

УДК 621.313.67

И.В. Пантелеева, Д.А. Частников

*Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков*

## ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ СИНХРОНИЗАЦИИ С СЕТЬЮ

*В статье рассмотрены вопросы, связанные с процессами синхронизации синхронных генераторов с сетью, т.к. включение их сопровождается толчками уравнивающего тока, а также длительными качаниями. Определен наиболее оптимальный метод синхронизации для генераторов средней мощности. Особое внимание уделено оценке влияния сложности схемы замещения генератора, как на режимы его включения в сеть, так и на величину суммарного динамического воздействия, а также определению условий включения, чтобы воздействие было минимальным.*

**Ключевые слова:** синхронный генератор, синхронизация, электроэнергетическая система, математическая модель, имитационное моделирование, динамическая характеристика.

### Введение

**Постановка проблемы.** Развитие энергетики неразрывно связано с совершенствованием систем противоаварийного управления, разработкой и внедрением эффективных методов управления режимами электроэнергетических систем (ЭЭС). Одним из основных динамических объектов ЭЭС, оказывающим наиболее существенное влияние на переходные режимы, является синхронный генератор (СГ) со своими системами регулирования. Построение эффективных систем управления вызывает необходимость применения математических моделей, которые наиболее адекватно учитывали свойства генератора в расчетах переходных режимов.

Существуют два способа синхронизации: точная и самосинхронизация. Точная синхронизация требует времени для уравнивания напряжений и частот генератора в сети, аппаратура сложная. В аварийных ситуациях, когда напряжение и частота сети могут значительно отклоняться от нормальных значений и быстро изменяться, точная автоматическая синхронизация, как правило, задерживает (до 5 мин и более) процесс синхронизации.

Самосинхронизация генераторов обладает рядом существенных преимуществ. К ним относятся: простота схемы и аппаратуры, надежность работы устройств, быстрота включения генератора в сеть, что особенно важно при появлении дефицита мощности в энергосистеме в аварийных условиях. При самосинхронизации включение в сеть генераторов происходит при снятом возбуждении. При этом в момент включения значительных толчков активной мощности и опасных механических усилий не возникает. Свободный ток в обмотке статора и периодические токи во всех контурах генератора затухают с большой скоростью (практически за 2-3 периода качания ротора).

Однако при самосинхронизации могут происходить несинхронные включения, которые вызывают ложные действия некоторых видов защит, поэтому следует принимать меры для предотвращения ложных отключений.

Сложный переходный процесс, завершающийся синхронизацией, представляет собой наложение двух переходных процессов: процесса, возникающего после включения обмотки якоря на сеть, и процесса, возникающего после включения обмотки возбуждения на возбудитель. Для анализа такого переходного процесса необходимо рассматривать наиболее оптимальную математическую модель генератора, учитывающего многофакторные связи и параметры.

**Анализ литературы.** Сложность проблемы, несмотря на значительное число работ, не позволила в полной мере провести анализ целесообразности использования моделей, областей применения, оценки суммарной погрешности и т.д. В ряде работ на основе сопоставительного анализа результатов расчета с экспериментальными данными показана эффективность использования многоконтурных схем замещения СГ. Необходимость упрощения моделей ЭЭС в ряде задач обусловила рассмотрения вопроса минимальной сложности модели СГ. Так, например, известны рекомендации специально созданной рабочей группы в связи с проблемами внедрения систем управления возбуждения СГ о необходимости учета не менее двух демпферных контуров в схеме замещения для анализа динамической устойчивости ЭЭС [1]. Тем не менее, в [2] на основании анализа частотных характеристик СГ даются рекомендации о возможности использования более простых моделей.

