

## РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СИНХРОННЫХ МАШИН ПРИ РАБОТЕ НА ВЕНТИЛЯТОРНУЮ НАГРУЗКУ

А.В. Серебряков, О.В. Крюков (Нижний Новгород)

**Введение**

В настоящее время в России значительно возросли темпы и объемы нового строительства и реконструкции объектов транспорта газа [1-4]. Это обусловлено ростом спроса на природный газ в промышленно развитых странах мира и грандиозными планами создания магистральных газопроводов (МГ) из России в Западную Европу, а также в Сибири и на Дальнем Востоке с освоением новых месторождений. Обеспечение стабильных поставок газа потребителям по МГ, снижение его энергоемкости и себестоимости напрямую связаны с модернизацией существующих электроприводных газоперекачивающих агрегатов (ЭГПА) компрессорных станций (КС) [5-9] и автономных генераторных комплексов (АГК) систем электроснабжения (СЭС) [10,11]. Основной машиной, используемой для привода компрессоров КС и в АГК, в частности, в ветроэнергетических установках (ВЭУ), является синхронный двигатель (СД) и генератор (СГ), благодаря известным преимуществам [1,4-9]. Возможности расширения функциональных возможностей СД и СГ, улучшения их характеристик связаны с внедрением новых методов управления и апробацией их путем имитационного моделирования для различных режимов работы газотранспортных объектов.

**Особенности работы синхронных двигателей ЭГПА**

Работа практически всех существующих ЭГПА на КС (рис. 1а) происходит в нерегулируемых машиной режимах транспорта природного газа.

Возможности изменения давления на выходе КС ограничены методами дискретного включения/отключения отдельных агрегатов и дросселированием (перепуском газа) на стороне нагнетания. Поэтому главными проблемами эксплуатируемых ЭГПА являются безопасный пуск и устойчивость работы при возмущениях со стороны питающей сети и нагрузки. При реконструкции электроприводных КС возникает вопрос о целесообразности применения регулируемых систем на базе высоковольтных преобразователей частоты (ВВ ПЧ) и цифровых тиристорных возбуждателей. В первом случае это обусловлено требованиями энергосбережения и строгой стабилизации давления на выходе КС при неравномерном графике подачи и/или потребления газа.

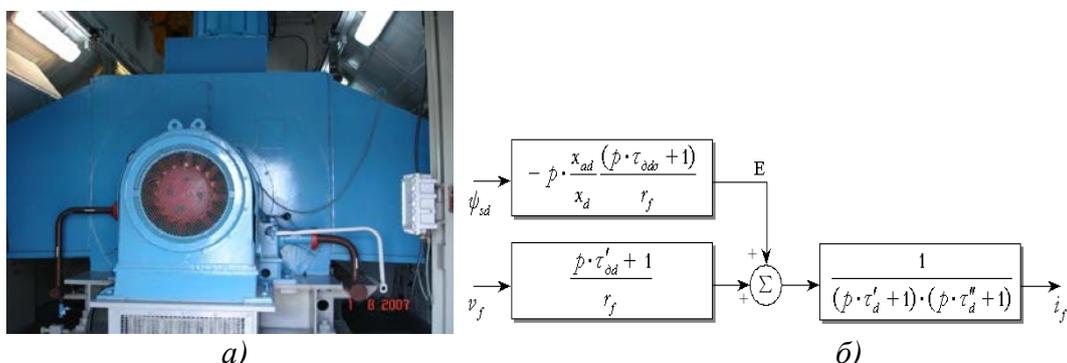


Рис. 1. Общий вид STD-12500-2 ЭГПА (а) и модель контура тока возбуждения СД (б).

Микропроцессорная система управления позволяет технически реализовать векторное регулирование по цепи статора и по цепи возбуждения (рис. 1б) с идентификацией угла нагрузки [12-14], а также интегрировать САУ ЭГПА в АСУ КС.

