

## Параллельный расчет электромеханического переходного процесса ЭЭС в реальном времени для нужд противоаварийной автоматики

**К.И. АПРОСИН**  
**УрФУ, Прософт-Системы**  
**Россия**  
**[aprosin.ki@gmail.com](mailto:aprosin.ki@gmail.com)**

### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Расчет режима ЭЭС в реальном времени; электромеханический переходный процесс ЭЭС; параллельные вычисления.

### 1 ВВЕДЕНИЕ

Одна из нерешенных проблем современного противоаварийного управления ЭЭС – проблема ликвидации каскадного развития аварии. Современная автоматика ЭЭС предназначена, прежде всего, для предотвращения каскадного развития аварии. При последовательной потере нескольких элементов ЭЭС нарушается главный критерий настройки автоматики – критерий единичного отказа (N-1). Энергосистема попадает в нерасчетный режим в котором автоматика с заранее вычисленными уставками работает случайным образом и не может предотвратить дальнейшее развитие аварии. Решение данной проблемы связано с вопросом обеспечения работы автоматики ЭЭС в нерасчетных режимах.

Избежать развития аварии в нерасчетном режиме можно, только точно зная, как будет происходить развитие схемно-режимной ситуации в ЭЭС. Требуется, на основании знания о текущем состоянии ЭЭС, построить прогноз развития переходного процесса. Имея прогноз, можно перенастроить устройства локальной автоматики с целью предотвращения неблагоприятного развития переходного процесса [1]. Именно так должна работать перспективная централизованная противоаварийная автоматика, работающая по принципу «после».

Наиболее сложной частью такой автоматики является именно построение прогноза развития переходного процесса с учетом действия локальной автоматики и защит. Выполнение процедуры прогнозирования жестко ограничено во времени, при этом объем вычислений достаточно велик. Необходимость производить большие расчеты в реальном времени не позволяет создать не позволяет создавать устройства автоматики, работающие по принципу «после».

В данной статье приведены некоторые результаты работы по созданию методики прогнозирования развития переходного процесса ЭЭС в условиях реального времени.

### 2 ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Автоматика на основе расчета имеет два режима работы: доаварийный и аварийный циклы. Доаварийный цикл выполняется вне реального времени и подготавливает данные для работы аварийного цикла. В каждый момент времени вычислительная система должна иметь актуальную схему замещения сети и параметры доаварийного режима. Аварийный цикл пускается по факту изменения топологии схемы сети. Его задача – построить прогноз развития переходного процесса в реальном времени.

#### 2.1 Порядок построения прогноза

В задаче построения прогноза подход к моделированию переходного процесса традиционен. Расчетная процедура при прогнозировании мало отличается от аналогичных расчетных методик, применяемых в программах расчета динамики ЭЭС. Основные отличия

при прогнозировании режима для автоматики заключаются в требовании учета всех устройств РЗА моделируемой системы и запрете расчета до достижения фиксированной невязки, т.к. автоматика требует фиксированного времени выполнения расчетной процедуры прогнозирования. По той же причине запрещено деление шага по времени при появлении больших невязок на шаге.

Шаг расчета по времени состоит из трех основных этапов: расчета параметров генераторов, расчета сети, расчета автоматики.

В начале шага производится моделирование всех генераторов системы. При этом могут использоваться модели разного уровня детализации (с разным числом контуров на ось синхронной машины), например модели приведенные в [2]. Однако, вне зависимости от способа моделирования, результатом расчета параметров генераторов являются простейшие модели генераторов ЭДС за сопротивлением, актуальные только на текущем шаге по времени. Далее моделируется мгновенный режим сети. Для этого в модели сети генераторы заменяются на источники напряжения (ЭДС за сопротивлением) с параметрами, полученными при моделировании генераторов на данном шаге по времени [1]. Полученная модель сети описывается системой уравнений узловых напряжений в форме баланса токов – системой линейных уравнений [3]. Решение этой системы дает напряжения в узлах сети, по которым вычисляются токи ветвей. Полученные значения токов ветвей и узловых напряжений дают возможность смоделировать действие локальных устройств РЗА. Далее топология сети корректируется с учетом сработавших устройств РЗА.

## **2.2 Учет коммутации при построении прогноза развития переходного процесса.**

После изменения топологии сети необходимо сделать несколько шагов с малым интервалом времени для проверки срабатывания первых ступеней защит (тех, что работают без выдержки времени). Общая длина интервала прогнозирования после изменения топологии не превышает длительность двух-трех периодов основной частоты. Этот расчет может выполняться отдельно от основной ветки расчета, т.к. изменение угла ротора за столь короткий промежуток времени.

