

## **ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ СИНХРОНИЗАЦИИ С СЕТЬЮ**

**Заболотный И.П., Гришанов С.А.**

**Донецкий национальный технический университет  
ivp@elf.donetsk.dgtu**

*In the article the questions of influencing of complication of chart of substituting for a synchronous generator are considered on transitional processes, arising up during synchronization of generator with an electric network. Executed multiple researches, allowing estimating influencing of different terms of including of generator in a network on the parameters of the modes and value of dynamic influence. It is shown in the article, that the use of traditional chart of substitution with one damper contour on the axes of symmetry of rotor results both in errors in determination of affecting rotor of generator and parameters of transient behaviors.*

**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, являются 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. 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 специальной созданной рабочей группы в связи с проблемами внедрения систем управления возбуждением СГ о необходимости учета не менее двух демпферных контуров в схема замещения для анализа динамической устойчивости ЭЭС [1-2]. Тем не менее, в [3] 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 процесса при управлении режимами ЭЭС. Так, в [4], отмечается, что используемые устройства синхронизации допускают возникновение переходных процессов с значительными воздействиями на СГ при его включения 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 [5-7] также отмечается, что перспективным подходом к решению задач управление 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. В трудах А.А. Колесникова предложена новая концепция синтеза законов управления синхронного генератора на основе синергетической теории управления [8].

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. Исследования методов и устройств для управления переходными режимами простейших ЭЭС в [4-8] и др. выполнены на основе математических моделей СГ, уровень сложности которых ниже рекомендованного в [1-2].

**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 одноконтурные и многоконтурные с небольшим числом контуров схемы замещения, полученные признанными организациями по определению параметров электрических машин [9].

**Основные положения.** 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 моде-

лирование 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.