Во втором случае стабилизация угла нагрузки обеспечивает устойчивую и энергоэффективную работу машины даже в нерегулируемом ЭГПА. Регулирование тока возбуждения СД позволяет формировать оптимальные процессы и снижать ударные значения моментов (например, при гидравлическом ударе в газопроводе). При этом устойчивость СД обеспечивается векторной САУ возбуждением с микропроцессорным идентификатором угла нагрузки. Таким образом, несмотря на то, что выбор оптимальной структуры ЭГПА определяется путем технико-экономического анализа, функциональные возможности новых систем СД необходимо оценить путем моделирования.

### Синхронные электрогенераторы СЭС

Неудовлетворительное состояние традиционных СЭС потребителей МГ приводит к снижению надежности газотранспортных систем. Многие электросети не способны обеспечить требуемую категорию надежности объектов ОАО «Газпром», а резервирование от энергосистемы затруднено из-за необходимости строительства ЛЭП большой протяженности. Источники на основе ВЭУ не обеспечивают стабильно электроэнергией, так как их ветровой поток зависит от природных факторов, носящих стохастический характер [14-16]. Однако надежность и эффективность использования энергии ветра можно обеспечить с помощью гибридных СЭС, где наряду с ВЭУ включен традиционный источник [17-19].

Повышение энергоэффективности гибридных СЭС на базе ВЭУ может быть достигнуто за счет создания новых типов ветродвигателей с использованием современных конструкционных материалов и путем автоматизации систем преобразования энергии с помощью преобразовательной техники [1,20]. Реализация их возможна различными схмотехническими и алгоритмическими методами в соответствии с типами структур ВЭУ с синхронными генераторами. На рис. 2 представлен пример одной из структур гибридной ВЭУ линейных потребителей МГ. Для выбора структуры комплекса и синтеза алгоритмов САУ целесообразно использовать программные средства, определяющие параметры генерирующих, накапливающих и преобразующих узлов.

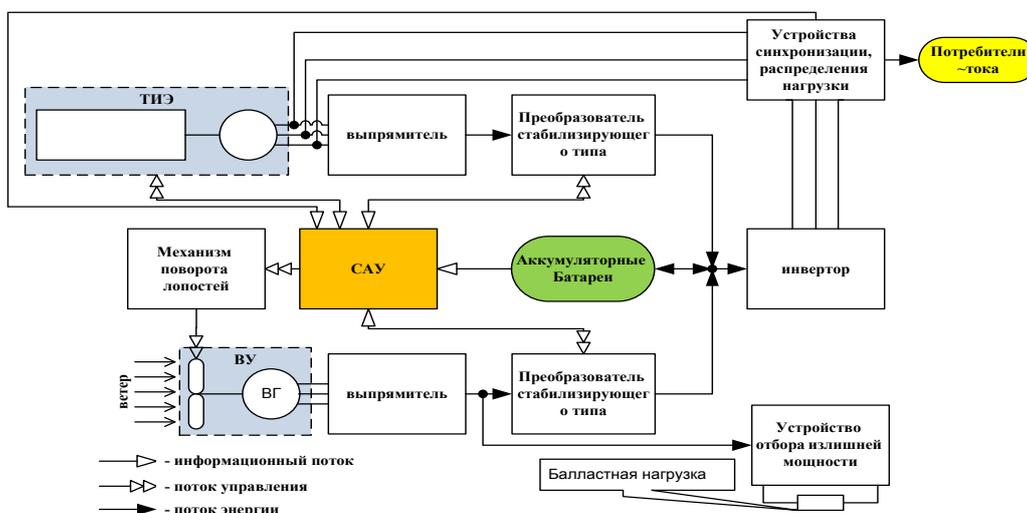


Рис. 2. Трехлучевая структура гибридной ВЭУ с выделенным каналом в нагрузку.

