

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

*кандидата технических наук, доцента, начальника центра моделирования и автоматизации управления энергосистемами АО «НТЦ ЕЭС» Неуймина Владимира Геннадьевича на диссертацию Гавриловой Альбины Евгеньевны «Расчет наименьшего предельного перетока по статической устойчивости в заданном сечении на основе потоковой модели», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности*  
*2.4.3. Электроэнергетика*

### ***Актуальность темы диссертации***

В условиях растущего энергопотребления и непрерывного развития электросетевого комплекса обеспечение эффективной и надёжной работы энергосистем является важной задачей. Одним из ключевых аспектов обеспечения устойчивости энергосистемы является обеспечение допустимых параметров режима при различных режимах работы, также при нормативных аварийных возмущениях. Традиционным способом обеспечения устойчивости энергосистемы является контроль перетоков активной мощности в заранее определенных контролируемых сечениях. Одной из важнейших задач Системного Оператора ЕЭС России является определение максимально допустимых перетоков (МДП) в контролируемых сечениях (КС). В настоящее время для этой цели на всех основных КС используется система мониторинга запасов устойчивости (СМЗУ) позволяющая в реальном времени определить МДП. Поиск предельного режима в заданном сечении по статической устойчивости является одной из функций СМЗУ.

Таким образом, актуальной задачей является поиск предельного перетока мощности в заданном сечении без необходимости перебора различных направлений утяжеления, т.к. данный переток напрямую влияет на полученные допустимые перетоки мощности в сечении. В этой связи представленные диссертационные исследования Гавриловой А.Е. заслуживают внимания и обладают практической значимостью.

### ***Достоверность положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации***

Достоверность и обоснованность сделанных выводов и полученных результатов обеспечивается применением математического аппарата, который базируется на существующих законах электротехники. Предложенный метод продемонстрировал идентичные результаты с традиционным методом последовательного утяжеления.

Полученные результаты опубликованы в 4 научных работах, в том числе 2 статьи в рецензируемых научных изданиях, определённых ВАК РФ, 1 статья в зарубежном издании, входящем в международные базы цитирования Web of Science и Scopus.

### ***Характеристика структуры и содержания диссертации***

Диссертационное исследование содержит введение, три главы, заключение и библиографический список.

***В первой главе*** рассматриваются различные существующие исследования в области предельных режимов. Рассмотрен применяемый в настоящее время метод последовательно утяжеления и его зарубежный аналог. Рассмотрены аналитический метод поиска на основе уравнений предельных режимов, методы на основе нелинейного программирования и их зарубежные аналоги. Последние два метода представляют из себя альтернативный подход к обеспечению устойчивости энергосистем, в которых выполняется поиск ближайшего предельного режима в целом в энергосистеме, а не в каком-то конкретном контролируемом сечении.

***Во второй главе*** приводится описание предлагаемого метода. Метод основан на нелинейном программировании, но отличается от существующих тем, что поиск выполняется в конкретном заданном сечении. Данный подход позволяет использовать его в существующей системе оперативно-диспетчерского управления. Приведены преимущества использования потоковой модели для задачи поиска предельный перетоков.

***В третьей главе*** приведены результаты применения предлагаемого метода для 3-узловой, 4-узловой и 12-узловой тестовых схем. Производится сравнение результатов, полученных с помощью традиционного метода последовательного утяжеления режима, выполненного в ПК RastrWin, и с помощью предлагаемого метода. Для случаев, где выбор траектории утяжеления может быть сделан аналитически, результаты, полученные с помощью двух методов, полностью совпадают. Для случаев, где аналитически трудно выбрать траекторию утяжеления, алгоритм находит наименьший предельный переток ниже, чем найденный с помощью перебора различных вариантов траекторий утяжеления, что говорит о том, что алгоритм способен находить неочевидные решения.

### ***Научная новизна исследования***

В рамках проводимого исследования была всесторонне рассмотрена проблема поиска предельных режимов в заданном сечении энергосистемы.

Отдельно следует выделить следующие элементы новизны полученных результатов:

1. Разработана новая постановка задачи поиска предельного режима с применением методов нелинейного программирования для определённого контролируемого сечения.

2. В задаче поиска предельного режима использована потоковая модель установившегося состояния, которая позволила улучшить вычислительные характеристики предлагаемого метода

3. Предложен способ использования критерия равенства нулю определителя матрицы Якоби напрямую в процедуре нелинейного программирования

4. Осуществлено ускорение работы метода и улучшены его вычислительные характеристики.

### ***Практическая значимость работы***

Предложенный в диссертации метод может использоваться технологами при оперативно-диспетчерском управлении энергосистемой. Данный метод автоматизирует процесс расчета предельных режимов, устраняя потребность в сложных и длительных процедурах выбора траектории утяжеления режима, которые ранее зависели от опыта и квалификации специалиста, выполняющего расчет. Применение данного метода существенно упрощает и ускоряет вычисления, что позволяет повысить точность и оперативность управления энергосистемой. Кроме того, метод обладает потенциалом для интеграции в существующую систему мониторинга запасов статической устойчивости.

