

## РАЗРАБОТКА МИНИМАЛЬНОЙ СЛОЖНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ АНАЛИЗА ДЛИТЕЛЬНЫХ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭНЕРГОСИСТЕМАХ

*Заболотный И.П., Диа Ибрагим*

Решение проблемы надежности электрических систем в переходных режимах требует разработки программного обеспечения, позволяющего моделировать длительные переходные процессы, вызванные отказами и повреждениями силового оборудования и устройств противоаварийной автоматики.

Дальнейшее совершенствование математического обеспечения должно основываться на обобщении основ применяемых методов и использовании системы взаимосвязанных математических моделей (от наиболее полных до простейших), позволяющих адекватно отразить все исследуемые процессы в их многообразии.

Полная математическая модель электроэнергетической системы [1] включает уравнения переходных процессов синхронных и асинхронных машин, дифференциальные или алгебраические уравнения для электрической сети, уравнения различных систем регулирования.

В [1] отмечается, что применение строгих методов к анализу полной математической модели целесообразно для простых схем. Для сложных электроэнергетических систем целесообразно изучение усредненных процессов с разделением полного движения на быстрые и медленные составляющие.

Используемые при проектировании и эксплуатации программы анализа переходных процессов в сложных электрических системах реализуют классическую модель [1, 2]. При анализе динамической устойчивости решаются уравнения движения, записанные для многомашинной системы, в которых динамические свойства генераторов, являющихся наиболее сложными элементами электрических систем учитываются в дифференциальных уравнениях в виде коэффициента  $P_d$  (демпферный момент). Достоинством этих программ является возможность моделирования переходных процессов в сложных системах. Недостатком является: упрощенный учет физических процессов, происходящих в роторах синхронных и асинхронных машин. При моделировании длительных переходных процессов возможны значительные погрешности; наличие этапа составления расчетных схем замещения вручную; использование отдельных, не связанных между собой, модулей для расчетов установившегося режима, статической и динамической устойчивости; упрощенный интерфейс пользователя, что затрудняет работу с программным обеспечением и, как следствие, возрастает вероятность появления ошибок пользователя; практически не моделируется работа РЗА. Это не позволяет исследовать живучесть электрической систе-

мы. Нет возможности имитировать повреждения отдельных узлов устройств РЗА. Эта модель не позволяет выполнять анализ длительных переходных процессов в сложных системах с необходимой точностью [3].

Известны научные разработки, в которых необходимое для современной эксплуатационной практики повышение достоверности анализа режимов энергосистем достигается применением методов, основанных на использовании функциональных характеристик, описывающих динамические свойства элементов систем. Например, для генераторов как основных элементов системы, определяющих динамику изменения параметров режима при возмущениях, в качестве функциональных характеристик используются амплитудно-фазовые частотные характеристики, передаточные функции, переходные функции сопротивлений и проводимостей и многоконтурные схемы замещения [4-7]. Обычно такие программы предназначены для анализа отдельных видов аномальных режимов. Повышение быстродействия и сокращение необходимого объема памяти ПЭВМ при построении алгоритмов анализа переходных процессов в сложных энергосистемах связаны с применением специальных форм вычисления интегралов свертки при применении численных форм интеграла Дюамеля или ряда Вольтерра [6]; с применением рекуррентных соотношений для полученных алгебраических уравнений [5]. Эти разработки не нашли распространения в эксплуатационной и проектной практике из-за большого объема исходной информации, причем не всегда легко получаемой; неудобства работы с пакетами; необходимости расчета предшествующих режимов по другим программам и др.

В ряде работ на основании моделирования переходных процессов в генераторе установлено:

- моделирование массива ротора по каталожным данным связано с большими погрешностями;
- достаточно точно массив ротора эквивалентуется тремя демпферными контурами, полученными по экспериментальным частотным характеристикам;
- наибольшее распространение при моделировании получили многоконтурные схемы замещения с постоянными сопротивлениями;
- каждый демпферный контур учитывается в модели генератора дифференциальным уравнением.

В [8] приведены выражения для расчета переходных процессов в машинах переменного тока по частотным характеристикам с использованием графических построений.