Построение систем управления на основе современных информационных технологий обеспечивает достижение нового уровня качества переходного

го процесс при управлении режимами ЭЭС. Так в [3], отмечается, что используемые устройства синхронизации допускают возникновение переходных процессов с значительными воздействиями на СГ при его включении на параллельную работу с электрической сетью, что сокращает срок технической эксплуатации. В ряде работ также отмечается, что аналоговые синхронизаторы хотя и удовлетворяют требованиям эксплуатации, однако следует признать элементную базу и алгоритмические схемы этих систем морально устаревшими, а принцип работы данных устройств не всегда позволяет обеспечить быстрое и качественное включение генератора на параллельную работу.

В [4,5] также отмечается, что перспективным подходом к решению задач управления режимами СГ может стать подход, основанный на общем принципе построения систем управления программным движением технических объектов. Суть этого принципа заключается в разделении задачи синтеза систем управления на подзадачу построения программных траекторий движения объектов и подзадачу формирования управлений обеспечивающих эти траектории.

Таким образом, можно отметить, что при исследовании проблемы адекватности математической модели требованиям точности описания физических явлений в роторе генератора выполнялось либо сопоставление расчетов определенных режимов с данными натурных экспериментов, либо сопоставлялись совокупности электромагнитных параметров синхронной машины при различных условиях. Исследование методов и устройств для управления переходными режимами простейших ЭЭС в [3,5] выполнены на основе математических моделей СГ, уровень сложности которых ниже рекомендованного в [1].

*Цель работы.* Целью работы является оценка влияния сложности схемы замещения СГ, как на режимы его включения в сеть при различных условиях, так и на величину суммарного динамического воздействия, а также определения условий включения генератора на параллельную работу с сетью, при которых суммарное воздействие будет минимальным. Для проведения исследований был выбран генератор ТВВ-200, так как для него известны одноконтур-

ные и много контурные с небольшим числом контуров схемы замещения, полученные признанными организациями по определению параметров электрических машин [6].

### Основная часть

Решение поставленной задачи связано с реализацией имитационного моделирования режимов работы СГ. На рис. 1 приведен алгоритм программного обеспечения для имитационного моделирования переходных режимов и управления ими применительно к простейшей системе. Имитационное и моделирование реализуется путем задания признаков, определяющих виды и последовательности возмущений, команды управления и условия реализации, а также способы реализации управления режимами (признак «У» на рис. 1). Предусмотрено использование двух подходов: выбор заранее сформированного сценария из базы данных; ввод команды пользователем.

В основу программного обеспечения взята математическая модель, описанная в [7]. Система