Прогноз развития переходного процесса ЭЭС с учетом действия устройств РЗА является многовариантным, он неоднозначен по своей физической сути [1]. В результате прогнозирования появляется множество вариантов развития событий, каждый из вариантов имеет свою вероятность реализации. По какому из вариантов пойдет развитие режима заранее не известно. Для примера можно рассмотреть следующую ситуацию: транзит из трех последовательно соединенных линий попадает в режим токовой перегрузки из-за отключения параллельной связи. Параметры режима перегрузки таковы, что срабатывают дистанционные пусковые органы 3-х ступеней защит всех трех линий, блокировка от качаний разрешает работу защит, т.к. переход в режим перегрузки произошел скачком (вследствие отключения связи). Выдержки времени 3-х ступеней защит одинаковы на всех линиях, поэтому невозможно сказать заранее какая из линий отключится первой, разорвав транзит. Если между линиями включена нагрузка, то режимные ситуации при отключении разных линий будут существенно отличаться. При появлении такой ситуации прогноз развития режима должен разделиться на три ветви с одинаковой вероятностью реализации. Дальнейшее прогнозирование должно вестись одновременно для трех вариантов развития режима.

## **2.3 Вычислительная сторона прогноза развития переходного процесса.**

Основная сложность прогноза – большой объем вычислений. Современная вычислительная техника позволяет производить чрезвычайно большие объемы вычислений, вычислительная мощность таких систем может составлять  $10^{12} \dots 10^{16}$  операций с плавающей точкой в секунду. Однако эта вычислительная мощность достигается исключительно за счет параллельности вычислений. К настоящему моменту сложилась ситуация когда уровень параллелизма вычислительных систем, представленных на рынке составляет от сотен до десятков (сотен) тысяч потоков расчета. Поэтому, вся вычислительная мощность может быть использована только теми программными продуктами, которые используют параллельные методы расчета. Для задач с последовательными алгоритмами ресурсы современных вычислительных систем остаются закрытыми.

Задача расчета шага переходного процесса хорошо распараллеливается на этапах моделирования генераторов и моделирования РЗА. В используемой модели генераторы не влияют друг на друга внутри шага. Для пересчета параметров единичного генератора требуется знать только напряжения и ток на его выводах. Все генераторы можно обчислять одновременно и независимо друг от друга это означает возможность обчислять модели генераторов параллельно. При этом уровень параллелизма равен числу генераторов в системе, который измеряется в сотнях штук в используемых в настоящее время моделях ЭЭС. Тоже относится к устройствам РЗА, для моделирования работы устройства РЗА отдельного присоединения достаточно знать только вычисленные ток и напряжение присоединения. Число устройств РЗА системы можно грубо оценить как число ветвей плюс число ветвей. Число узлов и число ветвей сети обычно близки, соответственно можно считать, уровень параллелизма имеет тот же порядок что и размерность системы уравнений узловых напряжений (число узлов). В современных моделях сети это значение порядка единиц или десятков тысяч. При расчете сети ситуация существенно хуже.

## **2.4 Параллельный расчет электрической сети с учетом коммутаций.**

Исходная электрическая сеть представлена в виде системы линейных уравнений (СЛАУ) в форме баланса токов. В такой форме исходные данные для расчета сети представляют собой слабо заполненную матрицу проводимостей  $Y$  размером  $N$  на  $N$  и вектор узловых токов размером  $N$ , где  $N$  – количество узлов сети. Искомый вектор узловых напряжений также имеет размер  $N$ . Коэффициент заполнения матрицы обычно составляет 1/1000 (одна связь на 1000 узлов), это означает, что в матрице размером несколько тысяч строк количество не нулевых элементов в строке будет измеряться единицами.

$$\begin{bmatrix} \underline{Y}_{11} & \dots & \dots & \dots & \underline{Y}_{1N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \underline{Y}_{ii} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \underline{Y}_{N1} & \dots & \dots & \dots & \underline{Y}_{NN} \end{bmatrix} \times \begin{pmatrix} \dot{U}_1 \\ \dots \\ \dot{U}_i \\ \dots \\ \dot{U}_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{I}_1 \\ \dots \\ \dot{I}_i \\ \dots \\ \dot{I}_N \end{pmatrix}$$

В простейшем случае матрица  $Y$  симметрична относительно главной диагонали т.е.  $Y_{ij}=Y_{ji}$ . Однако при учете коэффициентов трансформации это свойство теряется ( $Y_{ij} \neq Y_{ji}$ ) т.к. в этом случае каждое уравнение СЛАУ умножается на свой коэффициент (приводится к номинальному напряжению узла).

