

УДК 621.311.001

**АДАПТИРУЕМАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМ ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННЫХ МАШИН**

А.С. Гусев, С.В. Свечкарев, И.Л. Плодистый

Томский политехнический университет

E-mail: Svech@tpu.ru

*Представлены результаты синтеза адаптируемой математической модели систем возбуждения синхронных машин, позволяющей адекватно воспроизводить разнообразные системы возбуждения с различными законами регулирования. Приведены сведения о практической проверке математической модели.*

Достоверность моделирования нормальных и аварийных процессов в оборудовании и энергосистемах (ЭЭС), наряду с прочими факторами, в значительной мере зависит от точности воспроизведения систем возбуждения (СВ) синхронных электрических машин, особенно крупных синхронных генераторов. Однако жесткость и дифференциальный порядок точной математической модели СВ существенно выше аналогичных характеристик математической модели собственно электрической машины. Поэтому при моделировании реальных энергосистем возникают значительные трудности численного интегрирования чрезвычайно жестких и высокомерных систем дифференциальных уравнений, что вынуждает применять упрощенные модели СВ.

Разработанная в НИЛ «Моделирование ЭЭС» ТПУ многопроцессорная программно-техническая система реального времени гибридного типа не накладывает практические никаких ограничений на используемые математические модели. Становится возможным значительное повышение достоверности моделирования за счет применения высокоточных моделей всех элементов ЭЭС и соответственно СВ. В связи с этим поставлена задача синтезировать адаптируемую математическую модель СВ, позволяющую адекватно воспроизводить различные системы возбуждения.

В настоящее время, наряду с современными, основанными на использовании бесщеточных возбудителей, тиристорных управляемых выпрямителей и автоматических регуляторов возбуждения сильного действия (АРВ-СД), эксплуатируются различные СВ с высокочастотными и обычными электромашинами возбудителями с автоматическими регуляторами пропорционального действия (АРВ-ПД), реализующими принципы управляемого компаундирования, в частности фазового, и регулирования по отклонению напряжения. Разработанные в разное время, на различных принципах и разнотипной элементной базе перечисленные СВ имеют существенно отличающиеся математические модели.

Для выяснения особенностей и различий этих СВ был произведен анализ схем и законов регулирования практически всех известных в настоящее время СВ: типа РВА-62 (УБК-3), ЭПА-141, 142, 151, 161, 162, 305, 325, 325Б, 325В, ПРВ-401, АРВ-300И, АРВ-СДП(1) и др., а также опубликованных результатов их исследования [1–3]. Полученные данные позволили сформировать для каждого из них по-

дробные операторные схемы, на базе которых с учетом возможной модификации и развития данных СВ синтезирована адаптируемая математическая модель СВ, учитывающая все влияющие факторы.

Результаты синтеза в наглядной и удобной для использования форме приведены на рис. 1. Представленная на этом рисунке операторная схема отражает все нелинейные ограничения и функционально взаимосвязанные передаточные функции:

$$\frac{U_{\tau_b}}{U_{\Delta}} = \frac{1 - 12\tau_b p}{12 + 6\tau_b p + \tau_b^2 p^2}$$

– запаздывания, воспроизводимого аппроксимацией Паде второго порядка и собственно

$$\frac{U_b}{U_{\tau_b}} = \frac{K_b}{1 + T_b p}$$

– быстродействующего канала отклонения напряжения (КОН);

$$\frac{U_{\phi}}{U_{\Delta}} = \frac{1}{1 + T_{\phi} p}$$

– фильтра нижних частот и

$$\frac{U_{\text{и}}}{U_{\phi} - K_0(U_{\text{и}} + U_b)} = \frac{K_{\text{и}}}{T_{\text{и}} p}$$

– собственно интегратора интегрирующего КОН статора;

$$\frac{U_{\text{ш}}}{U_{\text{ов}}} = \frac{T_{\text{ш}} p}{1 + T'_{\text{ш}} p + T''_{\text{ш}} p^2}$$