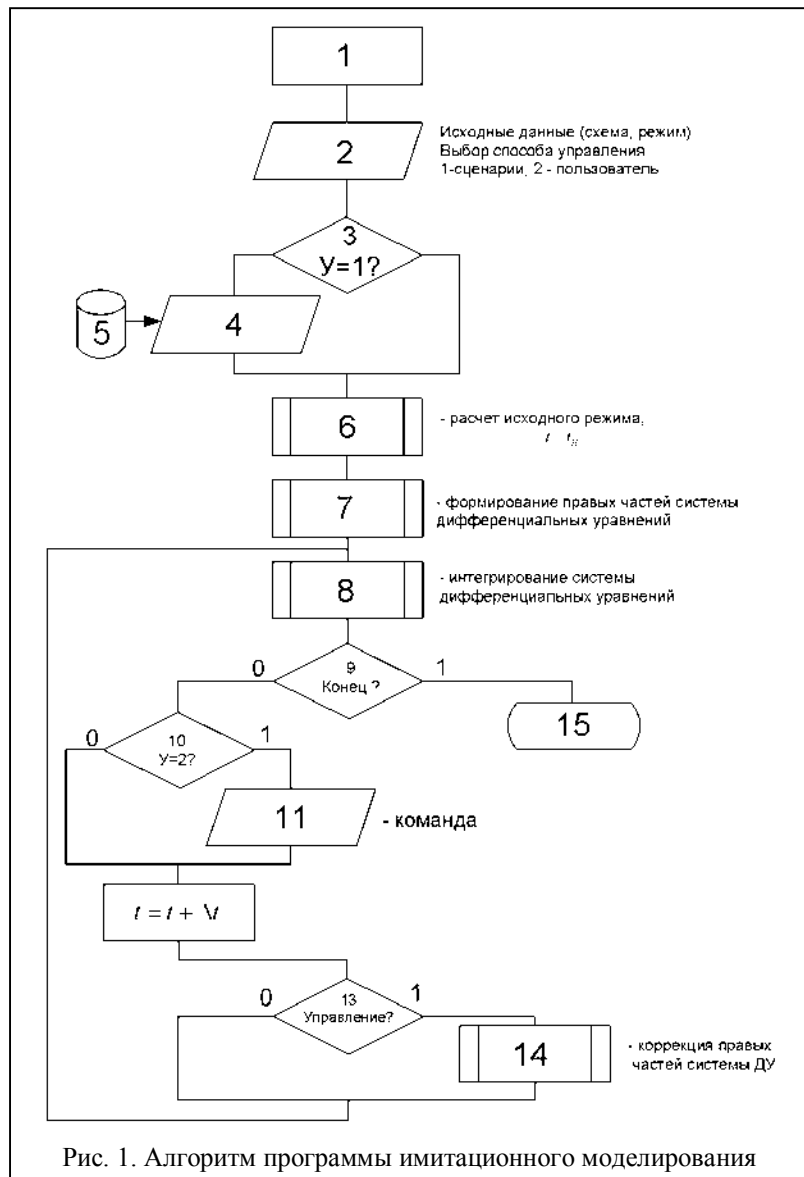


Рис. 1. Алгоритм программы имитационного моделирования

уравнений была дополнена уравнениями, описывающими различные системы возбуждения а также соотношениями для расчета динамического воздействия, возникающего при включении СГ в сеть, предложенными в [3].

В работе выполнены многовариантные исследования режимов, возникающих при включении генератора в сеть различными методами при изменении условий включения в пределах установленных ПТЭ. Сопоставительный анализ позволяет сделать вывод о том, что наибольшие отклонения параметров от расчетов с использованием многоконтурных схем замещения СГ получены при моделировании с использованием схемы замещения с одним контуром, определенным по методике завода «Электросила».

При использовании значений демпферных контуров по методике Постникова И.М. параметры переходного процесса также отличаются по сравнению с расчетом по многоконтурным схемам замещения, но значения критерия воздействия на СГ DV близки. В качестве примера, на рис. 2 приведена часть параметров, полученных при моделировании одного из вариантов включения генератора в сеть методом самосинхронизации, подтверждающая сделанный выше вывод об адекватности моделей.

Зависимость критерия динамического действия на генератор ТВВ-200 при включении в сеть методом самосинхронизации показывает, что наименьшее значение динамического действия DV имеет место при включении генератора в сеть с нулевым значением скольжения и значением угла ротора в диапазоне  $120-150^\circ$ .

При моделировании включения СГ в сеть методом точной синхронизации рассматривались различные сочетания таких факторов, как разность частот вращения ротора и напряжения системы (скольжение), угол между векторами напряжения статора и системы, разница в модулях. Анализ переходных процессов позволяет сделать следующие выводы:

- включение генератора при отрицательных углах и  $s > 0$  по сравнению с вариантом включения с отрицательным скольжением приводит к увеличению значения DV на 6%;

- при включении генератора с  $s < 0$  изменение знака угла вылета ротора не приводит к изменению значения критерия DV, но значение критерия практически такое же, как в варианте  $s > 0$  и  $\delta < 0$ ;

- влияние значения постоянной времени инерции турбоагрегата на значения критерия зависит от условий включения генератора в сеть.