Специализированное ПО реализуется на базе гибридного логического аппарата, состоящего из традиционного и нейро-нечеткого элементов. Нечеткая логика является эффективной в электромеханических системах с неполным математическим описанием и способствует улучшению процессов регулирования «в большом». Оценку эффективности работы синхронного генератора, как центрального элемента такой СЭС, целесообразно проводить также с помощью компьютерного моделирования.

### Компьютерная модель СМ

В качестве примера приведем пакет MATLAB с приложением визуального моделирования Simulink, с библиотекой Sim Power Systems. В этих программных продуктах не требуется полное математическое и логическое описание каждого компонента структуры, что облегчает и ускоряет процесс однократного синтеза блоков. Но при этом существует ряд недостатков: отсутствует возможность быстрого математического и модельного отхода от используемого ПО, усложняется процесс синтеза экспертной системы: по выбору структуры, подбору параметров, а также синтезу САУ.

Указанный способ моделирования не всегда в полной мере отражает всю картину электромеханических процессов в системе. Ряд продуктов ПО позволяет производить визуальное имитационное моделирование на низшем уровне, составлять модели-блоки на основе описания каждого элемента блока, а из готовых блоков собирать интересующую структуру. Элементы блоков моделируются в виде набора передаточных функций и дискретными логическими элементами. Примером такого ПО служит пакет MATLAB с приложением визуального моделирования Simulink (в базовом варианте, без использования библиотеки Sim Power Systems). Рассмотрим модель базовой структуры автономной ВЭУ, представленную на рис. 3 [20,21]. Аналогичная модель представлена в докладе для синхронного ЭГПА [22,23]. Базовая структура условно делится на: блоки ветрогенератора (СГ), выпрямителя, преобразователя; блока отбора мощности, аккумуляторных батарей, инвертора, нагрузки переменного тока и альтернативной нагрузки постоянного тока. В связи с тем, что, как правило, производители указывают параметры синхронных машин в неподвижной относительно ротора машины системе координат (системе  $d,q$ ), в относительных единицах, необходим еще один блок преобразования входных и выходных переменных синхронного генератора из  $d,q$  координатной системы в 3-х фазную систему и обратно. Каждый блок получает свое математическое и логическое описание.

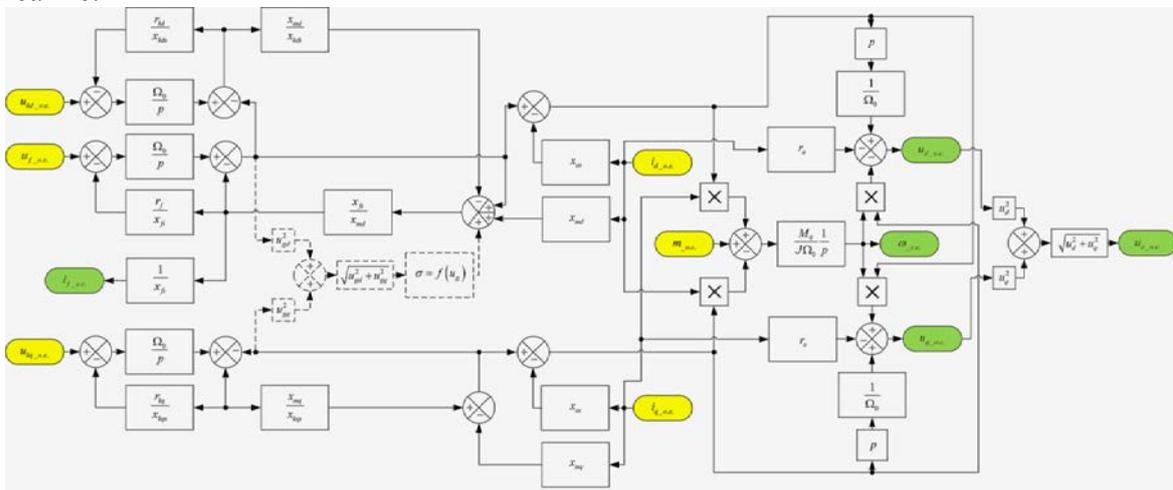


Рис. 3. Имитационная модель синхронной машины.