– регулирования возбуждения по первой производной напряжения статора и

$$\frac{I_{\text{ш}}}{I_f} = \frac{T_{\text{ш}} p}{1 + T'_{\text{ш}} p + T''_{\text{ш}} p^2 + T'''_{\text{ш}} p^3}$$

– по первой производной тока возбуждения;

$$\frac{U_{\omega}}{\omega} = e^{-\tau_{\omega} p} \approx \frac{1 - 12\tau_{\omega} p}{12 + 6\tau_{\omega} p + \tau_{\omega}^2 p^2}$$

– запаздывания и

$$\frac{U_{\text{бч}}}{U_{\omega}} = \frac{T_{\omega} p}{1 + T'_{\omega} p + T''_{\omega} p^2 + T'''_{\omega} p^3}$$

– собственно блока измерения и преобразования частоты;

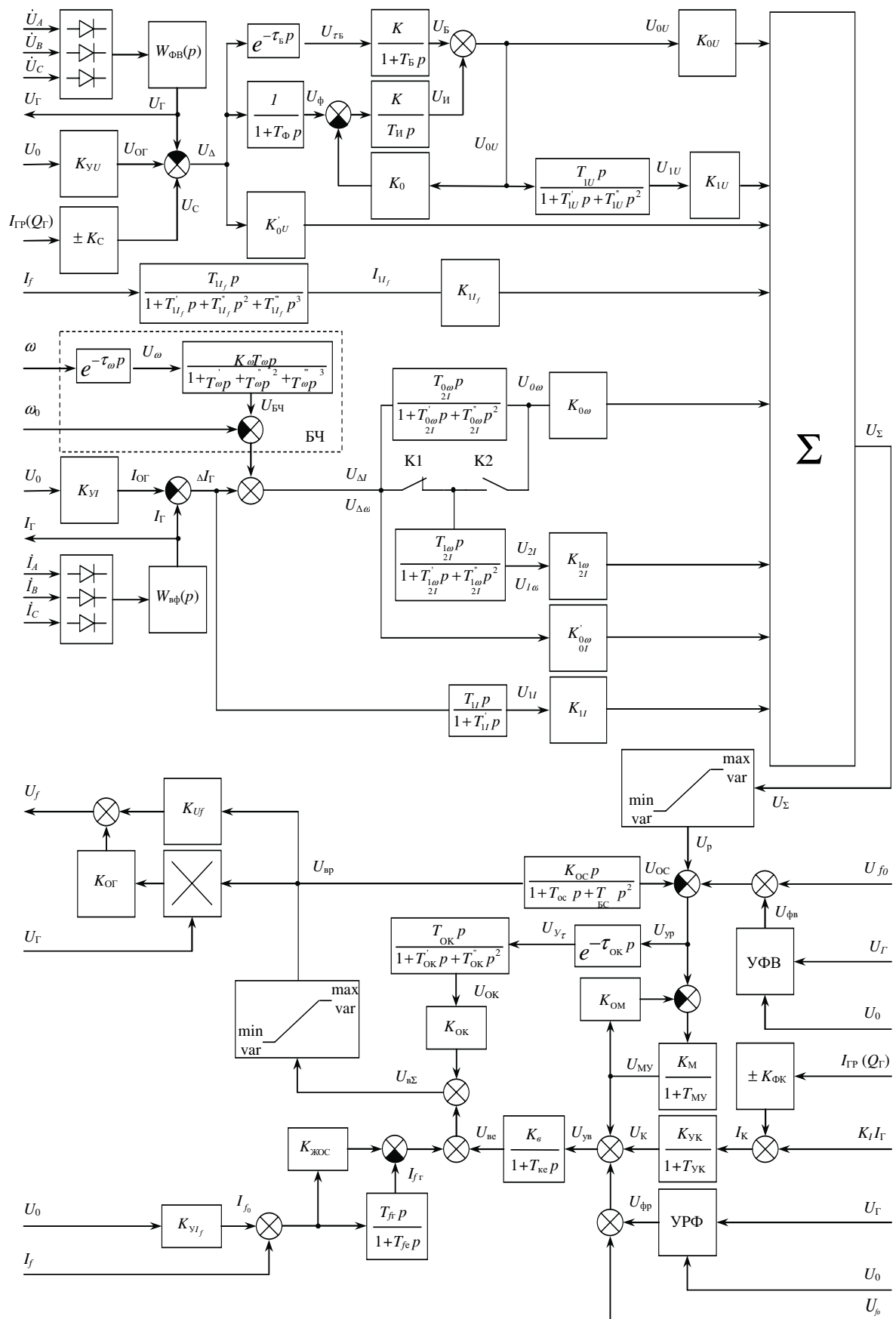


Рис. 1. Функциональная операторная схема универсальной математической модели СВ

$$\frac{U_{O\omega}}{U_{\Delta\omega}} = \frac{T_{O\omega} p}{1 + T'_{O\omega} p + T''_{O\omega} p^2}$$

– регулирования возбуждения по отклонению частоты и

$$\frac{U_{1\omega}}{U_{\Delta\omega}} = \frac{T_{1\omega} p}{1 + T'_{1\omega} p + T''_{1\omega} p^2}$$

– по первой производной частоты;

$$\frac{U_{\frac{1\omega}{2l}}}{U_{\frac{\Delta\omega}{2l}}} = \frac{T_{\frac{1\omega}{2l}} p^2}{1 + T'_{\frac{1\omega}{2l}} p + T''_{\frac{1\omega}{2l}} p^2 + T'''_{\frac{1\omega}{2l}} p^3 + T''''_{\frac{1\omega}{2l}} p^4}$$

