях относительных приростов и заданной суммарной генерации $x|c| + \Delta x$ находим оптимальные нагрузки электростанций, соответствующие условию равенства относительных приростов.

Задача состоит в оценке эффективности алгоритмов $A|1|$, $A|2|$ и $A|3|$ с учетом изменения состояния объекта при реализации решений.

3. Сравнение решений без учета изменения состояния объекта

Решения, получаемые по конкурирующим алгоритмам, должны сравниваться посредством единого критерия оптимальности, соответствующего исходным расходным характеристикам. Для этих характеристик выполнена процедура интерполирования кусочно-линейными функциями $y|0;j|(x|j|)$. Сравним решения, полученные по двум конкурирующим алгоритмам, например, $A|1|$ и $A|2|$. Схема сравнения без учёта изменения состояния объекта (детерминированное сравнение) такова.

Вначале определяются оптимальные векторы нагрузок $x(A|1|) = x|1,j|$, $j = 1...n|$ и $x(A|2|) = x|2,j|$, $j = 1...n|$ для алгоритмов $A|1|$ и $A|2|$. Затем вычисляется разность расходов топлива, соответствующая векторам $x(A|1|)$ и $x(A|2|)$:

$$y(A|1|, A|2|) = \sum_{j=1...n|} (y|0;1j|(x|1j|) - y|0;2j|(x|2j|)).$$

Полученное значение $y(A|1|, A|2|)$ определяет сравнительную эффективность решений алгоритмов $A|1|$ и $A|2|$. Если $y(A|1|, A|2|) > 0$, то следует предпочесть решение, полученное по алгоритму $A|2|$, если же $y(A|1|, A|2|) < 0$ — по алгоритму $A|1|$. Аналогично проводится сравнение и для других пар алгоритмов.

4. Сравнение решений с учетом изменения состояния объекта

Случайным изменениям подвергаются исходные данные алгоритмов распределения нагрузок: характеристики электростанций и суммарная нагрузка системы. Ошибки вносятся и в вычисленные оптимальные значения нагрузок.

При оценке сравнительной эффективности алгоритмов (с учетом изменения состояния объекта при реализации

решений) схема сравнения должна включать блоки имитации "истинного" значения суммарной нагрузки, случайных изменений компонент векторов $x(A|1|)$ и $x(A|2|)$, имитации поведения объекта при достижении баланса генерации и потребления, а также имитации "истинных" характеристик электростанций.

5. Учет случайного характера нагрузки системы

При работе сравниваемых алгоритмов векторы распределения нагрузок вычислены для прогнозируемого значения суммарной нагрузки системы $x|c|$ с учётом постоянных потерь Δx . При реализации их в системе истинное значение $x|c|$ обычно отличается от расчётного. В предлагаемой схеме сравнения ошибка прогноза суммарной нагрузки является случайной величиной. В каждом испытании истинное значение $x'|c|$ вычисляется следующим образом:

$$(4) \quad x'|c| = (1 + d \cdot u) \cdot x|c|,$$

где d — коэффициент, задающий дисперсию ошибки прогноза; u — значение случайной величины с фиксированным законом распределения (закон распределения формируется путем обработки статистических данных об ошибках прогноза суммарной нагрузки).

Найденное значение $x'|c|$ используется в блоке имитации поведения системы управления в процессе достижения баланса генерации и потребления путем изменения нагрузки выбранной регулирующей станции на величину разности $x'|c| - x|c|$. В общем случае из-за ограничений нагрузки регулирующей станции предусматривается возможность изменения нагрузок нескольких станций.

6. Учет случайного изменения вектора распределения

Вычисленные по разным алгоритмам значения векторов нагрузок, как правило, не являются целыми числами и на

практике не задаются в качестве нагрузок станций, поэтому они округляются. Округлённые и сбалансированные значения нагрузок подвергаются случайным изменениям, отражающим неточность их реализации станциями:

$$(5) \quad x'|; j| = x|''; j| * (1 + r * u|j|),$$

где $x|''; j|$ - j -ая компонента вектора с округленным значением (например, кратным 5 или 10 МВт), причем $\sum |j| x|''; j| = x|c| + \Delta x$ (предполагается, что $x|c| + \Delta x$ тоже кратно 5 или 10 МВт); r — коэффициент, задающий дисперсию ошибок реализации; $u|j|$ - значение случайной величины с заданным законом распределения.

Полученные компоненты $x'|; j|$ используются в блоке имитации поведения системы управления, обеспечивающем выполнение условия $\sum |j| x'|; j| = x|'; c| + \Delta x$.

7. Учет неопределенности характеристик станций

Истинные характеристики станций неизвестны в силу ограниченной точности натуральных испытаний и неконтролируемого изменения параметров оборудования с течением времени. Предположим, что известен закон распределения истинных характеристик, который используется при моделировании.

