

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого»

На правах рукописи

ПЕРЕСЛЫЦКИХ Олег Олегович

**Управление дальними линиями электропередачи переменного тока на
основе искусственного интеллекта**

Направление подготовки 13.00.00 – Электро- и теплотехника

Направленность 2.4.3 – Электроэнергетика

Научный доклад
об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)

Автор работы: аспирант
Переслыцких Олег Олегович
Научный руководитель: доктор
технических наук, доцент
Беляев Андрей Николаевич

Санкт-Петербург – 2022

Научно-квалификационная работа выполнена в Высшей школе электроэнергетических систем Института энергетики федерального автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

- Директор ВШ: Зверев Сергей Геннадьевич
кандидат технических наук, доцент
Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО «СПбПУ»)
- Научный руководитель: Беляев Андрей Николаевич
доктор технических наук, доцент
Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО «СПбПУ»)
- Рецензент: Коровкин Николай Владимирович
доктор технических наук, профессор
Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте библиотеки по адресу: <https://elib.spbstu.ru/>

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Увеличение потребления электроэнергии неизбежно ведёт к увеличению её генерации. Вместе с этим добыча традиционного топлива, необходимого для работы электростанций, часто происходит вдали от центров нагрузки – мегаполисов и их агломераций, поэтому на первый план выходит вопрос о создании источников электроэнергии непосредственно в месте добычи. Для передачи электроэнергии на большие расстояния в первую очередь необходимо решить вопрос, на каком напряжении это делать – на постоянном или на переменном, и как обеспечить устойчивость такой энергосистемы.

Устойчивость параллельной работы синхронных машин является одним из самых важных факторов при работе энергосистемы. Будучи сложным объектом, энергосистема постоянно подвергается воздействию различных возмущений, начиная от малых (колебания нагрузки) и заканчивая большими (отключение межсистемных линий, короткие замыкания), каждое из которых может привести к нарушению нормального режима работы. Обеспечение устойчивости электроэнергетической системы в первую очередь зависит от правильности работы автоматических регуляторов возбуждения. Эти регуляторы также важны для сохранения качества электроэнергии в требуемых диапазонах.

В последнее время всё чаще возникают ситуации, когда фиксированные настройки этих регуляторов не в состоянии обеспечить должного уровня демпфирования колебаний (что может привести к потере устойчивости). Это происходит из-за того, что настройки автоматических регуляторов выбираются исходя из ограниченного списка режимов работы и возможных переходных процессов, тогда как в реальной энергосистеме, из-за её сложности, существует бесконечное количество различных конфигураций.

Широкое внедрение технологий машинного обучения и нейронных сетей позволяет начать внедрение адаптивных регуляторов возбуждения, переложив задачу выбора и расчета параметров систем возбуждения с человека на компьютер, вплоть до синхронизированного изменения настроек автоматических регуляторов в режиме реального времени.

Степень разработанности темы исследования

За последние годы было проведено достаточное количество исследований, посвящённых автоматическим регуляторам возбуждения, работающим в длинных линиях. Так, исследование статической устойчивости проводил А.А. Рагозин [1], который в своей работе предложил использовать управляемые шунтирующие реакторы, установленные в линии через одинаковые расстояния. Было показано, что передача натуральной мощности для такой линии может обеспечиваться только на длинах не более 2400 километров, при этом теоретическим ограничением является значение в 3000 километров, при котором суммарный угол достигает своего предела, равного 180 эд. град. В другой работе, И.В. Кашин [2] рассмотрел аналогичную схему, но при добавлении в середину линии синхронного компенсатора относительно небольшой мощности, предназначенного для демпфирования переходных процессов. Ручной выбор коэффициентов регулирования этого синхронного компенсатора позволил повысить предельную длину линии, при которой передавалась бы мощность, близкая к натуральной. Более того, было преодолено теоретическое ограничение на суммарный угол на передаче. Так, для линии в 4000 километров предельная передаваемая мощность составила 87% от $P_{\text{нат}}$, а суммарный угол на передаче был равен 247 эд. град. Широкое распространение персональных компьютеров и программного обеспечения, способного осуществить численный поиск оптимальных параметров автоматических регуляторов возбуждения, а также начавшееся внедрение нейронных сетей в состоянии существенно улучшить не только качество переходных процессов, но и повысить пределы передаваемой по таким линиям мощности.

Цели и задачи

Целью работы является синтез адаптивного регулятора возбуждения в длинных линиях переменного тока с помощью нейронных сетей для повышения уровня статической и динамической устойчивости и улучшения демпфирования колебаний в переходных процессах.

Задачами, решаемыми в ходе работы являются:

1. Расчёт и анализ различных установившихся режимов дальнейшей линии переменного тока;
2. Определение влияния различных конфигураций каналов регулирования на максимальную мощность, передаваемую по линии, при различных режимах оптимизации при использовании синхронных компенсаторов относительно малой мощности (5-10%) и статических тиристорных компенсаторов;
3. Исследование статической и динамической устойчивости длинных линий при различных схемно-режимных параметрах, улучшение условий протекания переходных процессов путём совместной координации коэффициентов регулирования автоматических регуляторов возбуждения синхронных машин и устройств поперечной компенсации методом численного поиска;
4. Анализ существующих исследований в области адаптивных и нейросетевых подходов для улучшения условий управления регулированием возбуждения в крупных энергосистемах;
5. Синтез адаптивного регулятора возбуждения методом обучения с подкреплением в сетях типа «исполнитель-критик» и сравнение его работы с традиционными АРВ сильного действия.

