

Система последовательно упрощаемых математических моделей электроэнергетических систем для расчета электромеханических переходных процессов

ФОМИНА Т.Ю.

На основе полной модели разработана система последовательно упрощаемых математических моделей электроэнергетических систем (ЭЭС) для расчета электромеханических переходных процессов, определены области применения упрощенных моделей и критерии перехода на эти модели. Переходный процесс в электроэнергетической системе условно разбивается на три этапа, для каждого из этапов используется соответствующая расчетная модель:

Первый этап соответствует переходному процессу до затухания электромагнитных переходных процессов в обмотках статора и элементах электрической сети. На первом этапе расчет переходного процесса ведётся по полной модели с маленьким шагом интегрирования. Второй этап моделирует переходный процесс от затухания электромагнитных переходных процессов до начала общего движения синхронных машин в энергосистеме. Третий моделирует общее движение синхронных машин в энергосистеме после затухания взаимных качаний. Проведены расчеты для тестовой схемы, в том числе расчеты с увеличенным шагом интегрирования. Показано, что использование упрощенных описаний ЭЭС для различных этапов переходного процесса допустимо и целесообразно.

Ключевые слова: *электроэнергетические системы, длительные переходные процессы, математическое моделирование, упрощенные модели*

Утяжеление режимов и их разнообразие в современных электроэнергетических системах приводит к увеличению объема расчетов электромеханических переходных процессов и динамической устойчивости. Увеличение расчетного интервала времени [1] предъявляет особые требования к скорости счета и погрешности, которые ужесточаются, если используются более сложные математические модели элементов систем.

Сложность этой задачи можно снизить, воспользовавшись иерархическим представлением последовательно упрощаемых моделей ЭЭС. Темой статьи является разработка алгоритма, отличительной особенностью которого является декомпозиция математической модели ЭЭС в соответствии с разнотемповостью отдельных составляющих переходных процессов.

Следует отметить, что предложенный алгоритм позволяет учесть электромагнитные переходные процессы на начальном интервале расчета, когда их влияние наиболее значительно, без существенного увеличения длительности расчета за счет применения различных моделей и шагов интегрирования на разных этапах переходного процесса.

Упрощенные описания ЭЭС и критерии перехода на эти описания. В полной модели ЭЭС учитываются как быстрые электромагнитные, так и медленные электромеханические переходные процессы. Эти процессы являются разнотемповыми, поэтому

полученная система уравнений для полной модели является жесткой.

Для учета электромагнитных процессов и систем автоматического регулирования необходимо использовать малый шаг интегрирования системы уравнений, в то время как электромеханические процессы нужно рассматривать на длительном интервале времени. Поэтому для получения решения по полной модели необходимо численно интегрировать дифференциальные уравнения с очень малым шагом, что приводит к замедлению скорости расчетов. Увеличение шага интегрирования приведет к возрастанию погрешности вычислений, так как при использовании шага, соизмеримого с постоянными времени быстрых процессов, эти процессы будут рассчитаны с большой погрешностью. Для решения этих проблем предлагается применить систему последовательно упрощаемых моделей ЭЭС, а переходный процесс разделить на этапы и в соответствии с этими этапами использовать ту или иную упрощенную модель. Упрощенные описания ЭЭС будут получены на основе полной модели при определенных допущениях.

Переходный процесс в электроэнергетической системе можно условно разбить на три этапа.

1-й этап (от начала переходного процесса – возмущения до 0,1–3 с) моделирует переходный процесс до затухания электромагнитных переходных процессов в обмотках статора и элементах электрической сети. На этом этапе расчет переход-

ного процесса ведётся по полной модели и с маленьким шагом интегрирования (порядка 0,0001–0,005 с). Под полной математической моделью ЭЭС для расчета электромеханических переходных процессов будем понимать такую математическую модель, в которой:

учтены как электромеханические, так и электромагнитные переходные процессы;

учитывается изменение частоты в переходном процессе;

учитывается действие систем автоматического регулирования элементов ЭЭС.

Расчет по полной модели на первом этапе позволяет наиболее точно оценить колебания электромагнитных моментов синхронных машин и, соответственно, смоделировать процесс протекания электромеханического переходного процесса с минимальными погрешностями.