В рассматриваемом примере расчетными являются расходные характеристики, полученные путём кубической сплайн-интерполяции (в алгоритме A|1|), кубической сплайн-интерполяции «с растяжением» (в A|2|), характеристики относительных приростов (в A|3|). По расчетным характеристикам получаем оптимальные векторы распределения $x|1j, j=1...n|$, $x|2j, j=1...n|$ и $x|3j, j=1...n|$, а по истинным определяем расход топлива ЭС. Сравнительная эффективность алгоритмов определяется в результате их попарного сравнения. Например, для алгоритмов A|1| и A|2| она вычисляется по формуле:

$$(6) \quad y(A|1|, A|2|) = \sum |s, s = 1...S| q|s| \sum |j| (y|s;j|(x|1j|) - y|s;j|(x|2j|)),$$

где $q|s|$ — вероятность того, что истинной будет характеристика $y|s, j|(x|j|)$, $x|1j|$ и $x|2j|$, — оптимальные нагрузки, полученные по алгоритмам $A|1|$ и $A|2|$

При положительном значении $y(A|1|, A|2|)$ лучшим является алгоритм $A|2|$, при отрицательном — алгоритм $A|1|$.

Функции $y|s, j|(x|j|)$ могут быть получены различными способами. Укажем два из них, которые соответствуют кусочно-линейному представлению характеристик:

$$(7) \quad y|'; j| = y|j| + d * u|j| * y|max; j|, \quad x|'; j| = x|j|;$$

$$(8) \quad y|'; j| = y|j| * (1 + d * u|j|), \quad x|'; j| = x|j| * (1 + r * v|j|),$$

где d и r — коэффициенты, задающие разброс характеристик; $u|j|$ и $v|j|$ — значения случайных величин, распределенных по выбранному закону, причем значения $y|'; j|$ и $x|'; j|$ определяются в заданных точках характеристик, $y|max; j|$ — максимальное значение расхода топлива, полученное при натуральных испытаниях.

В алгоритме получения характеристик предусмотрена проверка их неубывания. Характеристики, имеющие убывающие участки, бракуются.

Выполнив попарное сравнение всех алгоритмов, можно упорядочить их, например, по возрастанию эффективности.

8. Общий алгоритм оценки сравнительной эффективности решений

Взаимодействие основных блоков алгоритма сравнения решений покажем на примере сравнения алгоритмов $A|1|$ и $A|2|$:

1. вычисляются расчётные характеристики путем их интерполяции кубическими сплайнами и кубическими сплайнами «с растяжением».

2. производится оптимальное распределение по конкурирующим алгоритмам $A|1|$ и $A|2|$ для заданного значения суммарной нагрузки системы $x|c| + \Delta x$.

3. округляются компоненты векторов $x(A|1|)$ и $x(A|2|)$.

4. полученные значения приводятся в соответствии с условием $\sum |j| \quad x|'; j| = x|c| + \Delta x$ путем изменения нагрузки

регулирующих станций (где $x^{|}$; $j|$ — округленные значения компонент векторов $x(A|1|)$ и $x(A|2|)$).

5. имитируется неточность поддержания значений $x^{|};|(A|1|)$ и $x^{|};|(A|2|)$ на станциях (в соответствии с (5)).

6. имитируется случайное значение нагрузки $x^{|}$; $c|$ в соответствии с выражением (4).

7. балансируются полученные в соответствии с п. 5 векторы из условия равенства суммарной генерации значению $x^{|}$; $c| + \Delta x$.

8. имитируются расходные характеристики в соответствии с (7) или (8).

9. по полученным характеристикам в соответствии с (6) вычисляется сравнительная эффективность решений алгоритмов $A|1|$ и $A|2|$.

Усреднение оценок сравнительной эффективности решений проводится по множеству истинных характеристик относительных приростов, а также по множеству случайных векторов распределения и случайных значений суммарной нагрузки системы. По этой же схеме сравниваются и другие алгоритмы.

9. Результаты сравнения

S-моделирование работы алгоритмов проводилось применительно к ЭС из десяти станций с использованием реальных данных о составах работающего оборудования, о расходных характеристиках электростанций и об изменении суммарной нагрузки ЭС.

Суммарная нагрузка ЭС изменялась от 4200 до 5200 МВт. Сравнивались алгоритмы с расходными характеристиками, полученными путём кубической сплайн-интерполяции ($A|1|$), кубической сплайн-интерполяции с «растяжением» ($A|2|$) и характеристиками относительных приростов, построенными с применением формулы численного дифференцирования.

В первой схеме сравнение проводилось без учета изменения состояния ЭС при реализации решений (детерминированное сравнение).

Во второй схеме осуществлялся учет округления компонент расчетных векторов распределения, изменения векторов при ведении режима станциями, случайного отклонения суммарной нагрузки от расчетного значения и учет неопределенности истинных характеристик станций.

Округление проводилось из условия кратности нагрузок 5 МВт, что составляло величину порядка 0,1%—0,5% генерации станций.

При получении истинных значений суммарной нагрузки и реализуемых векторов распределения использовался генератор случайных чисел с усеченным нормальным законом распределения и параметрами (0, 1).