В настоящей работе в результате несложных преобразований выражений из [8] при пренебрежении апериодическими слагающими и при использовании обозначений:



$$A(js) = 0.5[y_d(js) + y_q(js)] = A1(s) + jA2(s);$$

$$B(js) = 0.5[y_q(js) - y_d(js)] = B1(s) + jB2(s),$$

получены следующие выражения для расчета параметров асинхронного режима невозбужденного генератора для скольжения  $s$  и напряжения  $U$  в узле подключения генератора:

$$P_{AC} = U^2 [A2(s) - B1(s)\sin 2\delta + B2(s)\cos 2\delta];$$

$$Q_{AC} = U^2 [A1(s) + B1(s)\cos 2\delta - B2(s)\sin 2\delta];$$

$$i_r = U \frac{X_d}{X_{ad}} \{ [A2(s) - B1(s)]\sin \delta - [A1(s) - B1(s)] \}.$$

С учетом составляющих для расчета исходного синхронного режима имеем:

$$P = \frac{E'_q U}{X_d} \sin \delta_0 + P_{AC};$$

$$Q = \frac{E'_q U}{X'_d} \cos \delta_0 + Q_{AC}.$$

Полученные уравнения совместно с уравнениями движения ротора образуют математическую модель генератора:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{1}{T_j} [P_T - P];$$

$$\frac{d\delta}{dt} = S,$$

где  $T_j$  – постоянная инерции генератора и турбины.

Коэффициенты  $A1$ ,  $A2$ ,  $B1$ ,  $B2$  в являются нелинейными функциями скольжения. Расчет значений по многоконтурным схемам замещения приводит к дополнительным затратам времени ПЭВМ. Анализ зависимостей  $A1(s)$ ,  $A2(s)$ ,  $B1(s)$ ,  $B2(s)$  ряда генераторов показывает, что последние могут аппроксимированы в диапазоне скольжений от 0 до 0,1 двумя – тремя прямыми. В этом случае время расчета асинхронного режима значительно сокращается. Однако требуется предварительная аппроксимация коэффициентов.

Известны схемы замещения генератора (рис. 1) с вынесенным контуром намагничивания, которые не получили широкого распространения при моделировании переходных процессов в синхронных генераторах.

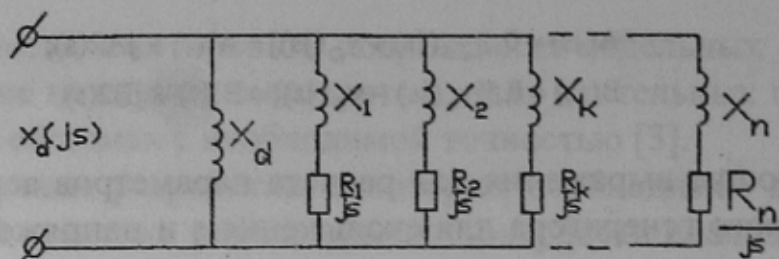


Рисунок 1 – Схема замещения с вынесенным контуром намагничивания  
( $n$  – число контуров,  $R_1, X_1, R_2, X_2, \dots, R_n, X_n$  – параметры контуров)

Анализ структуры схемы замещения позволяет сделать вывод, о целесообразности использования этой схемы замещения для определения коэффициентов уравнений для расчета активной и реактивной мощностей и тока в обмотке возбуждения.

Входная проводимость схемы может быть определена по выражению

$$y_d(jS) = \frac{1}{X_d} + \sum_{K=1}^N \frac{j}{\frac{R_{Kd}}{s} + jX_{Kd}}$$

Разделяя действительную и мнимую части уравнения, получаем

$$y_d(jS) = \frac{1}{X_d} + \sum_{K=1}^N \frac{X_{Kd}}{\left(\frac{R_{Kd}}{s}\right)^2 + X_{Kd}^2} + j \sum_{K=1}^N \frac{\frac{R_{Kd}}{s}}{\left(\frac{R_{Kd}}{s}\right)^2 + X_{Kd}^2}$$

Аналогичное выражение используется для определения проводимости генератора со стороны обмотки статора и по поперечной оси ротора. Используя последние выражения  $y(jS)$ ,  $y_q(jS)$  и предварительно разделив выражения под знаками арифметических сумм на  $X_k X_k$  получим  $A(jS) = A_1 + jA_2$ ,  $B(jS) = B_1 + jB_2$  в следующем виде:

$$2A_1(S) = \frac{1}{X_d} + \frac{1}{X_q} + \sum_{K=1}^N \frac{\frac{S^2}{X_{Kd}}}{S^2 + \left(\frac{R_{Kd}}{X_{Kd}}\right)^2} + \sum_{L=1}^M \frac{\frac{S^2}{X_{Lq}}}{S^2 + \left(\frac{R_{Lq}}{X_{Lq}}\right)^2};$$