В качестве полной математической модели синхронной машины будем использовать уравнения Горева–Парка в их обычной форме [2–4], учитывающие как электромеханические, так и электромагнитные переходные процессы. Критерием окончания данного этапа является снижение значений производных потокосцепления обмоток статоров синхронных машин:

$$\left| \frac{dy_{di}}{dt} \right| < \epsilon_1, \quad \left| \frac{dy_{qi}}{dt} \right| < \epsilon_1 \quad (1)$$

и производных токов и напряжений в элементах сети:

$$\left| \frac{dU_{di}}{dt} \right| < \epsilon_1, \quad \left| \frac{dU_{qi}}{dt} \right| < \epsilon_1, \quad \left| \frac{dI_{di}}{dt} \right| < \epsilon_1, \quad \left| \frac{dI_{qi}}{dt} \right| < \epsilon_1, \quad (2)$$

где $\epsilon_1 = 0,01, 0,10\%$ – заданная погрешность перехода на второй этап.

В алгоритме на каждом шаге расчета выполнение условий $\left| \frac{dX_i}{dt} \right| < \epsilon_1$ проверяется по снижению правой части соответствующих дифференциальных уравнений ниже заданной погрешности $|f(X, Y, t)| < \epsilon_1$.

Погрешность задается в процентах относительно текущего значения максимального слагаемого правой части $f(X, Y, t)$ соответствующего дифференциального уравнения, таким образом численное значение погрешности не зависит от того, в каких единицах (именованных или относительных) ведется расчет.

2-й этап (от 0,1–3 с до 5–15 с) моделирует переходный процесс от затухания электромагнитных переходных процессов до начала общего движения

синхронных машин в энергосистеме (затухания взаимных качаний генераторов).

На этом этапе производные потокосцеплений обмоток статора синхронных машин и производные токов и напряжений в элементах сети (трансформаторные ЭДС) принимаются равными нулю. Таким образом, соответствующие дифференциальные уравнения системы, описывающие сеть и переходные процессы в статорных обмотках синхронных машин и элементах сети, становятся алгебраическими. Необходимо отметить, что уравнения переходного процесса в обмотках ротора, в частности в обмотке возбуждения, останутся дифференциальными, так как постоянные времени указанных процессов существенно больше постоянных времени электромагнитных процессов в статорных обмотках и элементах сети. Исключение части дифференциальных уравнений и соответствующее снижение жесткости системы позволяют использовать в расчете на втором этапе больший шаг интегрирования 0,01, 0,05 с. Критерием окончания переходного процесса второго этапа является близость скоростей вращения и ускорений роторов синхронных машин:

$$\begin{aligned} \left| \frac{w_1 - w_2}{w_{\text{НОМ}}} \right| 100\% < \epsilon_{2,1}, \quad \left| \frac{w_1 - w_3}{w_{\text{НОМ}}} \right| 100\% < \epsilon_{2,1}, \dots, \\ \left| \frac{w_1 - w_N}{w_{\text{НОМ}}} \right| 100\% < \epsilon_{2,1}, \\ \left| \frac{dw_1}{dt} - \frac{dw_2}{dt} \right| 100\% < \epsilon_{2,1}, \quad \left| \frac{dw_1}{dt} - \frac{dw_3}{dt} \right| 100\% < \epsilon_{2,1}, \dots, \\ \left| \frac{dw_1}{dt} - \frac{dw_N}{dt} \right| 100\% < \epsilon_{2,1} \end{aligned} \quad (3)$$

и затухание переходных процессов в регуляторах возбуждения синхронных машин, определяемое по снижению правых частей соответствующих дифференциальных уравнений:

$$|f(X, Y, t)| < \epsilon_{2,2}, \quad (4)$$

где $\epsilon_{2,1} = 0,004, 0,008\%$, $\epsilon_{2,2} = 5–10\%$ – заданные погрешности перехода на третий этап: N – число синхронных машин в рассматриваемой энергосистеме.