При увеличении постоянной времени инерции СГ в два раза значение DV возрастает при  $s < 0$  и  $\delta < 0$  на 45% и всего на 13,3% при  $s > 0$  и  $\delta < 0$  и не меняется при  $s < 0$  и  $\delta > 0$ ;

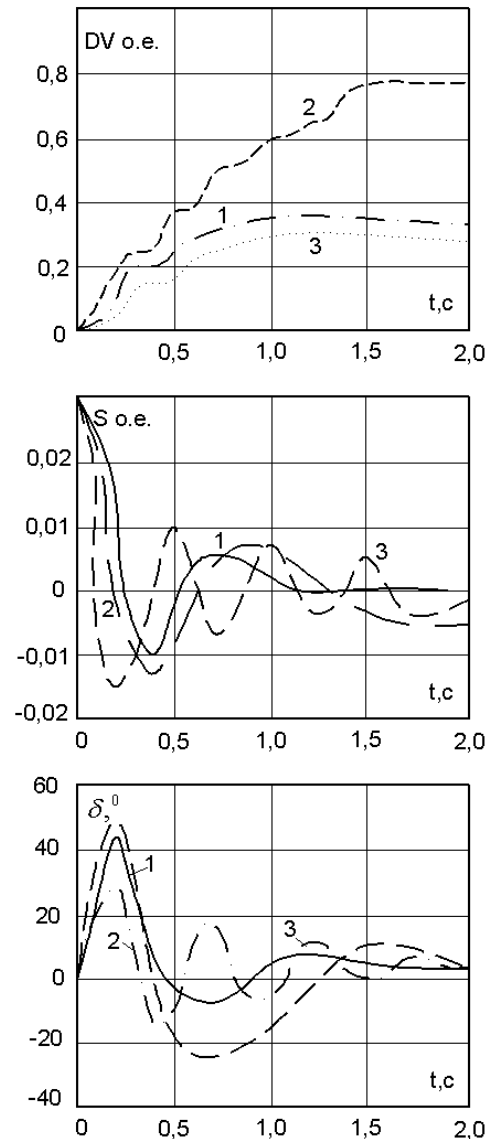


Рис. 2. Динамическое воздействие при DV, изменения скольжения  $s$ , угла ротора  $\delta$  при включении генератора типа ТВВ-200-2 в сеть методом самосинхронизации при  $\delta = 0^\circ$ ,  $s = 0,02$ ,  $\dot{\omega}_j$  (1 – схема по ЧХ; 2 – один контур «Элеткрсила»; 3 – один контур И.М. Постников)

- практически не меняется значение критерия DV при включении СГ с отрицательным скольжением и отрицательным углом  $\delta$  по сравнению с вариантом  $s < 0$  и  $\delta > 0$ .

Для оценки отдельных факторов на значения критерия DV при включении СГ в сеть методом точной синхронизации были проведены многовариантные исследования при задании равных значений амплитуд векторов, нулевых значений углов и скольжения. Установлено, что:

- при  $s = 0$  и равенстве амплитуд напряжений и при отрицательных углах ротора имеем небольшое изменение по сравнению с вариантом включения при

положительных углах. Увеличение постоянной времени инерции агрегата в обоих вариантах включения приводит к увеличению динамического воздействия от угла включения. При этом, при положительных углах значение критерия больше примерно на 12%;

- включение генератора с  $s > 0$  и  $s < 0$  приводит к одному значению DV. Но динамическое действие, связанное с частотой биения резко возрастает с увеличением постоянной времени инерции турбоагрегата. Так, увеличение постоянной времени инерции агрегата;

- величина критерия зависит от того, амплитуда которого вектора (напряжения сети или генератора) больше. Если  $U_N > U_A$ , то динамическое действие от неравенства напряжений больше (примерно на 15%) по сравнению с вариантом, когда напряжение генератора больше напряжения системы.

### Выводы

1. Проанализированы различные методы синхронизации, описаны их особенности.