$$2A2(S) = j \left[ \sum_{K=1}^N \frac{\frac{R_{Kd} S}{X_{Kd}^2}}{S^2 + \left(\frac{R_{Kd}}{X_{Kd}}\right)^2} + \sum_{L=1}^M \frac{\frac{R_{Lq} S}{X_{Lq}^2}}{S^2 + \left(\frac{R_{Lq}}{X_{Lq}}\right)^2} \right];$$

$$2B1(S) = \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} + \sum_{K=1}^N \frac{\frac{S^2}{X_{Kd}}}{S^2 + \left(\frac{R_{Kd}}{X_{Kd}}\right)^2} - \sum_{L=1}^M \frac{\frac{S^2}{X_{Lq}}}{S^2 + \left(\frac{R_{Lq}}{X_{Lq}}\right)^2};$$

$$2B2(S) = j \sum_{K=1}^N \frac{\frac{R_{Kd} S}{X_{Kd}^2}}{S^2 + \left(\frac{R_{Kd}}{X_{Kd}}\right)^2} - j \sum_{L=1}^M \frac{\frac{R_{Lq} S}{X_{Lq}^2}}{S^2 + \left(\frac{R_{Lq}}{X_{Lq}}\right)^2}.$$

Подставляя  $A1$ ,  $A2$ ,  $B1$ ,  $B2$  в выражения для  $Pac(s)$ ,  $Qac(s)$ ,  $if(s)$  получим более простую форму записи математической модели для расчета аномальных режимов работы генераторов. При допустимых для эксплуатации асинхронных режимах скольжение не превышает нескольких процентов и с достаточной точностью можно пренебречь величиной  $s^2$  по сравнению с квадратом отношения  $R/X$ . При таком допущении имеем:

$$Z1 = 0.5 \left[ \sum_{K=1}^N \frac{X_{Kd}}{R_{Kd}^2} - \sum_{L=1}^M \frac{X_{Lq}}{R_{Lq}^2} \right]; \quad Z2 = 0.5 \left[ \sum_{K=1}^N \frac{1}{R_{Kd}} + \sum_{L=1}^M \frac{1}{R_{Lq}} \right];$$

$$Z3 = 0.5 \left[ \sum_{K=1}^N \frac{1}{R_{Kd}} - \sum_{L=1}^M \frac{1}{R_{Lq}} \right]; \quad Z4 = 0.5 \left[ \frac{1}{X_d} - \frac{1}{X_q} \right]; \quad (1)$$

$$Z5 = 0.5 \left[ \sum_{K=1}^N \frac{X_{Kd}}{R_{Kd}^2} + \sum_{L=1}^M \frac{X_{Lq}}{R_{Lq}^2} \right]; \quad Z6 = 0.5 \left[ \frac{1}{X_d} + \frac{1}{X_q} \right].$$

В технической литературе приведены параметры многоконтурных схем замещения, соответствующих магнитным потокам в обмотках. Параметров схем замещения с вынесенным намагничивающим контуром практически нет. Исключение составляет генератор типа ТВВ-200 [9].

Использование полученных соотношений для расчета  $Z1...Z5$  возможно после получения параметров схем замещения с вынесенным контуром намагничивания. Последние могут быть получены следующими путями:



- на основании поиска корней полиномов, полученных по многоконтурным схемам замещения;
- на основании параметрической идентификации (метод наименьших квадратов) частотных характеристик, рассчитанных по многоконтурным схемам замещения.

При отсутствии параметров схем замещения нужного генератора могут быть использованы базовые параметры эквивалентных демпферных контуров ротора [10–11].

Математическая модель генератора минимальной сложности адекватно отражающая физические процессы в роторе имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dt} &= \frac{1}{T_j} (P_T - P); \\ \frac{d\delta}{dt} &= S; \\ P &= \frac{E'_q U}{X'_d} \sin \delta_0 + U^2 [S^2 Z_1 \sin 2\delta + S(Z_2 + Z_2 \sin 2\delta)]; \\ Q &= \frac{E'_q U}{X'_d} \cos \delta_0 + U^2 [S^2 (Z_5 - Z_1 \cos 2\delta) + SZ_3 \sin 2\delta + Z_6 - Z_4 \cos 2\delta]. \end{aligned} \quad (2)$$

Оценка эффективности полученной модели выполнялась на основании расчетов асинхронных режимов генераторов мощностью 200 и 800 МВт без возбуждения для различных значений мощности турбин в исходном синхронном режиме и состояния обмотки возбуждения. Расчёты выполнялись для случая работы генератора непосредственно на шины бесконечной мощности без учета регулирования скорости турбины с целью исключения влияния различных факторов на сопоставление.