Погрешность $\epsilon_{2,2}$ задается в процентах относительно текущего значения максимального слагаемого правой части $f(X, Y, t)$ соответствующего дифференциального уравнения. Таким образом, численные значения погрешностей $\epsilon_{2,1}$ и $\epsilon_{2,2}$ также не

зависят от того, в каких единицах ведется расчет (в именованных или относительных).

Близость ускорений роторов синхронных машин определяется по близости правых частей соответствующих уравнений:

$$\frac{\frac{1}{T_{J1}}(M_{m1} - M_1) - \frac{1}{T_{J2}}(M_{m2} - M_2)}{w_{НОМ}} 100\% < e_{2,1};$$

$$\frac{\frac{1}{T_{J1}}(M_{m1} - M_1) - \frac{1}{T_{J3}}(M_{m3} - M_3)}{w_{НОМ}} 100\% < e_{2,1}; \quad (5)$$

.....

$$\frac{\frac{1}{T_{J1}}(M_{m1} - M_1) - \frac{1}{T_{JN}}(M_{mN} - M_N)}{w_{НОМ}} 100\% < e_{2,1}$$

3-й этап (от 5–15 с до затухания переходного процесса) моделирует общее движение синхронных машин в энергосистеме (после затухания взаимных качаний). На этом этапе принимаем, что скорости и ускорения вращения роторов всех N синхронных машин энергосистемы равны:

$$w_1 = w_2 = \dots = w_N; \quad (6)$$

$$\frac{dw_1}{dt} = \frac{dw_2}{dt} = \dots = \frac{dw_N}{dt}. \quad (7)$$

Из системы дифференциальных и алгебраических уравнений второго этапа дополнительно исключаются уравнения вида $\frac{dd_{ij}}{dt} = w_i - w_j$, определяющие изменение угла между роторами соответствующих машин. Также на третьем этапе снижается число переменных – переменные w_1, w_2, \dots, w_N заменяются одной переменной w , соответственно, все уравнения движения ротора синхронных машин заменяются одним уравнением $\frac{dw}{dt} = \frac{1}{T_{J1}}(M_{m1} - M_1)$, но вводятся дополнительные алгебраические уравнения, характеризующие равенство небалансов на валу роторов всех синхронных машин энергосистемы:

$$\frac{1}{T_{J1}}(M_{m1} - M_1) - \frac{1}{T_{J2}}(M_{m2} - M_2) = 0;$$

$$\frac{1}{T_{J1}}(M_{m1} - M_1) - \frac{1}{T_{J3}}(M_{m3} - M_3) = 0;$$

.....

$$\frac{1}{T_{J1}}(M_{m1} - M_1) - \frac{1}{T_{JN}}(M_{mN} - M_N) = 0. \quad (8)$$

Установившееся значение частоты w будет частотой нового установившегося режима в случае сохранения устойчивости системы.

На 3-м этапе затухают переходные процессы в регуляторах возбуждения синхронных машин, из системы уравнений удаляются соответствующие уравнения.

Для расчета на 3-м этапе может быть использован шаг интегрирования порядка 0,01–0,1 с.

Длительность каждого этапа переходного процесса определяется параметрами рассматриваемой энергосистемы и её режимом, а также значением и типом возмущения. В процессе расчета на длительность этапов также оказывают влияние заданные погрешности $e_1, e_{2,1}, e_{2,2}$ и значение шага интегрирования.

Для оценки допустимости перехода на упрощенные модели и возможности использования увеличенного шага интегрирования, подтверждения правильности выбора критериев перехода с одной модели на другую были проведены проверочные расчеты, сравнение полученных результатов с результатами расчета по полной модели, принятой за эталонную.

Для исследования в качестве тестовой схемы использована шестимашинная схема ЭЭС института «ЭНЕРГОСЕТЬПРОЕКТ», которая состоит из шести синхронных машин, моделирующих генераторы электростанций разной мощности и синхронный компенсатор, трансформаторов, линий электропередачи, реактора и эквивалентных нагрузок, представляемых постоянными сопротивлениями (см. рис. 1).

