

## ЭНЕРГЕТИКА

Г. А. АЙРАПЕТЯН

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ДЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ  
ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ С ДИАГНОСТИКОЙ УРАВНЕНИЙ  
ПО ПРИЗНАКАМ СУЩЕСТВЕННОСТИ  
ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ

Разработка методики расчета длительных электромеханических переходных процессов, удовлетворяющей необходимой точности и обеспечивающей минимальное число вычислительных операций, является весьма актуальной. Возможности ЭЦВМ III поколения позволяют в постановке технических задач учесть много факторов, неучет которых в ранних работах объяснялся не столь их несущественностью, сколь ограниченными возможностями вычислительной техники. Однако, чем шире ставится задача, тем актуальнее становится вопрос минимизации вычислительных операций. Отсюда возникает задача диагностики уравнений по признакам существенности изменения параметров.

В задачах энергетики принято раздельно рассматривать электромагнитные, электромеханические, тепловые, ядерные и гидродинамические процессы, хотя все они сопровождают единый процесс выработки, распределения и потребления электроэнергии. Совместное рассмотрение этого процесса привело бы к громоздкой математической модели и к сложности ее реализации. В то же время принятое в практике разделение процессов и соответствующих им систем уравнений, производимое из условия возможностей математической реализации, не удовлетворяет предъявленным требованиям в части учета взаимного влияния ряда факторов.

В плане системного подхода к решению таких задач в настоящее время в ряде организаций (МЭН, ИЭД АН УССР, ВНИИЭ, КПИ и др.) проводятся работы, предусматривающие сохранение в памяти ЭВМ всей математической модели энергосистемы в виде комплекса программ.

Нам представляется целесообразным вести диагностику по ходу расчета. Здесь имеется в виду выявление необходимости решения тех или других уравнений на данном этапе расчета. В связи с тем, что в математическую модель таких процессов обычно входят нелинейные дифференциальные уравнения, а для решения их используются численные методы интегрирования, точность которых зависит от величины расчетного шага, возникает необходимость выбора такого шага, кото-

рый удовлетворял бы, с одной стороны, требованиям точности, а с другой — исключал бы ненужные вычислительные операции.

Предлагаемая методика расчета таких процессов предусматривает диагностику уравнений в каждом шаге расчета. Решение дифференциальных уравнений производится методом Рунге-Кутты. Выбор метода интегрирования зависит от исследуемой задачи. В данной постановке определяющим фактором является необходимость изменения шага как на заданном отрезке, так и для разных переменных.

Однако по сравнению с многошаговыми методами, например, методом прогноза и коррекции, метод Рунге-Кутты обладает двумя недостатками; это, во-первых, необходимость решения алгебраических уравнений на каждой ступени шага интегрирования и, во-вторых, грубая оценка шаговой и накапливающейся погрешностей [1–3].

Предлагаемая модификация метода Рунге-Кутты частично компенсирует эти недостатки. Уменьшение числа шагов в связи с изменением по ходу расчета их величин, с одной стороны, диагностика алгебраических уравнений, позволяющая на ряде ступеней шага их вообще не решать или решать частично, с другой, значительно сокращает подстановки и решения. Что же касается оценки погрешности расчета, то она зависит от многих факторов, в частности, и от точности интегрирования. Добиваться большой точности в одном элементе расчета, при наличии больших погрешностей в других, нецелесообразно. В этой постановке вопроса метод Рунге-Кутты достаточно точен.

Практический интерес представляет количественная оценка отклонений контролируемых параметров режима от аналогичных для базового расчета, или же полученных по результатам эксперимента, что и предусмотрено в данной работе.

Методика и составленная по ней «Фортран»-программа предусматривают:

а) диагностику алгебраических уравнений с целью выявления необходимости их решения по признаку существенности изменения параметров;

б) диагностику дифференциальных уравнений с аналогичной целью, а также определение необходимого расчетного шага для их решения по признаку скорости изменения параметров;

в) логические операции для выявления момента, начиная с которого те или другие уравнения должны вовлекаться в расчет или исключаться из него.

Диагностика по существенности изменения параметра реализуется путем сравнения признака существенности, т. е. значения приращения параметра на каждой ступени расчета с заданным значением минимального приращения, при превышении которого требуется нахождение нового значения функции. Назовем его порогом чувствительности и обозначим  $EZ$ .

Достаточно одному из признаков превысить соответствующую ве-

личину  $EZ$ , как вычисляется значение функции, а все признаки данного уравнения приравниваются к нулю. В противном случае признаки накапливаются. Для определения значений функций предусмотрены соответствующие подпрограммы  $ZZ(L)$ .

На случай, когда подпрограмма решает подсистему уравнений, например, подпрограмма расчета стационарного режима энергосистемы, алгоритм расчета предусматривает диагностику заданных параметров подсистемы.

