

УДК 519.622.2

О численном моделировании некоторой электроэнергетической системы

Чадов С.Н., Москвин И.А, аспиранты

Рассмотрена модель энергосистемы, состоящей из нескольких генераторов, работающих на общую нагрузку, и системы автоматического регулирования. Приводятся математическое описание модели, результаты моделирования. Рассматриваются подходы к параллельной реализации численного эксперимента.

Ключевые слова: модель ЭЭС, параллельное программирование.

On Numerical Simulation of a Power System

S.N. Chadov, I.A. Moskvina, Post-Graduate Students

This article describes a model of a power system consisting of several generators, some load and an automatic control system. The mathematical model is given, as well as some modeling results, a parallel numeric solution is considered in the article.

Keywords: Power system model, parallel programming.

Введение. Если возникает необходимость рассмотреть крупную и сложную энергетическую систему с большим количеством машин, линий и нагрузок и проанализировать ее реакцию на какое-либо возмущение, то, на первый взгляд, такая попытка может оказаться безнадежной. Однако значения постоянных времени протекания различных процессов могут существенно различаться, что позволяет выделить определенные элементы, в наибольшей степени влияющие на эти процессы. В математическую модель ЭЭС должны быть включены те элементы, которыми определяется ускорение (или торможение) роторов синхронных машин. Сложность модели зависит от вида переходного процесса и исследуемой системы. Вообще говоря, в модели должны найт отражение параметры элементов системы, которые влияют на электрические и механические моменты машин, а именно:

- параметры электрической сети до переходного процесса, в процессе и после него;
- нагрузки и их характеристики;
- параметры синхронных машин;
- параметры систем возбуждения синхронных машин;
- параметры турбин и их автоматических регуляторов частоты вращения;
- параметры других важных элементов электростанций, влияющих на величину механического момента турбины;
- параметры других дополнительных систем регулирования, таких как, например, регуляторы перетока по межсистемным связям, необходимые при математическом описании системы.

Таким образом, для исследования устойчивости энергосистемы необходимо знать начальные условия до возникновения переходного процесса и иметь математическое описание основных ее элементов, определяющих реак-

цию синхронных машин на возникшее возмущение. Число элементов, учитываемых при анализе устойчивости, и сложность их математического описания зависят от многих факторов. Однако, как правило, для описания различных элементов используются дифференциальные уравнения. Методы исследования устойчивости энергосистемы зависят от вида этих дифференциальных уравнений.

Энергосистема устойчива, если синхронные машины в ней после возникшего возмущения или вернутся в первоначальное состояние, или асимптотически перейдут в новое состояние без нарушения синхронизма. Обычно возмущение вызывает переходный процесс, который в действительности носит колебательный характер, но если система устойчива, то колебания затухнут. Ниже производится оценка устойчивости синхронной машины на основе характера изменения ее угла.

Модель системы. Составляется схема замещения электроэнергетической системы (ЭЭС) с представлением синхронных генераторов переходными параметрами E' , X'_d , а нагрузок – постоянными сопротивлениями Z_H . Режим схемы ЭЭС (рис. 1) определяется величинами ЭДС генераторов и углами этих ЭДС.

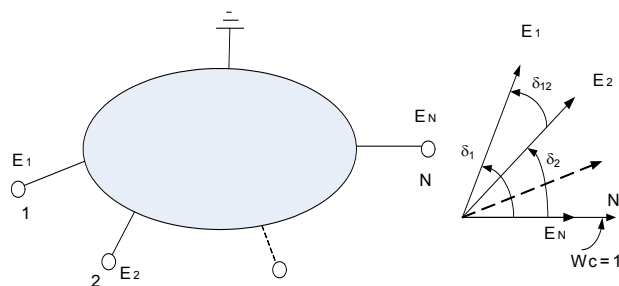


Рис. 1. Схема замещения ЭЭС с N генераторами

Записываем систему уравнений переходного режима для каждого i -го генератора (уравнения движения ротора):

$$\begin{cases} \frac{dS_i}{dt} = \frac{1}{T_{j(\delta)_i}} \left(\frac{P_{Ti} - P_i}{\omega_i} - D_{(\delta)_i} S_i \right), \\ \frac{d\delta_i}{dt} = 360f_H S_i, \end{cases}$$

где S_i – скольжение, о.е.; $T_{j(\delta)_i}$ – постоянная инерции, с; P_{Ti} – мощность турбины, о.е.; P_i – электромагнитная мощность, о.е.; $D_{(\delta)_i}$ – коэффициент демпфирования, о.е.; ω_i – угловая скорость ротора, о.е.; δ_i – угол положения ротора и ЭДС, эл. град.; t – время, с; f_H – номинальная частота, соответствующая синхронной скорости, Гц.

Угловая скорость ротора определяется как

$$\omega_i = S_i + \omega_c,$$

Регулятор скорости турбины в простейшем представлении можно описать уравнениями

$$\begin{cases} P_{Ti} = P_{T0i} + \Delta P_{Ti}, \\ \frac{d\Delta P_{Ti}}{dt} = -\frac{1}{T_{pci}} \left(\frac{1}{\sigma} + \Delta P_{Ti} \right), \end{cases}$$

где T_{pci} – постоянная времени регулятора, с; σ – статизм регулирования, о.е.; P_{T0i} – начальное значение мощности турбины, определяемое из исходного режима $P_{T0i} = P_{0i}$, о.е.