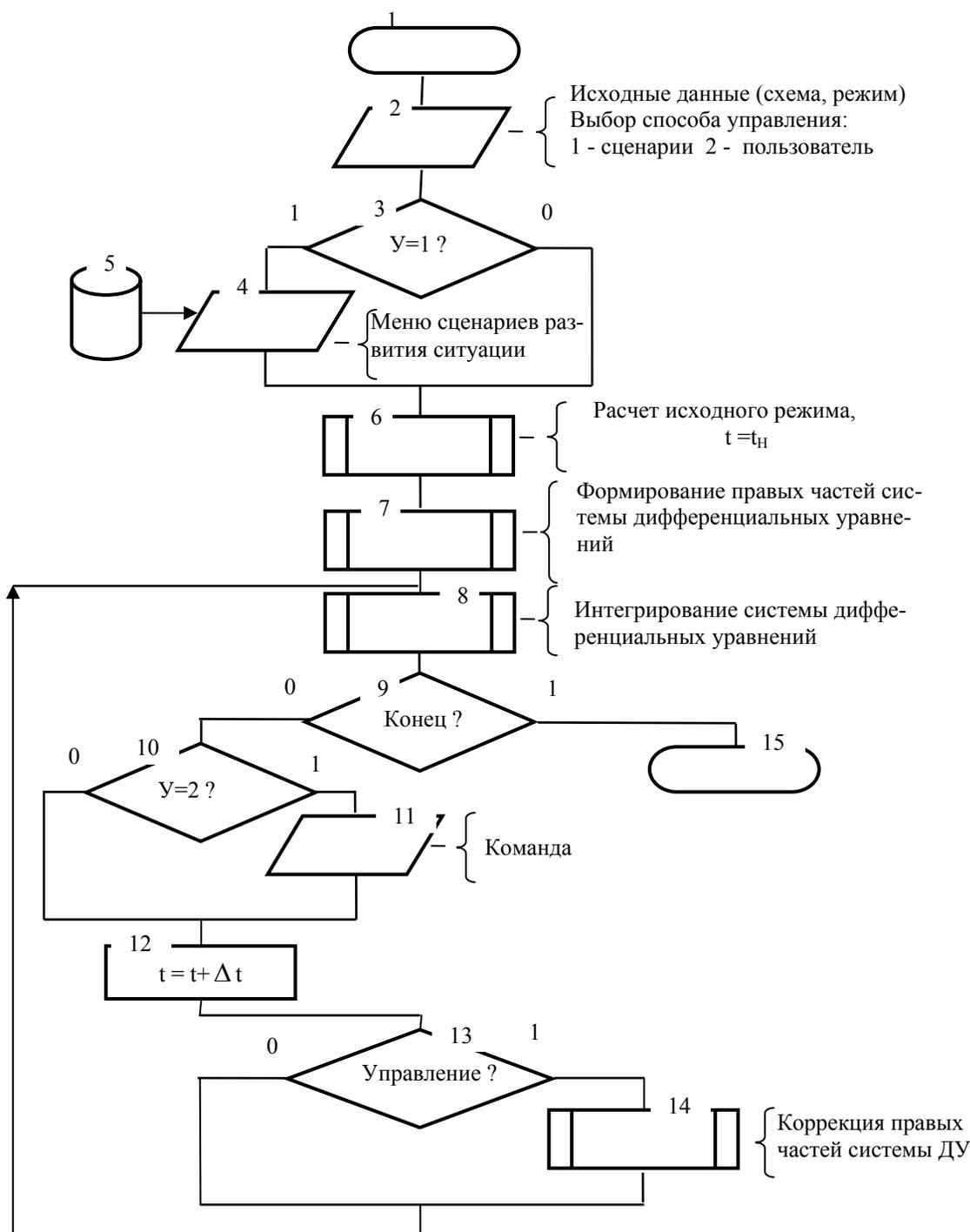


Рисунок 1 - Алгоритм программы имитационного моделирования

В основу программного обеспечения взята математическая модель, описанная в [10]. Система уравнений была дополнена уравнениями, описывающими различные системы возбуждения, а также соотношениями для расчета динамического воздействия, возникающего при включении СГ в сеть, предложенными в [4].

В работы выполнены многовариантные исследования режимов, возникающих при включении генератора в сеть различными методами при изменении условий включения в пределах установленных ПТЭ. Сравнительный анализ позволяет сделать вывод о том, что наибольшие отклонения параметров от расчетов с использованием многоконтурных схем замещения СГ получены при моделировании с использованием схемы за-

мещения 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.

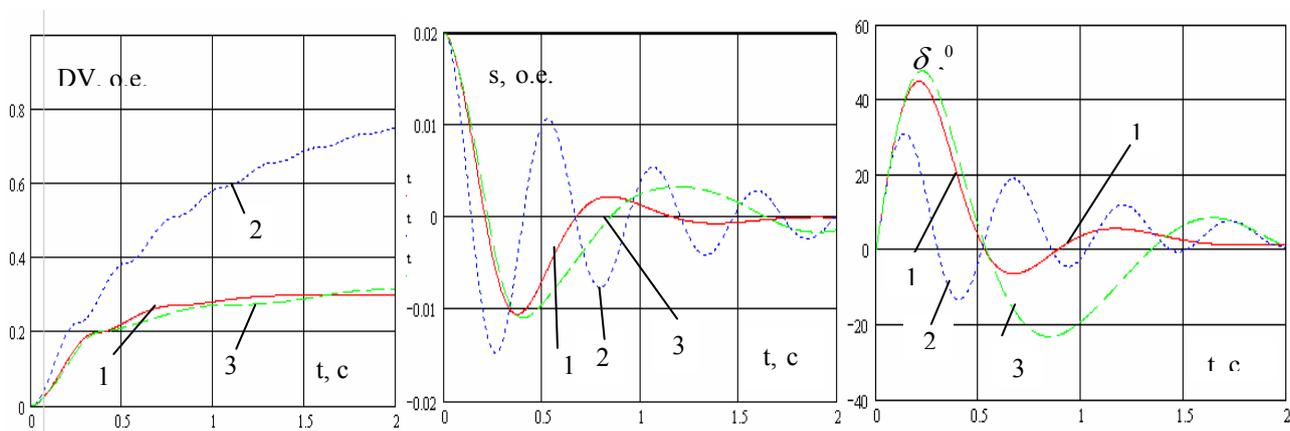


Рисунок 2 - Динамические воздействия при DV, изменения скольжения  $s$ , угла ротора  $\delta$  при включении генератора типа ТВВ-200-2 в сеть методом самосинхронизации при  $\delta = 0^\circ$ ,  $s = 0,02$ ,  $T_J$  (1 – схема по ЧХ; 2 – один контур «Электросила»; 3 – один контур Постников И.М.)