На основе математического и логического описания каждого блока системы строится его имитационная модель с входными и выходными переменными. Далее имитационные модели отдельных блоков собираются в единую систему, составленную на базе выбранной структуры, в данном случае, базовой структуры.

Для имитационной модели базовой структуры (далее базовой имитационной модели) можно выделить два канала потока переменных: прямой канал напряжения, обратный канал тока. Прямой канал напряжения преобразует параметры напряжения в прямом направлении от генерирующего элемента до нагрузки. На элементе нагрузки канал напряжения преобразуется в обратный канал тока, который «возвращает» значение тока нагрузки к генерирующим элементам комплекса, «прогружая» элементы, по которым он проходит. Данная модель позволяет проводить виртуальные эксперименты, получать динамические и статические характеристики процессов, протекаемых в базовой структуре, при изменении внутренних и внешних воздействий. Анализ полученных данных экспериментов ложится в основу подбора параметров экспериментальной структуры, а также синтеза и настройки САУ системы.

В качестве примера реализации гибридного регулятора рассматривается система стабилизации амплитуды выходного напряжения СГ при меняющихся в функции времени внешних воздействий на систему: скорости вращения вала СГ или электрической статической нагрузки СГ. В этой системе гибридный регулятор выполняет функцию стабилизации амплитуды выходного напряжения СГ посредством воздействия на обмотку возбуждения СГ. В качестве прототипа взята система стабилизации амплитуды выходного напряжения СГ с регулятором амплитудно-фазового компаундирования (АФК) на базе традиционной логики.

Синтез гибридного регулятора решаются итерационно в несколько этапов: описание объекта управления, и составление алгоритма работы фаззи-регулятора; выбор единиц измерения физических величин для синтеза нечеткого регулятора; структура гибридного регулятора на базе нечеткой логики; описание работы гибридного регулятора; алгоритм работы нечеткого регулятора; оценка возможных диапазонов изменения входных и выходных физических переменных, выбор количества фаззи-множеств; составление свода правил; выбор формы и параметров функции принадлежности; моделирование гибридного регулятора.

### Анализ переходных процессов

Ниже представлены результаты моделирования систем стабилизации амплитуды выходного напряжения СГ с регулятором АФК (рис. 4а) и гибридным нечетким регулятором (рис. 4б). Синхронный генератор STAMFORD - MX321 ( $U=380$  В,  $P=81.5$  кВт,  $\cos \varphi=0.8$ ,  $f=50$  Гц). Активно-индуктивная нагрузка с  $\cos \varphi=0.9$ ,  $k=1$ , где  $k$  - кратность номинальной нагрузки.

Анализ полученных данных показывает, что использование гибридного регулятора вместо традиционного улучшает динамические процессы в системах.