В настоящее время, системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) общего вида решаются методом последовательного исключения (Гаусса) в той или иной реализации. Метод Гаусса является последовательным по своей сути и потенциала распараллеливания почти не имеет. Распараллеливание метода Гаусса возможно на уровне исключения строки – все операции исключения могут производиться параллельно. Такое распараллеливание эффективно при исключении первых строк полностью заполненных матриц, при этом уровень параллельности падает с каждой новой исключенной строкой [4]. Для разреженных матриц существует возможность начинать параллельное исключение не связанных между собой строк. Потенциал распараллеливания в этом случае зависит от правильного разбиения исходной матрицы на подматрицы (в терминах ЭЭС правильного разбиения сети на районы, которые преобразуются в эквивалентные узлы). При этом эффективность такого распараллеливания сильно зависит от разбиения. Существуют и другие варианты распараллеливания метода исключения для матриц специального вида [4], [5], однако, произвольную матрицу проводимостей сети невозможно привести к специальному виду.

Для решения СЛАУ, описывающих электрическую сеть, на параллельном вычислителе необходим расчетный метод, обладающий высокой масштабируемостью (способностью

загружать число элементарных вычислителей, пропорциональное числу уравнений) и возможностью широкого использования промежуточных результатов предыдущего расчета в последующих. Единственным практическим вариантом параллельного расчета является хранение какого-либо разложения матрицы проводимостей (например, разложения на верхнюю и нижнюю треугольные матрицы или разложение Холецкого). Решение СЛАУ с использованием готового разложения можно реализовать в виде параллельной процедуры. Однако такой подход не может быть использован напрямую, т.к. изменения топологии, неизбежные в переходном процессе, изменяют матрицу проводимостей и сделают разложение недействительным. Пересчет разложения – это все тот же непараллельный метод Гаусса.

Рассмотрим эту задачу подробнее. Результатом работы защит и автоматики являются отключения и включения связей между узлами электрической сети, отключения генерации и нагрузки. При этом меняется часть элементов системы уравнений узловых напряжений (УУН). При отключении генерации меняется соответствующий элемент вектора свободных членов и диагональный элемент матрицы проводимостей.

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{1i} & Y_{1N} \\ Y_{i1} & Y_{ii} & Y_{iN} \\ Y_{N1} & Y_{Ni} & Y_{NN} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} U_1 \\ U_i \\ U_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_i \\ I_N \end{bmatrix}$$

При отключении связи между узлами меняются диагональный и недиагональный элементы соответствующей строки (и столбца).

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{1i} & Y_{1N} \\ Y_{i1} & Y_{ii} & Y_{iN} \\ Y_{N1} & Y_{Ni} & Y_{NN} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} U_1 \\ U_i \\ U_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_i \\ I_N \end{bmatrix}$$

При изменении матрицы проводимостей изменится и ее верхняя и нижняя треугольные матрицы, полученные в результате триангуляции. С точки зрения расчета прогноза переходного процесса, такая ситуация грозит необходимостью триангуляции после каждой коммутации, что приведет к существенной потере времени при прогнозировании каскадного развития аварии, когда изменения топологии, отключения нагрузки и генерации следуют одно за другим.

Один из методов, позволяющих исключить триангуляцию матрицы после изменения топологии сети - метод экспресс-оценки потокораспределения при коммутациях в электрической сети [6]. Суть метода заключается в решении дополнительной системы линейных уравнений, учитывающей изменения матрицы проводимостей, связанные с коммутациями в сети. В качестве свободного члена данной системы используется вектор напряжений – решение системы УУН без учета коммутаций в сети. В дальнейших формулах все элементы этого вектора будут помечены штрихом.

В матричной форме эта система имеет вид:

$$(E + D) \times U = \vec{U}$$

Если расписать приведенную формулу для единичной коммутации (линии 1-2), то можно увидеть, что матрица D имеет всего два ненулевых столбца.