– канала регулирования по второй производной тока статора, а также соответствующего немодифицированного канала регулирования по частоте;

$$\frac{U_{\text{ур}}}{U_{\text{вр}}} = e^{-\tau_{\text{ок}} p} \approx \frac{1 - 12\tau_{\text{ок}} p}{12 + 6\tau_{\text{ок}} + \tau_{\text{ок}}^2 p^2}$$

– запаздывания и

$$\frac{U_{\text{ок}}}{U_{\text{ур}}} = \frac{T_{\text{ок}} p}{1 + T'_{\text{ок}} p + T''_{\text{ок}} p^2}$$

– собственно общего канала регулирования возбуждения;

$$\frac{U_{\text{мв}}}{U - K_{\text{ом}} U_{\text{мв}}} = \frac{K_{\text{мв}}}{1 + T_{\text{мв}} p}$$

– магнитного усилителя электромагнитного корректора напряжения;

$$\frac{U_{\text{вс}}}{U_{\text{ув}}} = \frac{K_{\text{в}}}{1 + T_{\text{ре}} p}$$

– возбудителя;

$$\frac{U_{\text{к}}}{I_{\text{к}}} = \frac{K_{\text{ук}}}{1 + T_{\text{ук}} p}$$

– канала компаундирования;

$$\frac{I_{\text{фг}}}{I_{\text{фд}}} = \frac{T_{\text{фг}} p}{1 + T_{\text{фс}} p}$$

– гибкой отрицательной обратной связи (ОС) по току возбуждения;

$$\frac{U_{\text{ос}}}{U_{\text{вр}}} = \frac{K_{\text{ос}} p}{1 + T_{\text{ос}} p + T_{\text{бс}} p^2}$$

