

# Особенности алгоритма реализации системных функций в российских автоматических регуляторах возбуждения сильного действия

А. Л. Комков, Е. Н. Попов,  
Н. Ю. Филимонов – ООО «НПП «РУСЭЛПРОМ-Электромаш»  
А. А. Юрганов – СПбПУ Петра Великого  
А. А. Бурмистров – ПАО «Силловые машины»

**Надежность и эффективность работы электроэнергетических систем (ЭЭС) в значительной мере определяется регулированием возбуждения входящих в нее синхронных генераторов и в первую очередь подсистем автоматических регуляторов возбуждения (АРВ), обеспечивающих максимальный уровень динамической устойчивости и эффективное демпфирование колебаний.**

Следует заметить, что проблемой стабилизации режимов ЭЭС и разработкой унифицированного алгоритма системных стабилизаторов начали интенсивно заниматься в СССР в начале 50-х годов прошлого столетия и окончательно завершили ее в 80-е годы, когда полностью сформировалась идеология внешней и внутренней стабилизации, и появился сигнал производной тока возбуждения.

Этот период характеризуется быстрым развитием электроэнергетики страны. В то время были построены каскады крупных ГЭС, мощные тепловые и атомные станции. По географическим условиям мощные гидроэлектростанции строились вдали от крупных населенных пунктов и промышленных предприятий. Возникла необходимость передавать электроэнергию потребителям на большое расстояние. Строительство параллельных линий для усиления электрической связи было дорогостоящим решением, поэтому требовалось найти иные способы решения проблемы. Начала активно развиваться теория устойчивости электроэнергетических систем, в результате первый в мире системный стабилизатор был разработан и внедрен практически в том виде, как он существует сейчас. СССР имел большую территорию и разветвленную электроэнергетическую систему, обладавшую большим числом как слабых, так и сильных электрических связей между отдельными регионами.

На Западе начальный импульс в разработке системных стабилизаторов был дан в 70-х годах в Канаде из-за возникшей необходимости передавать мощность 500 МВт от АЭС «Пикеринг» и ГЭС в провинции Онтарио по линиям электропередач протяженностью примерно 700 км и напряжением 500 кВ потребителям в США. Без быстродействующих систем возбуждения, оснащенных системными стабилизаторами, понадобились бы дополнительные линии. В Западной Европе эта проблема возникла еще позднее – при вводе в эксплуатацию турбинных блоков мощностью более 300 МВт. Сейчас на Западе разработано около 10 типов системных стабилизаторов, описание которых приведено в стандарте IEEE Std 421.5.

С учетом того, что отечественный стабилизатор успешно зарекомендовал себя в различных схемно-режимных ситуациях, было предложено рас-



Фото 1. Микропроцессорное производство для систем возбуждения синхронных генераторов



Фото 2. Для изготовления микроэлектроники на предприятиях концерна РУСЭЛПРОМ используется передовое высокоточное оборудование

смотреть вопрос о его включении в международные стандарты под названием PSS2RU. Для этого потребовалось предоставить полное описание и привести результаты расчетов, чтобы оценить его эффективность по сравнению со стабилизаторами, включенными в стандарт IEEE Std 421.5.

### Описание системного стабилизатора PSS2RU

Задача любого системного стабилизатора – демпфирование электромеханических колебаний, лежащих в диапазоне частот от 0,1 до 5 Гц. Эти колебания обусловлены качаниями роторов синхронных генераторов друг относительно друга. Полный взаимный угол между двумя машинами в любой схемно-режимной ситуации может быть разложен на две составляющие – внутренний и внешний угол. Внутренний угол – это угол между поперечной осью машины, совпадающей с вектором синхронной ЭДС  $E_q$  и вектором напряжения генератора  $U_g$ . Внешний угол – это угол между вектором напряжения генератора  $U_g$  и вектором синхронной ЭДС другой машины или центром электрических качаний синхронной машины (электростанции), работающей в сложной энергосистеме. Внутренний угол образуется в результате падения напряжения на внутреннем продольном индуктивном сопротивлении машины ( $X_d$ ). Внешний угол образуется в результате падения напряжения на сопротивлениях внешних по отношению к рассматриваемому генератору элементов ЭЭС.