Генератор $G1$ тестовой схемы представляет мощную гидроэлектростанцию, генераторы $G2$ и $G3$ моделируют тепловую электростанцию малой мощно-

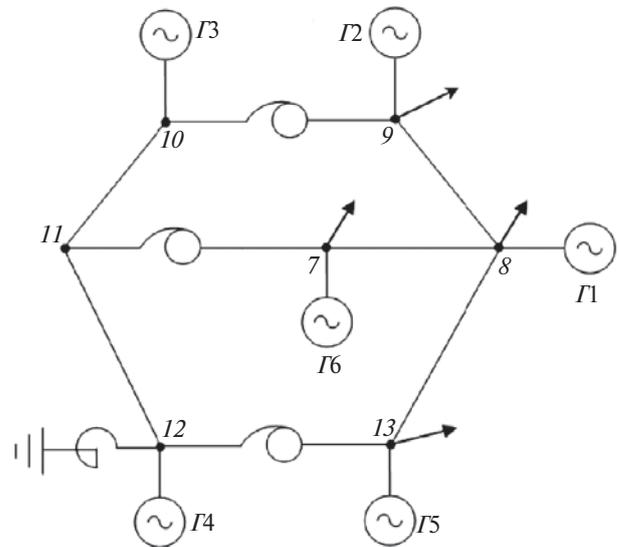


Рис. 1. Шестимашинная тестовая схема ЭЭС: ВЛ 10–11, 11–12 – $U_{НОМ} = 500$ кВ; ВЛ 7–8, 8–9, 8–13 – $U_{НОМ} = 220$ кВ

сти, агрегаты которой работают на линии электропередачи разного номинального напряжения 500 и 220 кВ, генераторы $G4$ и $G5$ моделирует мощную тепловую электростанцию, агрегаты которой также работают на линии электропередачи разного напряжения, с помощью $G6$ моделируются синхронные компенсаторы, установленные на узловой подстанции. Особенностью схемы является удаленность мощной тепловой станции ($G4$, $G5$) от крупных узлов нагрузки 7, 8 и в связи с этим — необходимость передавать большую мощность по относительно слабым связям (8–13, 11–12).

Переходный процесс в рассматриваемой энергосистеме описывается системой алгебраических и дифференциальных уравнений. В качестве математической модели для синхронных машин используются уравнения Горева–Парка. В расчетах учитываются как электромеханические, так и электромагнитные переходные процессы. Для расчета переходных процессов разработана программа на ЭВМ, реализующая неявный метод трапеций для алгебраизации дифференциальных уравнений на шаге интегрирования и метод Ньютона для решения системы нелинейных алгебраических уравнений. Для решения системы линеаризованных уравнений на каждом шаге метода Ньютона используется метод Гаусса, как наиболее простой, производительный и точный.

Для того чтобы повысить эффективность метода трапеций, для алгебраизации дифференциальных уравнений на первом шаге интегрирования применяется неявный метод Эйлера [5, 6].

Пример. Расчет переходного процесса в шестимашинной схеме, при изменении активного сопротивления нагрузки в узле 8. Для удобства в расчет вводится коэффициент изменения активного сопротивления нагрузки; данный коэффициент соответствует уменьшению активного сопротивления нагрузки в узле 8 на 10%.

Первый этап переходного процесса. Затухание электромагнитных колебаний. Расчет на первом этапе предлагается вести по полной модели. Однако если не требуется учет влияния колебаний электромагнитных моментов синхронных машин, происходящих в первые доли секунд после возмущения, допускается сразу переходить к расчетам по упрощенной модели второго этапа (см. рис. 2).

На рис. 3 показано, что указанное допущение не приводит к значительному увеличению погрешности результатов на длительном интервале расчета (20 с).