– общей гибкой ОС;  $K_{\text{ом}}$  – внутренней жесткой ОС магнитного усилителя; УРФ – звена релейной форсировки и расфорсировки возбуждения;  $K_{\text{д}}$  – компаундирования по полному току статора;  $K_{\text{фк}}$  – фазового компаундирования, что соответствует акцентному регулированию по реактивному току  $I_{\text{гр}}$  или реактивной мощности  $Q_{\text{г}}$ ;  $K_{\text{с}}$  – статизма корректора напряжения;  $K_{\text{ув}}$  – уставки по напряжению статора;  $K_{\text{уф}}$  – уставки тока возбуждения;  $K_{\text{жос}}$  – жесткой положительной ОС по току возбуждения;  $K_{\text{ов}}$  – канала регулирования по отклонению напряжения статора;  $K'_{\text{ов}}$  – регулирования по отклонению частоты или по отклонению тока статора;  $K_{\text{о}} = (0...1)$  – жесткой отрицательной ОС интегрирующего канала отклонения

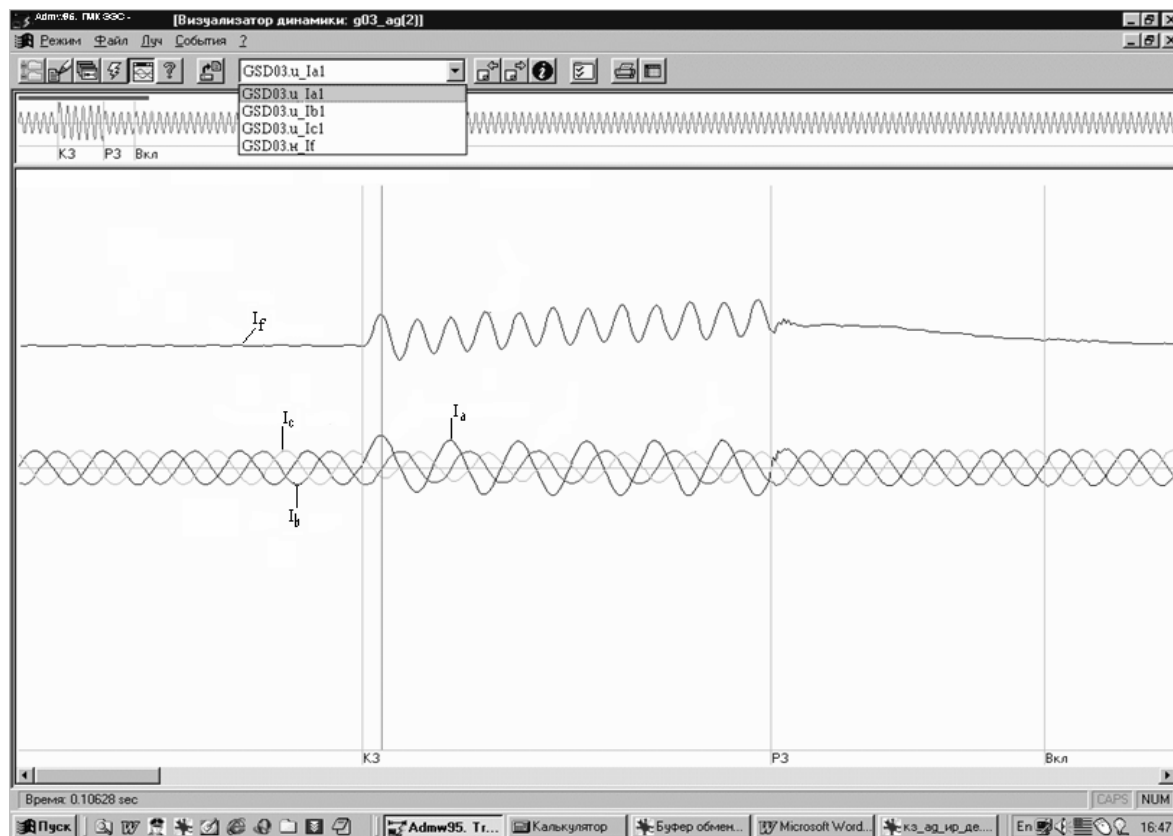


Рис. 2. Фазные токи и ток возбуждения энергоблока 800 МВт Сургутской ГРЭС-2 при однофазном коротком замыкании в сети

напряжения;  $K_{1U}$ ,  $K_{1I}$ ,  $K_{1\omega}$  – каналов регулирования возбуждения по первой производной напряжения статора, по первой производной тока возбуждения и по первой производной частоты или по второй производной тока статора, соответственно.