2. На основании многовариантных сопоставительных расчетов в статье показано, что:

- для адекватного воспроизведения движения ротора генератора при моделировании электромеханических процессов необходимо использование схем замещения с числом демпферных контуров по осям d и q не менее двух;

- при моделировании переходных режимов с использованием одноконтурных схем с постоянными параметрами или при использовании других форм представления совокупности электромагнитных параметров, генератора, соответствующих указанным схемам, не учитывая многочастотность переходного режима, что снижает точность определения параметров режима. При этом возможно определение отдельных критериев с достаточной точно-

стью, например динамического действия процессов включения генератора в сеть;

- наименьшее значение динамического действия DV имеет место при включении генератора в сеть методом самосинхронизации при нулевом значении скольжения и значением угла ротора в диапазоне 120-150°.

### Список литературы

1. Дандено Р.Л. *Современные тенденции и достижения в области моделирования синхронных машин в электроэнергетике* / Р.Л. Дандено, Р. Кундур, Р.П. Шульц // *Proc. IEEE*. – 1974. – 62, 7. – С. 95-106.
2. Лоханин К.К. *Еще раз о математическом моделировании синхронных и асинхронизированных машин при анализе процессов в энергосистемах* / К.К. Лоханин, Л.Т. Мамиконянц // *Электричество*. – 2000. – № 2. – С. 14-22.
3. Углов А.В. *Управление включением синхронного генератора на параллельную работу с мощной сетью: Автореф. дис. канд. техн. наук* / А.В. Углов. – К, 2006. – 20 с.
4. Хрущев Ю.В. *Управление движением генераторов в динамических переходах энергосистем* / Ю.В. Хрущев. – Томск: STT, 2001. – 310 с.
5. Армеев Д.В. *Исследование эффективности непрерывного и ступенчатого фазового управления для повышения динамической устойчивости электрических систем* / Д.В. Армеев, А.П. Долгов, В.М. Чебан // *Энергосистема: управление, качество, безопасность: Сб. докл. Всерос. НТК*. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ.- 2001. – 496 с.
6. Сидельников А.В. *О синтезе схем замещения электрических машин переменного тока по заданным частотным характеристикам* / А.В. Сидельников // *В кн.: Теория, расчет и исследование высокоиспользованных электрических машин*. – М.-Л.: Наука, 1975. – С. 204-214.
7. Zabolotny I.P. *The simulating of dynamic regimes of the turbogenerator on the IBM PC* / I.P. Zabolotny, A.M. Larin, O.V. Penkov // *Materialy Konferencyine XXXI miedzynarodowe symposium maszyn elektrycznych Maszynu synchronizne*. – Gliwice, 1995. Sept. 1995. – P. 383-385.

Поступила в редколлегию 30.03.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Г.И. Канюк, Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков.

### ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСАМИ СИНХРОНІЗАЦІЇ З МЕРЕЖЕЮ

І.В. Пантелєєва, Д.А. Частніков

У статті розглянуті питання, пов'язані з процесами синхронізації синхронних генераторів з мережею, тому що вмикання їх супроводжується товчками зрівнювального струму, а також тривалими качаннями. Визначений найбільш оптимальний метод синхронізації для генераторів середньої потужності. Особлива увага приділена оцінці впливу складності схеми заміщення генератора як на режими його вмикання в мережу, так і на величину сумарної динамічної дії, а також визначенню умов вмикання, щоб дія була мінімальною.

**Ключові слова:** синхронний генератор, синхронізація, електроенергетична система, математична модель, імітаційне моделювання, динамічна характеристика.

### MATHEMATICAL MODEL OF THE STUDY FOR THE MANAGEMENT OF SYNCHRONIZATION WITH THE NETWORK

I.V. Panteleeva, D.A. Chastnykov

The article deals with issues related to synchronization of synchronous generators with the network because their power on the dance accompanied by egalitarian current and long rock. The most optimal method for synchronization of average power generators. Special attention is paid to assessing the impact of complexity equivalent circuit of the generator as its switching modes on the network and on the total value of the dynamic and enabling the definition of conditions that effect was minimal.

**Keywords:** synchronous generator, synchronization, electrical power system, mathematical model, simulation, dynamic characteristics.