Второй и третий этапы переходного процесса. Затухание взаимных качаний синхронных машин и начало общего движения. На рис. 4 представлены

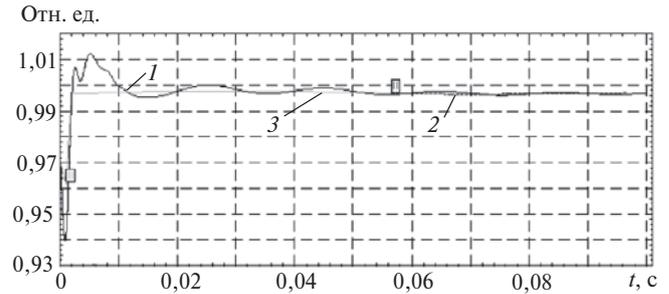


Рис. 2. Электромагнитный момент генератора $G1$ M_{G1} ($K_{H8} = 0,9$): 1 — расчет по полной модели, шаг интегрирования 0,0001 с; 2 — от 0 до 0,057 с расчет по полной модели (модель 1-го этапа), шаг интегрирования 0,0001 с, далее расчет по модели 2-го этапа, шаг интегрирования 0,01 с, погрешность перехода; 3 — расчет по упрощенной модели 2-го этапа, шаг интегрирования 0,001 с

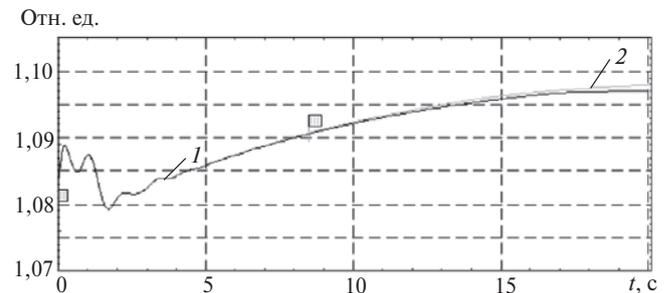


Рис. 3. Напряжение статора U_1 ($K_{H8} = 0,9$): 1 — расчет по полной модели, шаг интегрирования 0,001 с; 2 — от 0 до 8,5 с расчет по модели 2-го этапа, шаг интегрирования 0,01 с, далее расчет по модели 3-го этапа, шаг интегрирования 0,1 с, погрешность перехода $e_{2,1} = 0,005\%$, $e_{2,2} = 10\%$

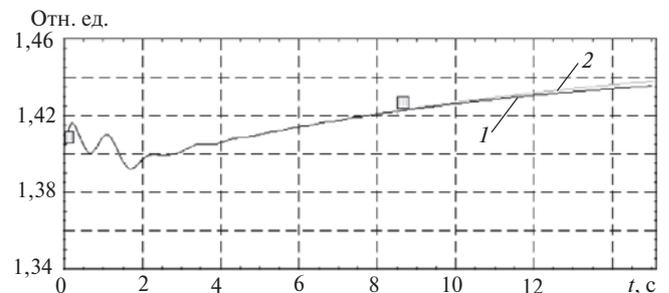


Рис. 4. Активная мощность нагрузки в узле 8 — P_{H8} ($K_{H8} = 0,9$): 1 — расчет по полной модели, шаг интегрирования 0,001 с; 2 — расчет по упрощенным моделям, на первом этапе шаг интегрирования — 0,001 с, на 2-м этапе 0,01 с, на 3-м этапе 0,1 с

результаты расчетов по полным и упрощенным моделям, за эталонный принят расчет по полной модели с шагом интегрирования 0,001 с.

Время начала 2-го этапа, в данном случае $t_{H2} = 0,057$ с (цифра «II»), время начала 3-го этапа, в данном случае $t_{H3} = 8,5$ с (цифра «III»). Погрешность перехода на 2-й этап расчета выбрана равной $e_1 = 0,07\%$, погрешности перехода на 3-й этап расчета выбраны равными $e_{2,1} = 0,005\%$, $e_{2,2} = 10\%$.

Результаты расчета показали (см. рис. 4), что погрешность расчета при использовании системы последовательно упрощаемых моделей, даже при увеличении шага интегрирования на 2-м и 3-м эта-

пах, невелика (не превышает 5%), при этом использование упрощенных моделей позволяет сократить время расчета длительных переходных процессов в пять и более раз.

Вывод. Использование упрощенных описаний ЭЭС для различных этапов переходного процесса допустимо и целесообразно. Расчет по упрощенным моделям второго и третьего этапов не приводит к искажению результатов расчета на интервале 0,1 – 20 с. Увеличение шага интегрирования до 0,01 с на 2-м этапе и до 0,1 с на 3-м этапе не приводит к заметному увеличению погрешности вычислений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лукашов Э.С., Калужный А.Х., Лизалек Н.Н., Соколов Ю.В. Моделирование и расчет длительных переходных процессов в сложных энергосистемах при больших небалансах мощности. — Электричество, 1981, № 2, с. 5–10.