Обычная замена передаточных функций соответствующими дифференциальными уравнениями с учетом указанных в операторной схеме функциональных взаимосвязей и нелинейных ограничений, приводит к модели СВ в виде системы уравнений. Варьируя параметры, коэффициенты уравнений и обнуляя соответствующие из них, данную модель можно адаптировать для воспроизведения любых известных СВ, а также произвольного вида с целью модернизации и исследования новых СВ.

Адекватность различных адаптаций полученной математической модели конкретным типам эксплуатируемых в настоящее время СВ надежно подтверждена опытом их использования в составе все режимных гибридных моделирующих комплексов электроэнергетических систем (ГМК ЭЭС) реального времени, созданных в НИЛ «Моделирование ЭЭС», в частности для ОАО «Тюменьэнерго». Все эти результаты докладывались и обсуждались на совещаниях и конференциях, в том числе на Международном симпозиуме в Японии [4–7].

На рис. 2–5 приведены примеры из опыта эксплуатации разработанной модели СВ в составе ГМК ЭЭС, подтверждающие ее практическую адекватность при воспроизведении различных ава-

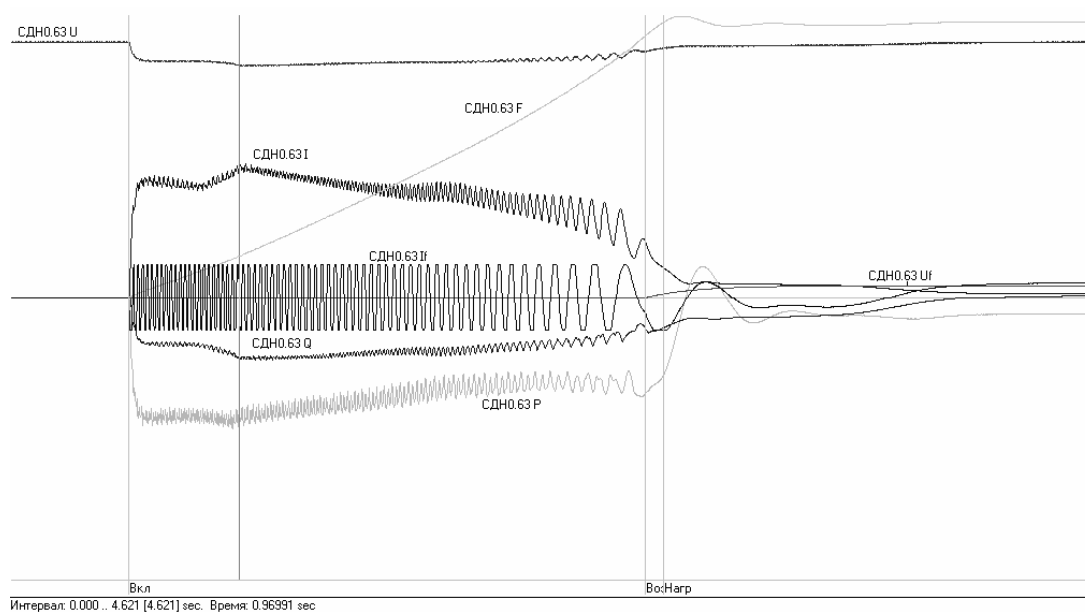


Рис. 3. Процесс нормального пуска синхронного двигателя СДН-14-59-8УЗ, 630 кВт

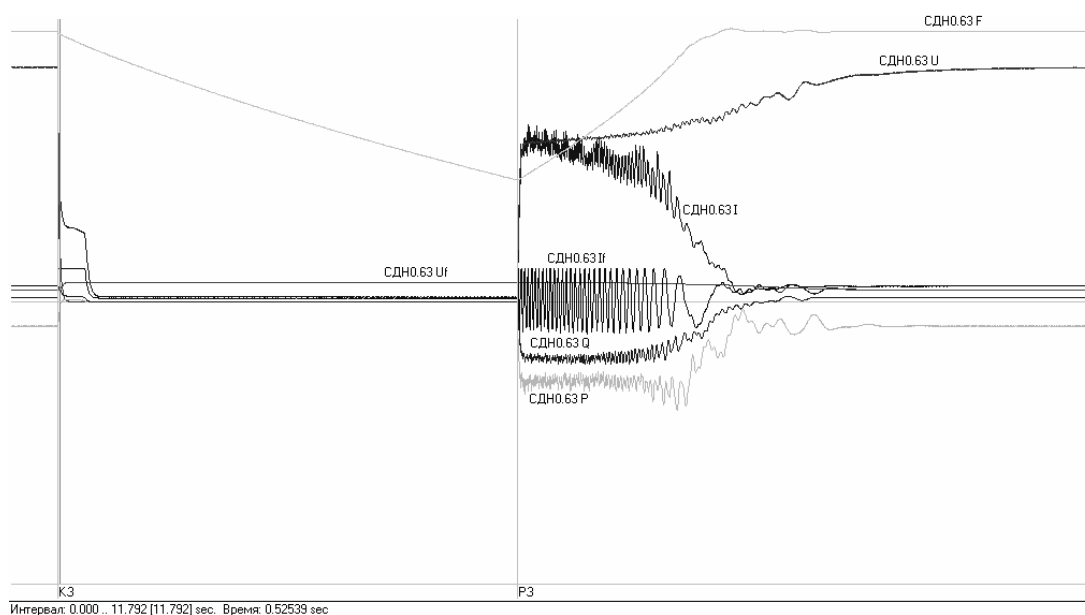
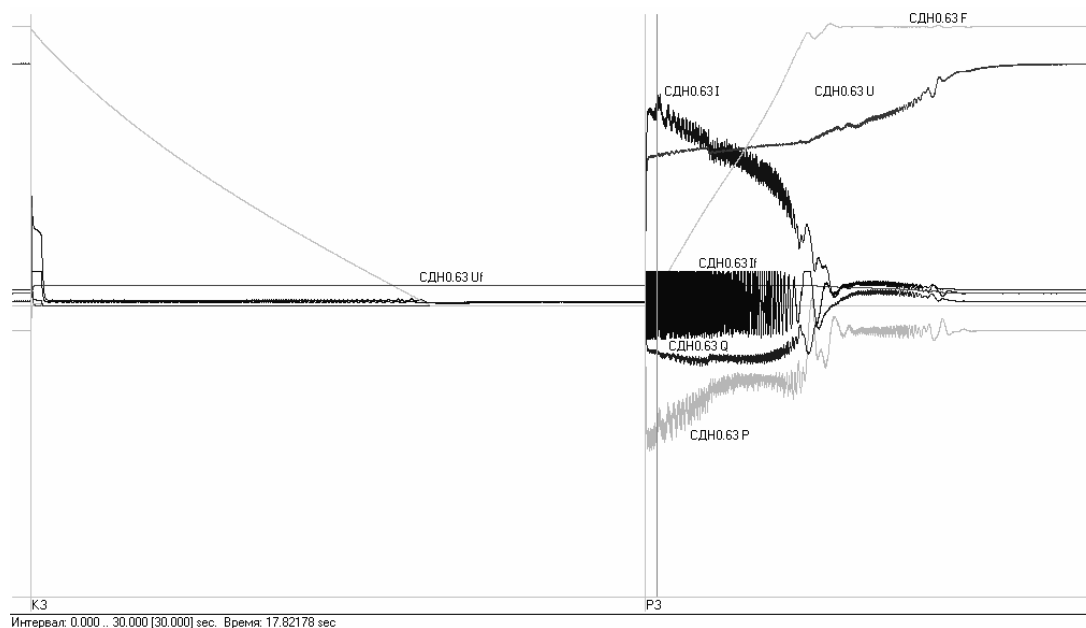