Качания полного угла – результат совместного движения роторов – имеют двойственную природу:

- в режимах выдачи реактивной мощности – устойчивость определяется величиной и качаниями внешнего угла, который в тяжелых послеаварийных режимах или в «слабых» ЭЭС в этом случае может приближаться к 90 град. эл.;

- в режимах потребления реактивной мощности – устойчивость определяется величиной и качаниями внутреннего угла, который при уменьшении тока воз-

буждения генератора, работающего в ЭЭС любой мощности, может приближаться к 90 град. эл.

Таким образом, при одинаковых больших значениях полного угла физика переходных процессов и условия обеспечения аperiodической и колебательной статической устойчивости существенно отличаются. Стабилизация режима, предлагаемая западными стандартами, это явление не учитывает.

В результате аналитических и экспериментальных исследований и опыта эксплуатации синхронных генераторов выяснилось, что отклонениям внутреннего угла пропорциональна производная тока ротора. Отклонение частоты напряжения генератора  $\Delta f_U$  от установившегося значения и первая производная  $\Delta \dot{f}_U = \dot{f}_U$  генератора являются первой и второй производными внешнего угла соответственно. Таким образом, имеются два легко измеряемых параметра, каждый из которых способен осуществлять демпфирование соответствующей компоненты взаимного угла. Следовательно, входными параметрами рассматриваемого стабилизатора являются ток ротора ( $I_f$ ) и частота напряжения генератора ( $f_U$ ).

Блок-схема системного стабилизатора PSS2RU показана на рис. 1. Стабилизатор состоит из двух каналов, соединенных параллельно. Выходные сигналы каждого канала суммируются на главном сумматоре. Просуммированный сигнал является выходным сигналом стаби-

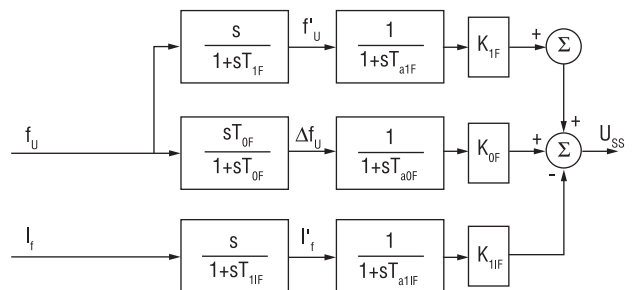


Рис. 1. Блок-схема стабилизатора PSS2RU

лизатора. Передаточные функции задают необходимую форму амплитудочастотной и фазочастотной характеристик каждого канала. Два канала перекрывают диапазон частот электромеханических колебаний. Канал по частоте настраивается на частотный диапазон от 0,3 до 1,2 Гц, канал по производной тока ротора настраивается на частотный диапазон от 1 до 3 Гц. Типовые значения постоянных времени приведены в табл. Сравнительные испытания, проведенные НТЦ СО ЕЭС РФ, показали его высокую эффективность.

Типовые значения параметров (с) стабилизатора PSS2RU	
$T_{0F}$	2
$T_{a0F}$	0,02
$T_{1F}$	0,05
$T_{a1F}$	0,15
$T_{11F}$	0,02
$T_{a11F}$	0,15

### Релейная форсировка возбуждения

Совместно со стабилизатором PSS2RU применяется быстродействующая форсировка возбуждения. Ее функцией является повышение динамической устойчивости при серьезных повреждениях в энергосистеме, обусловленных снижением напряжения. Логика форсировки возбуждения изображена на рис. 2.