2. Лебедев С.А., Жданов П.С., Городский Д.А., Кантор Р.М. Устойчивость электрических систем. — М.;Л.: ГЭИ, 1940, 304 с.

3. Страхов С.В. Переходные процессы в электрических цепях, содержащих машины переменного тока. — М.;Л.: ГЭИ, 1960, 247 с.

4. Строев В.А., Голов П.В. Модели для исследования переходных процессов в сложной регулируемой ЭЭС. — Изв. РАН, Энергетика, 2010, № 6, с. 66–74.

5. Жук Д.М., Маничев В.Б., Ильницкий А.О. Методы и алгоритмы решения дифференциально-алгебраических уравнений для моделирования систем и объектов во временной области. — Информационные технологии, 2010, № 7, с. 16–24; № 8, с. 23–26.

6. Фомина Т.Ю. Расчет длительных переходных процессов в энергосистеме при моделировании регуляторов с помощью дискретной формы интеграла Дюамеля. — Вестник МЭИ, 2013, № 4, с. 83–89.

[19.02.14]

Автор: Фомина Татьяна Юрьевна в 2010 г. окончила Институт электроэнергетики Национального исследовательского университета «Московский энергетический институт». Ведущий специалист ОАО «ИНСТИТУТ «ЭНЕРГОСЕТЬПРОЕКТ».

The System of Sequentially Simplified Electric Power System Models for Calculating Electromechanical Transients

T. Yu. FOMINA

A system of sequentially simplified models of an electric power system intended for calculating electromechanical processes in it is developed proceeding from the power system's full model. A transient in the electric power system is conditionally subdivided into three stages, and the suitable mathematical model is used for each of the stages.

The first stage corresponds to the transient that lasts to the decay of electromagnetic processes in the stator windings and in the electric network elements. In the first stage, the transient is calculated according to the full model and with a small integration step. In the second stage, the transient from the decay of electromagnetic transients to the onset of common motion of synchronous machines in the power system is simulated. In the third stage, common motion of synchronous machines in the power system after the decay of their mutual swings is simulated.

The calculation results obtained for the test power system configuration are presented, including those carried out with an increased integration step. It is demonstrated that the use of simplified descriptions of an electric power system for different intervals of a transient is acceptable and advisable.

Key words: *electric power systems, transients, mathematical modeling, simplified models*

REFERENCES

1. Lukashov E.S., Kalyuzhnyi A. Kh., Lizalek N.N., Sokolov Yu.V. *Elektrichestvo (Electricity)*, 1981, № 2, pp. 5–10.

2. Lebedev S.A., Zhdanov P.S., Gorodskii D.A., Kantor R.M. *Ustoichivost' elektricheskikh system (Stability of electrical systems)*. Moscow. Leningrad. Publ. Gosenergoizdat, 1940, 304 p.

3. Strakhov S.V. *Perekhodnye protsessy v elektricheskikh tsepyakh, sodержashchikh mashiny peremennogo toka (Transients in Electric*

Circuits Containing AC Machines). Moscow. Leningrad. Publ. Gosenergoizdat, 1960, 247 p.

4. Stroyev V.A., Golov P.V. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii nauk. Energetika (News of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering)*, 2010, № 6, pp. 66–74.

5. Zhuk D.M., Manichev V. B., Il'nikskii A.O. *Informatsionnye tekhnologii (Information Technology)*, 2010, № 7, pp. 16–24; № 8, pp. 23–26.

6. Fomina T.Yu. *Vestnik MEI (Bulletin of the MPI)*, 2013, № 4, pp. 83–89.

Author: Fomina Tatiana Yurievna graduated from Institute of Electrical Power Engineering of National Research University «Moscow Power Engineering Institute» (NRU MPEI) in 2010. She is a Leading Specialist in the JSC «ENERGOSETPROEKT».