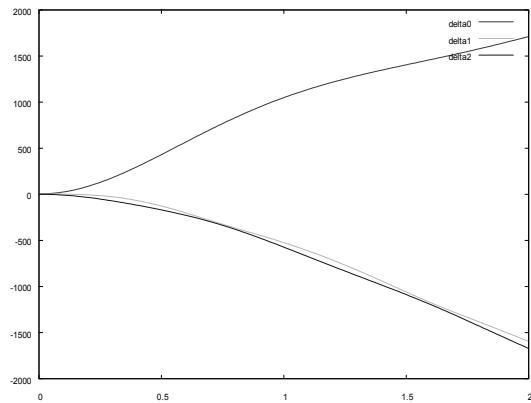
Электромагнитная мощность определяется угловыми характеристиками:

$$P_i = E_i^2 y_{ii} \sin \alpha_{ii} + \sum_{\substack{S=1 \\ S \neq i}}^N E_i E_S y_{iS} \sin(\delta_{iS} - \alpha_{iS}),$$

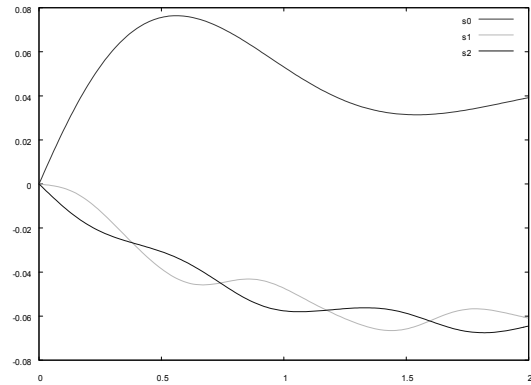
где все углы выражены в градусах, а все остальные величины в относительных единицах. При этом $\delta_{iS} = \delta_i - \delta_S$, $E_i = \omega_i E_{0i}$.

Таким образом, имеем $3N$ дифференциальных уравнений для N генераторов.

Численное решение. В случае небольшого числа генераторов получившаяся система легко решается любым численным методом. Одно из возможных решений для системы из 3-х генераторов приведено на рис. 2. Однако с ростом количества генераторов пропорционально возрастают и вычислительные затраты на моделирование. Возникает необходимость параллельного решения такой системы. Несложно заметить, что в большей части уравнений i -му уравнению требуются только i -е элементы векторов. Такие уравнения можно вычислять параллельно. Единственное уравнение, требующее знания всего множества значений (а значит, при простейшей реализации – некоторой формы межпроцессной коммуникации), – уравнение вычисления P_i .



а)



б)

Рис. 2. Результаты моделирования работы 3-х генераторов: а – графики δ_i ; б – S_i

Для машин с общей памятью это вызывает лишь незначительные потери производительности из-за потери локальности данных и, соответственно, приводит к большему числу кэш-промахов при чтении из памяти. Однако для машин с разделенной памятью или графических процессоров общего назначения это представляет собой серьезную проблему. Более того, для реализации на графических процессорах функция вычисления P_i имеет еще одну неприятную особенность: необходимость вычисления тригонометрических функций. Аппаратная реализация современных графических процессоров такова, что обычно за вычисление так называемых специальных функций (т. е. тригонометрических, степенных и т.п.) отвечают специальные устройства, количество которых значительно меньше количества доступных потоковых процессоров. Так, у GPU NVIDIA один блок SFU (special function unit) обслуживает 8 потоковых процессоров. [4] Представляет интерес возможность использования аппаратной билинейной интерполяции текстурных блоков для реализации таблицы синусов [4], однако будет ли такой подход иметь преимущества перед встроенными функциями, могут показать только эксперименты.

Результаты. Мы реализовали решение описанной модели несколькими явными численными методами как в однопроцессорном, так и в многопроцессорном варианте для раз-

личного числа генераторов. Начальные условия были выбраны во многом произвольно, что ограничивает практическую ценность данной модели. Параллельный вариант был реализован на четырехъядерном процессоре Intel Core i5 750 при помощи библиотеки Intel TBB [5]. Результаты решения для $N = 3, 24, 192$ приведены в таблице. Можно видеть, что распараллеливание дает значительный эффект, однако имеется возможность для дальнейшей оптимизации, поскольку полученное ускорение значительно ниже теоретически максимального.

Производительность программы при различных N

N	1 процессор	4 процессора	Ускорение
3	1126	1824	0,67
24	38124	20256	1,88
192	1029133	518127	1,98

Чадов Сергей Николаевич,
 ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
 аспирант кафедры высокопроизводительных вычислительных систем,
 e-mail: sergei.chadov@gmail.com

Москвин Илья А.,
 ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
 аспирант кафедры электрических систем,
 e-mail: moskvin_ilya@mail.ru

В дальнейшем планируется реализация решения данной системы на графическом процессоре общего назначения, а также исследование более жестких режимов.

Список литературы

1. **Братолобов А.А., Огорельшев Н.А., Аржанникова А.Е.** Применение ЭВМ в учебных расчетах коротких замыканий и устойчивости электроэнергетических систем: Учеб. пособие / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2006.
2. **Братолобов А.А.** Расчетные параметры синхронных машин. – Иваново, 2008.
3. **Андерсон П., Фуад А.** Управление энергосистемами и устойчивость: Пер. с англ. / Под общ. ред. Я.Н. Лугинского. – М.: Энергия, 1980.
4. **NVIDIA.** CUDA Programming Guide. 2.1 edition, 2009.
5. Intel Threading Building Blocks. <http://www.threadingbuildingblocks.com/>