Для моделирования характеристик применялся генератор случайных чисел с равномерным законом распределения в интервале (-1, 1).

При попарном сравнении всех алгоритмов использовалась функция оценки, построенная путём интерполяции кусочно-линейными функциями табличных расходных характеристик, полученных при натурных испытаниях.

Результаты моделирования показывают, что учёт изменения состояния объекта влияет на оценку сравнительной эффективности алгоритмов А|1|, А|2| и А|3|. Например, при значениях суммарной нагрузки 4200 и 4400 МВт при детерминированном сравнении эффективнее работал алгоритм А|1|, а при тех же значениях нагрузки с учётом изменения состояния объекта (ошибка прогноза $x|c| + \Delta x$ и реализации составляла 0,5 %, а зона неопределённости характеристик - 5 %) эффективнее уже был А|2|. В обоих случаях изменение оценок не превосходило 0,06%, что в абсолютном выражении составляло 0,9 т. условного топлива в час. Сравнительная эффективность существенно зависит от суммарной нагрузки энергосистемы. Например, в диапазоне нагрузок 4200-4300 МВт эффективнее работал алгоритм А|3|, а в диапазоне 4430-4560 МВт – алгоритм А|1|. При детерминированной схеме сравнения наилучшие результаты показывали алгоритмы А|1| и А|2|, тогда как при учёте

изменения состояния объекта перевес уже был на стороне алгоритма A[3].

В каждой серии испытаний усреднение проводилось до получения устойчивых статистических оценок (50—200 испытаний) путем построения доверительных интервалов.

Оценка сравнительной эффективности алгоритмов для интервала значений суммарной нагрузки производилась путем усреднения результатов, полученных для отдельных значений этого интервала.

Основной вывод заключается в том, что усложнение s-моделей объекта моделирования и, как следствие, алгоритмов оптимизации не даёт гарантии улучшения результатов решений.

Эффективные алгоритмы распределения нагрузки продолжают оставаться наиболее важными при диспетчерском управлении энергосистемами. Своевременно обновляемые расходные характеристики электростанций, вычисляемые на основе данных о составе оборудования и значений его параметров, необходимое условие качества получаемых решений.

10. Заключение

1. Предложен метод оценки сравнительной эффективности алгоритмов распределения нагрузок между электростанциями, учитывающий точность исходных данных и погрешности реализации решений.

2. Актуальность применения предложенного метода будет возрастать по мере нормализации рыночных отношений производителей и потребителей электроэнергии (в соответствии с НЭк-моделью [9]).

Литература

1. АЛБЕРГ ДЖ., НИЛЬСОН Э., УОЛШ ДЖ. *Теория сплайнов и ее приложения*. — М.: Мир, 1972, — 316 с.

2. БЕРТСЕКАС Д. *Условная оптимизация и методы множителей Лагранжа*. М.: Радио и связь, 1987, 400 с.
3. ГАНТМАХЕР Ф.О. *Теория матриц*. — М.: Наука, 1966.— 576 с.
4. ГОДУНОВ С.К., РЯБЕНЬКИЙ В.С. *Введение в теорию разностных схем*. — М. Физматгиз, 1962.—340 с.
5. ИЛЬИН А.В. *Конструирование разрешающих структур на задачных графах системы знаний о программируемых задачах*. Информационные технологии и вычислительные системы. 2007. № 3. с. 30-36.
6. ИЛЬИН А.В., ИЛЬИН В.Д. *S-моделирование объектов информатизации*. М.: ИПИ РАН, 2010, 412 с.
http://smodeling.files.wordpress.com/2011/01/avvd-ilyin-smoi-2010_dec31_21.pdf
7. ИЛЬИН А.В., ИЛЬИН В.Д. *Основы теории s-моделирования*. ИПИ РАН, 2009, 143 с.
<http://smodeling.wordpress.com/2009/12/30/a-в-ильин-в-д-ильин-основы-теории-s-модел/>
8. ИЛЬИН А.В., ИЛЬИН В.Д. *Распределение ресурсов по обязательным и ориентирующим правилам: сравнительная эффективность алгоритмов*. Системы и средства информатики. 2005. вып. 15. с. 123-159.
9. ИЛЬИН В.Д. *Модель нормализованной экономики (НЭК-модель): основы концепции*. Управление большими системами: сборник трудов. 2009. № 25. с. 116-138.
10. SCHWEIKERT D.G. An interpolation curve using a spline in tension. Math. And Phisics, 1966, v. 45, p. 312-317.

A COMPARISON OF THE EFFICIENCY OF ALGORITHMS OF LOAD DISTRIBUTION IN POWER SYSTEMS

Boris Kurov, Institute of Informatics Problems of RAS, Moscow, Cand. Sc., assistant professor (bnkurov@ipiran.ru).

Abstract: Proposed the method for comparing the efficiency of algorithms of load distribution in power systems, taking into account the conditions of realization of solutions. The method allows to choose the most effective algorithm under given conditions the implementation of decisions.

Keywords: load distribution in power systems, comparing the efficiency of algorithms, s-modeling.