Рис. 4. Процесс самозапуска СДН-14-59-8УЗ, 630 кВт при снижении напряжения в результате короткого замыкания и последующем его восстановлении



**Рис. 5.** Процесс самозапуска СДН-14-59-8УЗ, 630 кВт после его останова в результате длительного короткого замыкания и последующего восстановления напряжения

рийных процессов, в которых осциллограммы тока возбуждения  $I_f$  наиболее наглядно иллюстрируют достоверность моделирования.

Необходимость радикального повышения достоверности математического моделирования режимов и процессов в ЭЭС, являющегося, в силу их известной специфики, основным способом получения этой информации, диктуется постоянно большим числом тяжелых аварий, причиной примерно 50 % которых прямо или косвенно служит неполная и недостаточно достоверная указанная информация, используемая на этапах проектирования, эксплуатации и развития энергосистем. В

частности, многочисленными исследованиями и опытом эксплуатации доказана непосредственная зависимость достоверности определения колебательной устойчивости режимов ЭЭС от точности математических моделей СВ.

#### Заключение

Разработана и надежно проверена на практике адаптируемая математическая модель системы возбуждения синхронных машин, позволяющая с необходимой точностью моделировать все известные системы возбуждения с учетом автоматических регуляторов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гамм Б.З. Влияние точности схемы замещения регулятора возбуждения сильного действия на электромеханические переходные процессы синхронных машин // Труды СИБНИИЭ: Переходные процессы и режимы работы электроэнергетических систем. – М.: Энергия, 1973. – Вып. 24. – С. 79–84.
2. Автоматическое регулирование и управление в энергосистемах // Труды ВЭИ. – М.: Энергия, 1977. – Вып. 83. – 160 с.
3. Покровский М.И., Любарская Н.В. Математическое описание полупроводникового регулятора возбуждения сильного действия для расчетов статической и динамической устойчивости // Труды ВЭИ. – М.: Энергия, 1980. – С. 27–30.
4. Гусев А.С., Свечкарев С.В., Плодистый И.Л. О применении гибридного моделирующего комплекса электроэнергетической системы для наладки станций возбуждения турбогенераторов // Электроэнергия и будущее цивилизации: Матер. Междунар. научно-техн. конф. – Томск: Томский государственный университет, 2004. – С. 329–330.
5. Гусев А.С., Свечкарев С.В., Плодистый И.Л. Гибридный моделирующий комплекс ЭЭС: результаты разработки, исследования и опытной эксплуатации // Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов: Сб. трудов III Всеросс. научно-техн. конф. с междунар. участием в 2 т. – Благовещенск: Изд-во АмГУ, 2003. – Т. 1. – С. 216–222.
6. Gusev A.S., Svechkarov S.V., Plodisty I.L. The problem of power system modeling, the concept hybrid solution // The 10<sup>th</sup> IFAC/IFORS/IMACS/IFIP Symp. in Large Scale Systems: Theory and Applications (LSS 2004). – Japan, Osaka, Osaka International Convention Center, July 26–28, 2004. – V. 1. – P. 440–445.
7. Gusev A.S., Svechkarov S.V., Plodisty I.L. Basic aspects of modeling problem for electrical power systems, perspectives and methods of their solution // 9<sup>th</sup> Korea-Russia Intern. Symp. on Science and Technology (KORUS 2005). – Russia, Novosibirsk, Novosibirsk State Technical University, June 26–July 2, 2005. – P. 322–326.