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} & 0 & \dots & 0 \\ d_{21} & d_{22} & 0 & \dots & 0 \\ d_{31} & d_{32} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{N1} & d_{N2} & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix} \times \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ \vdots \\ U_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_1' \\ U_2' \\ U_3' \\ \vdots \\ U_N' \end{bmatrix}$$

Для множественных коммутаций принципиально ничего не меняется. Увеличивается число непустых столбцов матрицы D. Например, при двух отключенных линиях (1-2 и 4-5) систему можно записать как:

$$\begin{pmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & 0 & d_{14} & d_{15} & \dots & 0 \\ d_{21} & d_{22} & 0 & d_{24} & d_{25} & \dots & 0 \\ d_{31} & d_{32} & 0 & d_{34} & d_{35} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{N1} & d_{N2} & 0 & d_{N4} & d_{N5} & \dots & 0 \end{bmatrix} \end{pmatrix} \times \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ \vdots \\ U_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ \vdots \\ U_N \end{bmatrix}$$

Непустые (имеющие ненулевые элементы) столбцы матрицы D могут быть легко получены по известному разложению исходной матрицы проводимостей и известным новым значениям изменившихся элементов матрицы проводимостей. Для этого, сначала получается разность старой и новой матрицы проводимостей:

$$\Delta Y = \bar{Y} - Y$$

Разностная матрица имеет ненулевые элементы только в двух столбцах (показано для коммутации линии 1-2):

$$\begin{bmatrix} \Delta Y_{11} & \Delta Y_{12} & 0 & \dots & 0 \\ \Delta Y_{21} & \Delta Y_{22} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

Для каждого из столбцов полученной матрицы решается СЛАУ с исходной матрицей проводимостей (показано для коммутации линии 1-2):

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & \dots & Y_{1N} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & \dots & Y_{2N} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & \dots & Y_{3N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{N1} & Y_{N2} & Y_{N3} & \dots & Y_{NN} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} d_{11} \\ d_{21} \\ d_{31} \\ \vdots \\ d_{N1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta Y_{11} \\ \Delta Y_{21} \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & \dots & Y_{1N} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & \dots & Y_{2N} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & \dots & Y_{3N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{N1} & Y_{N2} & Y_{N3} & \dots & Y_{NN} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} d_{12} \\ d_{22} \\ d_{32} \\ \vdots \\ d_{N2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta Y_{12} \\ \Delta Y_{22} \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}$$

Ввиду того, что для исходной матрицы проводимостей уже посчитаны верхняя и нижняя треугольные матрицы, решение приведенной системы не требует значительного вычислительного ресурса.

Из полученных столбцов и формируется матрица D:

$$\begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & 0 & \dots & 0 \\ d_{21} & d_{22} & 0 & \dots & 0 \\ d_{31} & d_{32} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{N1} & d_{N2} & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

Интересно, что, при нескольких изменениях в одном и том же столбце матрицы проводимостей, допустимо считать столбец матрицы D для каждого из изменений в отдельности, а потом складывать результаты:

$$\begin{bmatrix} d'_{11} & d'_{12} & 0 & \dots & 0 \\ d'_{21} & d'_{22} & 0 & \dots & 0 \\ d'_{31} & d'_{32} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d'_{N1} & d'_{N2} & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d''_{11} & 0 & d''_{13} & \dots & 0 \\ d''_{21} & 0 & d''_{23} & \dots & 0 \\ d''_{31} & 0 & d''_{33} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d''_{N1} & 0 & d''_{N3} & \dots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d'_{11} + d''_{11} & d'_{12} & d'_{13} & \dots & 0 \\ d'_{21} + d''_{21} & d'_{22} & d'_{23} & \dots & 0 \\ d'_{31} + d''_{31} & d'_{32} & d'_{33} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d'_{N1} + d''_{N1} & d'_{N2} & d'_{N3} & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

Нужно отметить, что матрица E+D является вырожденной. Поэтому, из нее нужно исключить все строки и столбцы, изменений в которых не было, и решить полученную систему малой размерности. Результатом будут напряжения узлов, в которых были коммутации. Остальные напряжения будут получены по полученным напряжениям узлов с коммутациями и известным столбцам матрицы E+D.

Чтобы воспользоваться данным методом для прогнозирования переходного процесса нужно хранить следующие данные.

- Верхнюю и нижнюю треугольные матрицы для исходной матрицы проводимостей.
- Вектор свободных членов УУН в форме баланса токов
- Исходную матрицу проводимостей и список с проводимостями каждой связи в отдельности.
- Список отключенных связей.
- Столбцы матрицы D для всех изменений, произошедших к моменту текущего шага расчета (по времени).