### ***Вопросы и замечания по содержанию диссертационной работы***

1. В разделе «2.1 Математическая формулировка целевой функции и ограничений в форме равенства и неравенства» (стр. 38) предлагается **минимизировать** поток по контролируемому сечению (КС) (формула 2.1) с дополнительным условием равенства нулю определителя матрицы Якоби (формула 2.3). Необходимо использовать более точную формулировку – найти минимальный переток из возможных максимально допустимых по сечению.

2. На Стр 49 приведено ошибочное утверждение «необходимо отметить, что для его вычисления необходим поиск собственных чисел матрицы Якоби. При этом для вычисления собственных чисел нужно искать корни полинома  $n$ -ой степени, что является вычислительно трудозатратным». Никогда, для вычисления собственных значений, не ищут корни полинома,

есть другие, на порядок более эффективные методы (метод обратных итераций, метод Ланцоша, подпространства Крылова и тд)

3. на стр 51 утверждается «При решении такой системы УУН методом Ньютона применяется линеаризация, в ходе которой функция синуса и косинуса заменяется линейной аппроксимацией.». Нет, в ПК RastrWin функции синуса и косинуса не заменяются линейной аппроксимацией.

4. на стр 51 утверждается «что вблизи предельных режимов линейная система уравнений на шаге итерации метода Ньютона плохо обусловлена и наблюдается численная неустойчивость». Для преодоления этого недостатка разработаны методы типа Continues Power Flow с дополнительным уравнением, что дает невырожденную матрицу и которые позволяет получать даже режимы с практически нулевым и отрицательным Якобианом.

5. Для расчета установившихся и предельных режимов предложена потоковая модель, по мнению автора, имеющая два принципиальных преимущества по сравнению с классической моделью уравнений баланса мощностей в полярных координатах. Несомненно, потоковая модель эффективна для расчета разомкнутых электрических сетей, в то же время для расчета сложно-замкнутых электрических сетей, имеет существенные недостатки :

- Для использования потоковой модели в методе Ньютона, необходимо задать начальные приближения потоков активной и реактивной мощности во всех ветвях. Неясно, какие значения предлагается задавать для такой цели.

- Число уравнений и неизвестных, входящих в потоковую модель значительно больше (примерно в 2 раза!) чем в классической модели.

- матрица Якоби, используемая в классической модели обладает свойствами, позволяющим значительно ускорить процесс получения решения – слабозаполненностью, сильной диагональю, структурной симметрией, ее элементы незначительно изменяются в ходе итерационного расчета. Неясно, как с этим обстоит дело в потоковой модели?

6. В итоговой целевой функции (формула 2.46) используется целевая функция в виде суммы перетоков активной мощности по ветвям заданного сечения, если в сечении возможны реверсивные перетоки, с помощью такой функции будет найден максимум в обратном направлении.

7. Ограничение на равенство определителя матрицы Якоби (формула 2.51) включено в итоговую математическую постановку задачи и даже в функцию Лагранжа (2.57). Использовать такое ограничение в любом аналитическом методе оптимизации (например, в методе внутренней точки) невозможно, так как невозможно аналитическое определение производных от определителя (2.71)



Представленные замечания касаются частных и не снижают научной и практической значимости результатов диссертационной работы.

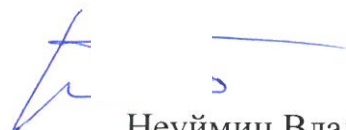
### **Заключение**

В работе представлен метод, позволяющий автоматизировать процесс поиска предельного перетока в заданном сечении энергосистемы, устраняя необходимость в ручной процедуре выбора траектории утяжеления режима. Более точные расчеты допустимых по статической апериодической устойчивости перетоков позволяют повысить надежность работы энергосистемы.

Диссертация Гавриловой А.Е. «Расчет наименьшего предельного перетока по статической устойчивости в заданном сечении на основе потоковой модели» соответствует специальности 2.4.3. Электроэнергетика и представляет собой завершённое научно-квалификационное исследование, решающее актуальную задачу поиска предельных перетоков в энергосистеме. Диссертационная работа в полном объеме отвечает критериям, которые установлены положением о присуждении ученых степеней в ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Гаврилова Альбина Евгеньевна заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.4.3. Электроэнергетика.

Официальный оппонент, начальник центра моделирования и автоматизации управления энергосистемами АО «НТЦ ЕЭС», кандидат технических наук, доцент,

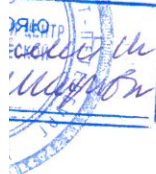
  
Неуймин Владимир  
Геннадьевич

### **Сведения:**

**Полное наименование организации:** Акционерное общество «Научно-технический центр Единой энергетической системы».

**Юридический адрес:** 194223, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Курчатова, д.1, лит. А.

т: +7 (343) 227-31-50, доб. 22-57



14.11.2024