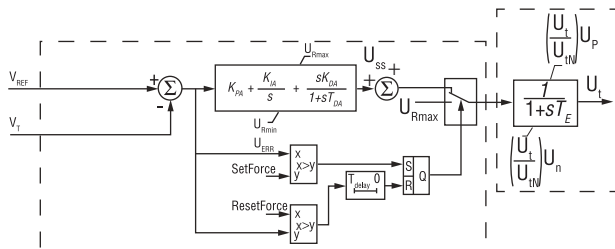


Рис. 2. Логика работы реле форсировки

При снижении напряжения ниже уставки срабатывания контроллер инициирует быстрое увеличение напряжения возбуждения до максимального значения до тех пор, пока напряжение статора генератора не повысится до уставки на снятие форсировки (0,8...0,9)  $U_{Тном}$ . Включение форсировки происходит с минимальной выдержкой времени, а отключение с выдержкой времени от 0,2 до 0,3 с, что соответствует времени достижения максимального значения взаимного угла между роторами синхронных машин в послеаварийном режиме качаний. Форсировка также необходима для того, чтобы исключить на время протекания КЗ тракт регулирования из закона управления, так как резкие скачки токов, напряжений и частоты могут привести к снижению скорости нарастания напряжения возбуждения из-за противоположных воздействий от разных каналов регулирования.

### Результаты расчета

Эффективность системного стабилизатора была проверена на математической модели четырехмашинной энергосистемы (схема Кундура, рис. 3), часто рассматриваемой в работах западных исследователей, в среде MATLAB/Simulink Sim Power Systems. Модель представляет собой две области, каждая из которых содержит по два синхронных генератора. Области соединены между собой двумя линиями длиной 220 км. Режим уста-

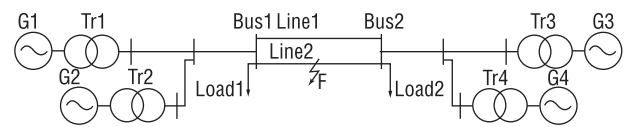


Рис. 3. Четырехмашинная тестовая схема электроэнергетической системы



Фото 3. Сборочный цех систем возбуждения и систем управления возбуждением синхронных генераторов

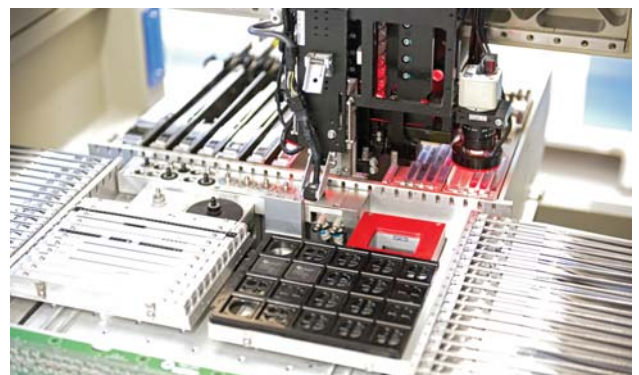


Фото 4. Все силовое оборудование, микропроцессорная аппаратура и программное обеспечение выпускаемой продукции разработаны в стенах НПП «РУСЭЛПРОМ-Электромаш»



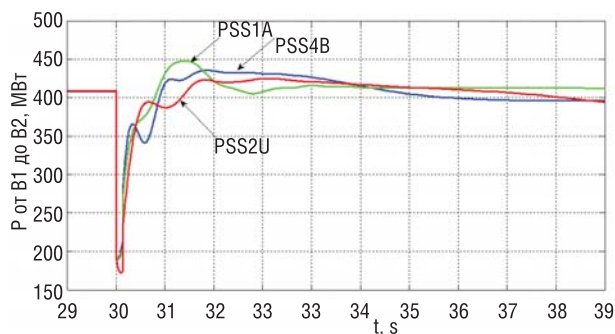


Рис. 4. Активная мощность, передаваемая из области 1 в область 2 при трехфазном коротком замыкании в середине линии с последующим ее отключением. Длина транзита 220 км