### Выводы

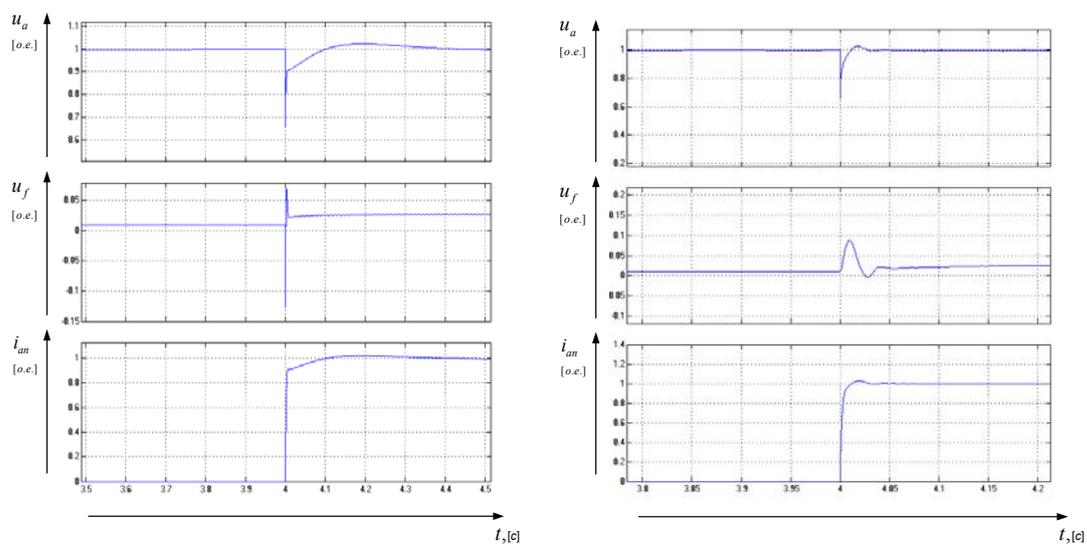
Методика блочного моделирования электромеханических систем позволяет:

- анализировать работу систем на базе синхронных машин любой сложности, составленных из заранее и единожды смоделированных блоков-компонентов;
- упрощает выбор оптимальной структуры и параметров СЭС и ЭГПА, исходя из факторов энергетической эффективности;

- упрощает синтез нейро-нечетких алгоритмов САУ генераторов и приводов.

### Литература

1. Пужайло А. Ф. и др. Энергосбережение и автоматизация электрооборудования компрессорных станций: монография / Под ред. О. В. Крюкова. – Н. Новгород: Вектор ТИС, 2010. – 560с.
2. Милов В.Р., Шалашов И.В., Крюков О.В. Процедуры прогнозирования и принятия решений системе технического обслуживания и ремонта // Автоматизация в промышленности. 2010. № 8. С.47-49.
3. Kruikov O.V. Intelligent electric drives with IT algorithms // Automation and Remote Control. 2013. Т. 74. № 6. С. 1043-1048.
4. Крюков О.В. Частотное регулирование производительности электроприводных ГПА // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2014. № 6. С. 39-43.
5. Крюков О.В., Степанов С.Е. Пути модернизации электроприводных ГПА // Електромеханічні І енергозберігаючі системи. 2012. № 3 (19). С. 209-212.
6. Бабичев С.А., Крюков О.В., Титов В.Г. Автоматизированная система безопасности электроприводных ГПА // Электротехника. 2010. № 12. С. 24-31.
7. Крюков О.В., Краснов Д.В. Перспективы применения преобразователей частоты для регулирования производительности электроприводных ГПА // Газовая промышленность. 2014. №6 (707). С. 86-89.
8. Бабичев С.А., Захаров П.А., Крюков О.В. Мониторинг технического состояния приводных электродвигателей ГПА // Контроль. Диагностика. 2009. № 7. С. 33-39.
9. Крюков О.В. Опыт создания энергоэффективных электроприводов газоперекачивающих агрегатов // В сборнике: Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014 в 2-х томах // Отв. за выпуск И.В. Гуляев. Саранск, 2014. С.157-163.
10. Васенин А.Б., Крюков О.В., Серебряков А.В., Плехов А.С. АСУ систем электроснабжения на принципах SMART GRID для объектов магистральных газопроводов // Автоматизация в промышленности. 2012. № 4. С. 36-38.
11. Крюков О.В., Степанов С.Е., Титов В.Г. Встроенные системы мониторинга технического состояния электроприводов для энергетической безопасности транспорта газа // Энергобезопасность и энергосбережение. 2012. №2. С. 5-10.
12. Степанов С.Е., Крюков О.В., Плехов А.С. Принципы автоматического управления возбуждением синхронных машин газоконпрессорных станций // Автоматизация в промышленности. 2010. № 6. С. 29-31.



а) б)  
Рис. 4. Процессы в СГ с САР АФК (а) и с нечеткой САР (б).