Необходимо заметить, что большинство задач расчета электромеханических переходных процессов сопровождается расчетами стационарного режима энергосистемы, где приходится иметь дело с сильно связанными алгебраическими нелинейными уравнениями. В этих случаях целесообразным является разделение расчетной схемы замещения энергосистемы на участки, стационарный режим которых описывается своей подсистемой уравнений. При этом диагностику достаточно производить только относительно параметров узлов сопряжения. Сначала решается подсистема участка, где возникло возмущение. Расчет режима сопряженных участков производится только для тех из них, для которых подтекаемые к узлу мощности существенно изменились. В противном случае эти подсистемы на данной ступени в расчет не вовлекаются.

Решение системы алгебраических уравнений прекращается, когда признаки по всем параметрам и уравнениям не превышают соответствующих значений  $EZ$ . В связи с тем, что каждое алгебраическое уравнение записывается и решается относительно нового переменного, а вычисленные приращения умножаются на коэффициент ускорения сходимости  $KC$ , такая диагностика одновременно обеспечивает итерационный процесс решения систем алгебраических уравнений. Для улучшения сходимости решения порог чувствительности  $EZ$  в процессе счета изменяется. Сначала задается его закругленное значение  $KZ \times EZ$ , ( $KZ$ —коэффициент закругления, может быть принят равным 4, 8, 16), а после получения сходимости  $KZ$  уменьшается в 2 раза и т. д. до значения 1.

Аналогично производится диагностика правых частей дифференциальных уравнений. Здесь также существенность изменения параметра оценивается сравнением ее признака с порогом чувствительности  $EX$ —минимальным приращением, при превышении которого необходимо рассчитать новое значение функции.

Выбор шага численного интегрирования уравнения производится по признаку существенности изменения параметра, относительно которого решено дифференциальное уравнение. Разделяя значение установленного для него порога чувствительности  $EX$  на скорость изменения параметра, и начале каждого шага интегрирования, после округления определяется его значение  $H(I)$  для каждого из дифференциальных уравнений. При этом шаги  $H(I)$  не должны превышать заданные допустимые значения  $H3(I)$ . Каждое уравнение интегрируется своим шагом, начиная с того, у которого он наименьший.

Первая итерация по Рунге-Кутты рассчитывается для всех дифференциальных уравнений, которые по признаку существенности изменения параметра подлежат счету, независимо от величины шага.

Последующие итерации выполняются только для тех уравнений, для которых шаг интегрирования наименьший. Остальные уравнения интегрируются по мере того, как текущее время счета сравнивается с моментом, соответствующим середине и концу шага выбранного для их интегрирования. Возрастание текущего времени носит дискретный характер, поэтому для обеспечения точного совпадения этого времени с моментами произведения очередной итерации осуществляется уточнение шага в случаях, когда это время переходит за моменты.

При каждой итерации диагностируются и, при необходимости, решаются алгебраические уравнения и правые части дифференциальных уравнений. При определении значений параметров в конце шага проверяется их физическая реализуемость, т. е. невыход за допустимые предельные значения.

Для удобства подготовки и ввода информации запись ее формализована. Для пояснения сказанного запишем систему уравнений в следующем виде:

$$\begin{cases} W(L) = ZZ(L), \\ \frac{dY(I)}{dt} = XX(I). \end{cases}$$

При решении задачи предварительно формируются следующие массивы:

1. Массив параметров, относительно которых решены алгебраические уравнения  $W(L)$ , где  $L$  — порядковый номер уравнения.

2. То же, для дифференциальных уравнений  $Y(I)$ , где  $I$  — порядковый номер уравнения.

3. Массив приращений параметров правых частей алгебраических уравнений  $DZ(L, M)$ , где  $M$  — порядковый номер параметра в уравнениях (для начала расчета в качестве приращений берутся начальные возмущения).

4. То же, для дифференциальных уравнений  $DX(I, KK)$ , где  $KK$  — порядковый номер параметра в уравнении.

5. Массив порогов чувствительности изменений параметров алгебраических уравнений  $EZ(L, M)$ .

6. То же, для дифференциальных уравнений  $EX(I, KK)$ .

7. То же, для параметров, относительно которых решены дифференциальные уравнения  $EY(I)$ .

8. Массив максимальных и минимальных допустимых значений параметров, относительно которых решены алгебраические уравнения  $WMAX(L)$ ,  $WMIN(L)$ .

9. То же, для дифференциальных уравнений  $YMAX(I)$ ,  $YMIN(I)$ .



10. Массив максимально допустимых значений шагов интегрирования дифференциальных уравнений  $H3(I)$ .

11. Массив, куда записывается число зависимых параметров правых частей алгебраических уравнений  $NL(L)$ .

12. То же, для дифференциальных уравнений  $NN(I)$ .

13. Массив коэффициентов сходимости итерационного расчета алгебраических уравнений  $KC(L)$ .

14. Массив, куда записывается число алгебраических уравнений, решаемых совместно в подпрограмме  $ZK(L)$ . Для одиночных уравнений принимаем  $ZK(L)=1$ . При наличии подсистемы, для первого ее уравнения  $ZK(L)$  принимается равным их полному числу, а для каждого последующего—на единицу меньше; очевидно, что для последнего уравнения подсистемы  $ZK(L)=1$ .