Порядок расчета шага переходного следующий. Сначала решается система УУН с исходной матрицей и текущим вектором свободных членов без учета любых коммутаций. При этом используются хранимые верхняя и нижняя треугольные матрицы. В результате получается вектор нескорректированных напряжений (в приведенных выше формулах его элементы помечены штрихом). Далее “решается” (как именно, описано выше) система уравнений текущей матрицей E+D и полученным вектором нескорректированных напряжений. Полученный результат и будет вектором напряжений, скорректированным с учетом коммутаций. По этим напряжениям считаются токи линий. По полученным токам и напряжениям определяется состояние устройств защиты и автоматики во всех точках сети. Из связей, на которых произошло срабатывание устройств защиты и автоматики, формируется разностная матрица, и вычисляются соответствующие столбцы вектора D. Далее эти столбцы суммируются с текущей матрицей D (учитывающей коммутации на предыдущих шагах переходного процесса).

Данный метод обеспечивает быстрый расчет переходного процесса без триангуляции матрицы проводимостей на шаге. Объем вычислений слабо растет с увеличением числа коммутаций. Действительно, увеличение числа коммутаций в исходной схеме приводит к увеличению объема плотной подматрицы матрицы E+D, если коммутируемые связи имеют общие узлы; и к увеличению числа подматриц, если общих узлов у коммутируемых связей нет. Отдельно следует подчеркнуть, что матрица D никогда не пересчитывается целиком: каждая коммутация либо добавляет к ней два столбца, либо меняет один из существующих столбцов и добавляет один новый.

## 2.5 Параллельный расчет электрической сети с учетом коммутаций.

Таким образом, все этапы расчета режима на шаге (расчет генераторов, расчет защит и автоматики, расчет сети) имеют параллельные реализации. Первые два этапа являются параллельными по сути, вследствие отсутствия непосредственной связи между различными генераторами сети или различными устройствами защит. Расчет сети имеет параллельные реализации при условии наличия готового разложения. При использовании метода экспресс-оценки потокораспределения расчет сети остается параллельным даже при изменении изменения топологии сети. Суть метода заключается в решении дополнительной системы линейных уравнений, учитывающей изменения матрицы проводимостей, связанные с

коммутациями в сети. Сеть считается так, как если бы в ней не было коммутаций, в результате получается неправильный вектор напряжений. Далее этот вектор корректируется путем решения системы уравнений, учитывающей все изменения проводимостей сети, произошедшие с начала переходного процесса. Корректирующая система уравнений имеет относительно малую размерность равную числу изменений в исходной матрице проводимостей. Объем вычислений на шаге при учете коммутаций приблизительно удваивается. Изменение корректирующей матрицы при коммутации сводится к двукратному решению системы линейных уравнений с исходной матрицей проводимостей, т.е. с известным разложением. При этом все вышеперечисленные действия могут быть выполнены на параллельном вычислителе.

### 3 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенная в статье методика позволяет эффективно рассчитывать переходные процессы в реальном времени. Основным достоинством методики является ее соответствие современной и перспективной вычислительной аппаратной базе с точки зрения параллельности вычислительных процедур. Однако приведенная методика не может быть напрямую использована для нужд ЭЭС ввиду отсутствия на рынке вычислительных систем реального времени с общей памятью. Дальнейшие исследования могут сводиться к адаптации предложенного подхода для массивно-параллельных вычислительных систем с распределенной памятью, среди которых есть вычислительные системы способные работать в реальном времени. Возможен и другой вариант получения вычислительной системы для прогнозирования режимов – ее создание на базе FPGA микросхем. На данном этапе сложно сказать, какой из вариантов может дать практический результат.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Апросин К.И. Организация распределенной противоаварийной автоматики на основе прогнозирования переходных процессов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. №11-12/1 2008 Казань КГЭУ
- [2] Е.К. Лоханин, В.А. Глаголев, А.И. Скрыпник, Моделирование синхронных машин// Сборник докладов III международной научно-практической конференции «Энергосистема: управление, конкуренция образование» Екатеринбург 2008.
- [3] Аюев Б.И., Давыдов В.В, Ерохин П.М., Неуймин В.Г., Расчетные модели потокораспределения электрических систем, Москва: Флинта, 2008.
- [4] Гергель В.П. Теория и практика параллельных вычислений, Москва: Интернет университет информационных технологий, 2007.
- [5] Воеводин В.В., Воеводин Вл.В., Параллельные вычисления, СПб: БХВ-Петербург, 2002.
- [6] Кирпикова И.Л., Кулешов А.И., Липес А.В., Неуймин В.Г. Алгоритм и программа оперативной оценки возможности отключения элементов основных сетей и межсистемных связей. // Советчики диспетчера по оперативной коррекции режимов работы ЭЭС. Иркутск: АН СССР, СЭИ, 1984.