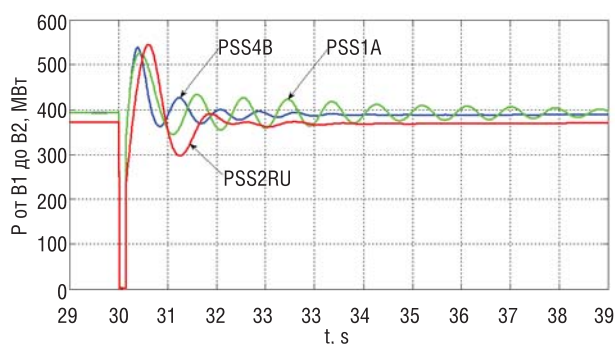


Рис. 5. Активная мощность, передаваемая из области 1 в область 2 при трехфазном коротком замыкании в середине линии с последующим ее отключением. Длина транзита 10 км

новлен таким образом, что осуществляется передача 413 МВт из первой области во вторую.

Тестовым возмущением является трехфазное короткое замыкание в середине одной линии с последующим ее отключением. Проведено сравнение PSS2RU со стабилизаторами, включенными в стандарт IEEE Std 421.5. Стабилизаторы PSS1A и PSS4B имеют в качестве входного параметра скорость вращения ротора. В PSS1A сигнал скорости вращения последовательно проходит через фильтры и несколько фазосдвигающих звеньев. В PSS4B сигнал скорости вращения раздваивается и проходит в одном случае через датчик низких и средних частот, в другом – через датчик высоких частот. Далее сигналы проходят через фазосдвигающие звенья, которые выделяют низкие, средние и высокие частоты, после чего каждая компонента усиливается в зависимости от частоты. Полное описание PSS1A и PSS4B дано в стандарте. Результаты представлены на рис. 4.

В энергосистеме ситуация, когда присутствует длинный транзит и создаются такие тяжелые условия, является редкостью. Подобные условия могут возникнуть, если существует слабая связь или при неблагоприятных обстоятельствах при ремонтных схемах. Чтобы убедиться в эффективности стабилизатора в различных условиях, выполним такое же тестовое возмущение, но при транзите длиной 10 км. Следует отметить, что при уменьшении длины транзита до 10 км условия устойчивости энергосистемы улучшились, но такое же тестовое возмущение будет оказывать более сильную просадку напряжения на шинах генераторов, так как точка короткого замыкания стала находиться электрически ближе к каждому генератору. Результаты расчетов представлены на рис. 5.

При совместном рассмотрении результатов расчета на рис. 4, 5 можно сделать заключение, что стабилизатор PSS2RU при неизменной настройке осуществляет эффективное демпфирование колебаний как при длинном, так и при коротком транзите. При длинном транзите воздействуют все каналы стабилизатора, так как внут-

ренний и внешний угол имеют одинаковый порядок величины. При коротком транзите внешний угол становится малым, поэтому даже при тех же самых настройках каналы по отклонению частоты и по производной частоты начинают вносить на порядок меньший вклад в суммарный сигнал системного стабилизатора по сравнению с каналом по производной тока ротора. Можно сказать, что при коротком транзите каналы стабилизатора по отклонению частоты и по производной частоты выключаются из работы, исходя из физической сущности процессов. Поэтому единая настройка оказывается достаточно эффективной в существенно различных условиях.

### Заключение

Мы отметили основные вехи истории создания, особенности структуры и функционирования российского системного стабилизатора. Благодаря отмеченным выше свойствам и широкому распространению на электростанциях России и ближайшего зарубежья, а также принимая во внимание простоту и грубость настройки своих параметров, системный стабилизатор PSS2RU должен занять значимое место в библиотеках основных программных продуктов для выполнения сетевых исследований. Для этого важно провести работу по интеграции структуры системного стабилизатора PSS2RU и алгоритма релейной форсировки в документы международных организаций IEC и IEEE.



109029, Москва, Нижегородская ул., 32, стр. 15  
 Тел.: 8 (800) 301-35-31  
 Факс: (495) 600-42-54  
 mail@ruselprom.ru  
 ruselprom.ru