Зависимость критерия динамического действия на генератор ТВВ-200 при включении в сеть методом самосинхронизации показана на рис. 3. 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  $\delta > 0$ ;

- 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 инерции в два раза приводит к росту значения критерия более чем на 80 %;
- на величину критерия при неравенстве амплитуд в пределах 5% и отсутствии других факторов не влияет увеличение постоянной времени инерции агрегата;
- величина критерия зависит от того, амплитуда которого вектора (напряжения сети или генератора) больше. Если  $U_C > U_G$ , то динамическое действие от неравенства напряжений больше (примерно на 15 %) по сравнению с вариантом, когда напряжение генератора больше напряжения системы.

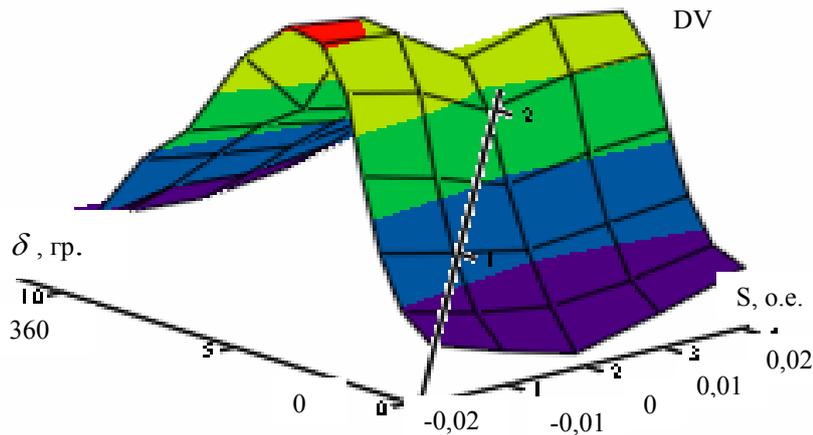


Рисунок 3 – Изменение показателя динамических воздействий при включении ТВВ-200 в сеть методом самосинхронизации

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

1. 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;
2. 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 учитывается многократность переходного режима, что снижает точность определения параметров режима. При этом возможно определение отдельных критериев с достаточной точностью, например динамического воздействия процессов включения генератора в сеть;
3. наименьшее значение динамического действия  $DV$  имеет место при включении генератора в сеть методом самосинхронизации при нулевом значении скольжения и значением угла ротора в диапазоне  $120-150^\circ$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Dandeno P.L., Hauth R.L., Schulz R. Effects Synchronous machine modelling in large scale system stability // Trans. IEEE. – 1973. - pas 92. – 2. - 574-582.
2. Дандено Р.Л., Кундур Р., Шульц Р.П. Современные тенденции и достижения в области моделирования синхронных машин в электроэнергетике / Перевод с англ. Proc. IEEE. – 1974. – 62. –7. - 95-106.
3. Лоханин К.К., Мамиконянц Л.Г. Еще раз о математическом моделировании синхронных и асинхронизированных машин при анализе процессов в энергосистемах // Электричество. – 2000. - №2. – С. 14-22.
4. Углов А.В. Управление включением синхронного генератора на параллельную работу с мощной сетью.: Автореф. дис....канд. техн. наук. —Киев, 2006. – 20 с.
5. Тимофеев А.В. Построение адаптивных систем управления программным движением. – Л.: Энергия, 1980. – 88 с.
6. Хрущев Ю.В. Управление движением генераторов в динамических переходах энергосистем. – Томск: СТУ, 2001. – 310 с.
7. Армеев Д.В., Долгов А.П., Чебан В.М. Исследование эффективности непрерывного и ступенчатого фазового управления для повышения динамической устойчивости электрических систем // Энергосистема: управление, качество, безопасность: Сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2001. – 496 с.
8. Колесников. А.А., Кузьменко А.А. Синергетический синтез законов управления турбогенератором. - Материалы IV Международной конференции "Повышение эффективности производства электроэнергии". Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ). – 2003. - С. 131 - 134.
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.-Л.: Наука, 1965. – С.204-214.
10. Zabolotny I.P., Larin A.M., Larina I.I., Penkov O.V. The simulating of dynamic regimes of the turbogenerator on the IBM PC // Materialy Konferencyjne XXXI miedzynarodowe symposium maszyn elektrycznych Maszyny synchroniczne. – Gliwice. - 1995. Sept. 1995. - P. 383 – 385.

Рекомендовано д.т.н. Сивокобиленко В.Ф.