В табл. 1 приведены результаты расчетов асинхронных режимов по полным уравнениям Парка-Горева и многоконтурных схем замещения и по предложенной модели.

Результаты анализа позволяют сделать вывод о целесообразности использования полученной модели генератора для моделирования длительных переходных процессов в сложных системах. Использование модели по сравнению с классическими моделями позволит учесть физические процессы в роторе при незначительном увеличении времени ПЭВМ при моделировании.

Установившийся режим работы электрической сети описывается системой алгебраических уравнений, полученных с помощью метода узловых напряжений применительно к балансу токов в узлах.

Расчет токов КЗ для начального момента времени можно выполнить используя метод наложения.

Для исследования устойчивости режима система уравнений (3) дополняется системой уравнений (2) и выражениями (1) для расчета  $Z_1 \dots Z_6$ .

При моделировании динамической устойчивости системы уравнений дополняются уравнениями автоматических систем регулирования скорости турбин и возбуждения генераторов.

Таблица 1 – Экстремальные значения параметров асинхронного режима

Тип генератора	ТВВ-200			
	Замкнута накоротко		Замкнута на сопротивление 5gf	
Состояние ОВГ	П-Г	Полученная	П-Г	Полученная
Мощность исходного режима, Мвт	100	100	100	100
Период проворота, с	10,5	13	4	4
Рмакс	0,496	0,432	0,474	0,483
Рмин	0,402	0,428	0,424	0,428
Смакс	0,004	0,001	0,005	0,005
Смин	0,0006	0,0006	0,002	0,002
Тип	ТВВ-800			
Мощность исходного режима, Мвт	400	400	400	400
Проворот, с	9	14	2,5	2
Рмакс	0,62	0,454	0,596	0,603
Рмин	0,382	0,451	0,43	0,393
Смакс	0,006	0,006	0,008	0,009
Смин	0,0007	0,002	0,002	0,003

### Список литературы

1. Баринов В.А., Совалов С.А. Режимы энергосистем: Методы анализа и управления. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 440 с.
2. Андерсон П., Фуад А. Управление энергосистемами и устойчивость / Пер. с англ. под ред. Я.Н. Лугинского. – М.: Энергия, 1980. – 568 с.
3. Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е., Окин А.А. Расчеты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах. – Энергоатомиздат, 1990. – 390 с.
4. Долгинов А.И., Ступель А.И., Левина Л.С., Жвания Т.Л. Анализ переходных процессов в системах с синхронными машинами на основе переходных проводимостей. – В кн.: Тр. ВНИИЭ, вып. 39. – М.: Энергия, 1971, С. 7-18.



5. Рогозин Г.Г., Коваль А.Ю. Программа расчета токов трехфазного короткого замыкания в сложной электрической системе с использованием принципов функционального моделирования. – В кн.: Моделирование и расчет на ЦВМ режимов энергетических систем. – Киев: Наукова думка, 1977. – С.11-20.
6. Гамм Б.З. Исследование переходных процессов в электроэнергетической системе при учете некоторых ее элементов динамическими характеристиками. Тр. СибНИИЭ, 1972, вып. 21, ч.1.
7. Оранский А.Г. Кибернетическое моделирование на ЦВМ трехфазного короткого замыкания в сложных электрических системах: Автореф. дис. канд. техн. наук. – Киев: – 26 с.
8. Казовский Е.Я. Переходные процессы в электрических машинах переменного тока. – М.: АН СССР, 1962. – 624 с.
9. Сидельников А.В. О синтезе схем замещения электрических машин переменного тока по заданным частотным характеристикам. – В кн.: Теория, расчет и исследование высокоиспользованных электрических машин. – М.: Наука, 1965. – С. 204-215.
10. Калюжный А.Х. типовые частотные характеристики и определение параметров контуров на роторе крупных турбогенераторов. – В кн.: Применение частотных методов в электроэнергетическом исследовании. – Труды СибНИИЭ, 1972, вып. 21, С. 118-131.
11. Лукашов Э.С., Калюжный А.Х., Гамм Б.З. Определение и использование в расчетах типовых характеристик и параметров демпферных контуров турбогенераторов. – Электричество, 1977, №7, С. 27-32.