В программе использованы подпрограммы расчета правых частей алгебраических и дифференциальных уравнений  $ZZ(L)$  и  $XX(I)$ .

В случае, когда  $L$  обходит номера уравнений подсистемы, решаемой одной подпрограммой, ее необходимо дополнить следующими операциями. После завершения расчета, т. е. получения сходимости в подсистеме,  $ZZ(L)$  следует придать значения соответствующих функций подсистемы, а  $L$ —номер первого уравнения подсистемы для перехода к определению приращений функций.

Величины порогов чувствительности выбираются следующим образом.

Задавшись из физических соображений порогом чувствительности одного из основных параметров, остальные определяются в зависимости от него. Например, если для угла « $\delta$ » принять  $E\delta=0,02 \text{ рад}$ , и

$$H3(\delta)=0,04 \text{ сек.}, \text{ то из уравнения } \frac{d\delta}{dt} = \dots \text{ следует } E(m) = \frac{E(\delta)^{\frac{1}{m}}}{H3(\delta)} = \\ = \frac{0,02}{0,04} = 0,5 \frac{\text{рад}}{\text{сек.}}$$

Настоящая программа была апробирована на ряде задач расчетов переходных процессов. При решении задачи, связанной с реализацией резервов мощности на энергоблоке 150 мвт тепловой станции, число расчетов приращений по всем параметрам, включая итерации по методам Рунге-Кутты, составило 2772, наименьший шаг расчета равнялся 0,012 сек., а наибольший—1 сек., исследуемый процесс длился 70 сек. Тот же расчет, произведенный по методу Рунге-Кутты с постоянным шагом, равным 0,012 сек., требует 112000 операций приращений параметров.

Указанный расчет производился также на аналоговых вычислительных машинах путем непрерывного интегрирования. Результаты расчета показали хорошее совпадение количественных показателей.

### Выводы

1. Предложена методика и «Фортран»-программа расчета длительных электромеханических переходных процессов с диагностикой урав-

нений по признакам существенности изменения параметров.

2. Методика позволяет значительно сократить число вычислительных операций при рассмотрении процессов в звеньях с различными постоянными времени и возмущениями. Уменьшение числа шагов расчета при численном интегрировании дифференциальных уравнений позволяет находить более точные решения за счет снижения накапливающейся ошибки и за большого числа шагов.

3. Предложенная «Фортран»-программа, выполненная в виде специализированного блока общей программы расчета длительных электро-механических переходных процессов, используется для решения различных этапов процесса, описываемых различным составом уравнений. Необходимая для решения каждого этапа информация составляется предварительно в виде соответствующих массивов и совместно с подпрограммами расчета значений функций привлекается к расчету при решении данного этапа.

4. «Фортран»-программа может быть использована для решения задач, математическая модель которых содержит алгебраические и дифференциальные уравнения и для своего решения предполагает использование метода Рунге-Кутты, причем отличие постоянных времени обуславливает необходимость выбора различных переменных шагов интегрирования.

ЕрIII им. К. Маркса

Получено 13. IV. 1977.

#### Պ. Ա. ՀԱՅՐԱՊԵՏՅԱՆ

ԵՐԿԱՐԱՏԵՎ ԷԼԵԿՏՐՈՄԵԽԱՆԻԿԱԿԱՆ ԱՆՑՈՂԻՊ ՊՐՈՑԵՍՆԵՐԻ  
ՀԱՇՎԱՐԿԻ ՄԵԹՈԴԻԿԱ ՀԱՎԱՍԱՐՈՒՄՆԵՐԻ ԳԻՄՆՈՒՄՏԻՎԱՅԻՆ  
ՐՈՏ ՊԱՐԱՄԵՏՐՆԵՐԻ ՓՈՓՈԽՄԱՆ ԷԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՀԱՏԿԱՆԻՇՆԵՐԻ

#### Ա Վ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Նախարկված են երկարատև էլեկտրամեխանիկական անցուղիկ պրոցեսների հաշվարկի մեթոդիկա և «նորարան» ծրագիր հաշվասարույթների դիագնոստիկայով՝ րոտ պարամետրերի փոփոխման էականության հատկանիշների մեթոդիկան նախատեսում է ինտեգրման բաշի փոփոխում ինչպես տրված հատվածում, այնպես էլ տարբեր փոփոխականների համար, որը բերում է հաշվարկային զործողությունների թվի զգալի կրճատման՝ տարբեր ժամանակի հատաատումներ և խոտորումներ ունեցող օղակներում պրոցեսների դիտարկման ժամանակ:

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Кирпичников Н. А. Метод малого параметра как средство упрощения задач устойчивости энергосистем. Тр. ВНИИЭ, вып. XXIV, М., 1966.
2. Тоханин Е. К. К ускорению численного интегрирования уравнений переходного процесса. Тр. ВНИИЭ, вып. XXIV, М., 1966.
3. Исследование алгоритмов численного интегрирования, используемых для анализа динамической устойчивости энергосистем. «Экспресс-информация. Электрические станции, сети и системы», 1974, № 44.