Научная новизна

1. Обосновано централизованное применение в системах управления данных СМПП, позволившее как увеличить уровень статической устойчивости, так и реализовать работы передачи только с помощью статических устройств;

2. Впервые выполнен расчет динамической устойчивости сверхдальней передачи, позволивший определить необходимый набор мероприятий по ее повышению;
3. Выполнены синтез и оценка эффективности централизованного регулятора возбуждения на основе искусственных нейронных сетей и метода обучения с подкреплением на примере сети типа «исполнитель-критик».

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Улучшены показатели предельно передаваемой мощности для исследуемой линии по сравнению с предыдущими работами, повышено качество переходных процессов;
2. Для этого была разработана структурная схема классического регулятора возбуждения с дополнительными каналами регулирования и проведена оптимизация этих каналов;
3. Проведён опыт двухфазного короткого замыкания для определения динамической устойчивости с применением продольного электрического торможения и быстродействующего регулирования мощности турбины, в результате которого система сохранила устойчивость;
4. Сформулированы требования к разработке адаптивных регуляторов возбуждения нейросетевыми методами;
5. Синтезирован адаптивный регулятор возбуждения, способный адекватно управлять напряжением возбуждения синхронных машин в режимах, на которых он не проходил обучение.

Методология и методы исследования

В работе применялись нейросетевые методы машинного обучения с подкреплением на основе сетей «исполнитель-критик», для определения статической и динамической устойчивости использованы методы теории

электрических машин, автоматического регулирования, в том числе метод численного поиска, реализованный в среде «Matlab&Simulink».

Защищаемые научные положения

1. Метод численного поиска для расчёта коэффициентов каналов регулирования АРВ;
2. Выбор типа каналов и предела регулирования в автоматических регуляторах возбуждения;
3. Выявление закономерностей при формировании модели обучения с подкреплением в зависимости от количества и типа слоёв;
4. Обоснование эффективности применения полученного адаптивного регулятора и сравнение его с работой классического АРВ сильного действия.

Степень достоверности и апробация результатов

Предлагаемые в работе алгоритмы и методы опробованы в программном комплексе Dymola, их достоверность подтверждена расчётами в Matlab. Основные положения работы докладывались и обсуждались на трёх международных конференциях. Также, было опубликовано восемь печатных работ, включая три в русскоязычных изданиях из перечня Высшей Аттестационной Комиссии и три статьи в изданиях, индексируемых в международных реферативных базах цитирования Scopus и Web of Science на английском языке.

Личный вклад автора

Создание системы уравнений для реализации метода численного поиска и оптимизации коэффициентов каналов регулирования автоматических регуляторов на языке «Matlab&Simulink». Разработка схемы расчёта переходных процессов для рассматриваемой длинной линии. Разработка и исследование модели адаптивного регулятора возбуждения, обучение указанной модели на основе нейронной сети типа «исполнитель-критик».

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведены обоснование актуальности выбранной темы исследования, степень её разработанности, цели и задачи научной работы, научная новизна, практическая значимость работы, методы исследования, защищаемые научные положения, степень достоверности, апробация результатов работы, публикации и личный вклад автора.

В первой главе представлена структурная схема автоматического регулятора возбуждения сильного действия, указаны основные принципы стабилизации на примере двухмашинной схемы энергосистемы. Для улучшения качества переходных процессов, повышения уровня статической устойчивости и пределов передаваемой мощности в дальних линиях переменного тока, было рассмотрено совместное применение синхронных компенсаторов небольшой мощности в дополнение к статическим тиристорным компенсаторам.

Объектом исследования была выбрана линия электропередачи, представленная на рис. 1. Длина линии составляет 4000 километров, она разбита на восемь участков по 500 километров каждый, номинальное напряжение 1150 кВ, 12 проводов в фазе (линия повышенной натуральной мощности). В каждом из восьми узлов установлен статический тиристорный компенсатор (СТК), который может как потреблять, так и выдавать реактивную мощность. Он представляет собой управляемый шунтирующий реактор с батареей конденсаторов. В узле 5 дополнительно установлен синхронный компенсатор (СК) сравнительно малой мощности, необходимый для демпфирования переходных процессов. В установившемся режиме работы реактивная мощность в СК равняется нулю. Базисными величинами выбраны номинальные параметры линии: $S_{\text{баз}} = 7340 \text{ МВА}$ (натуральная мощность линии), $U_{\text{баз}} = 1150 \text{ кВ}$.

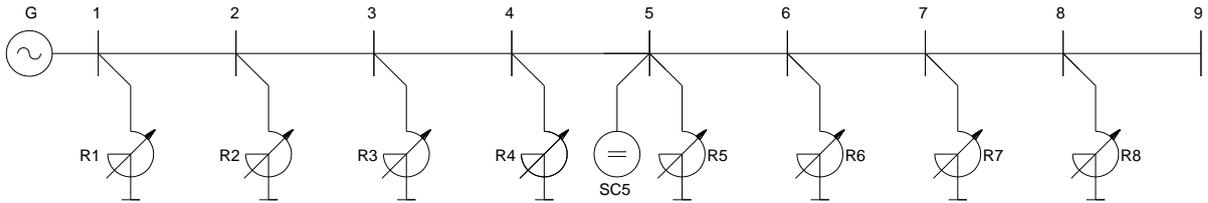


Рис. 1. Упрощенная схема электропередачи

Синхронные машины моделируются полными уравнениями Парка-Горева без учета быстропереходных процессов в статорных контурах. Статические устройства компенсации реактивной мощности задаются переменными проводимостями без учета процессов в стали. Генератор и синхронный компенсатор оснащены системой АРВ сильного действия с каналами по отклонению напряжения, частоты, а также их производных. В статических устройствах компенсации принята система регулирования с обратными связями по напряжению, частоте и ее производной [3].

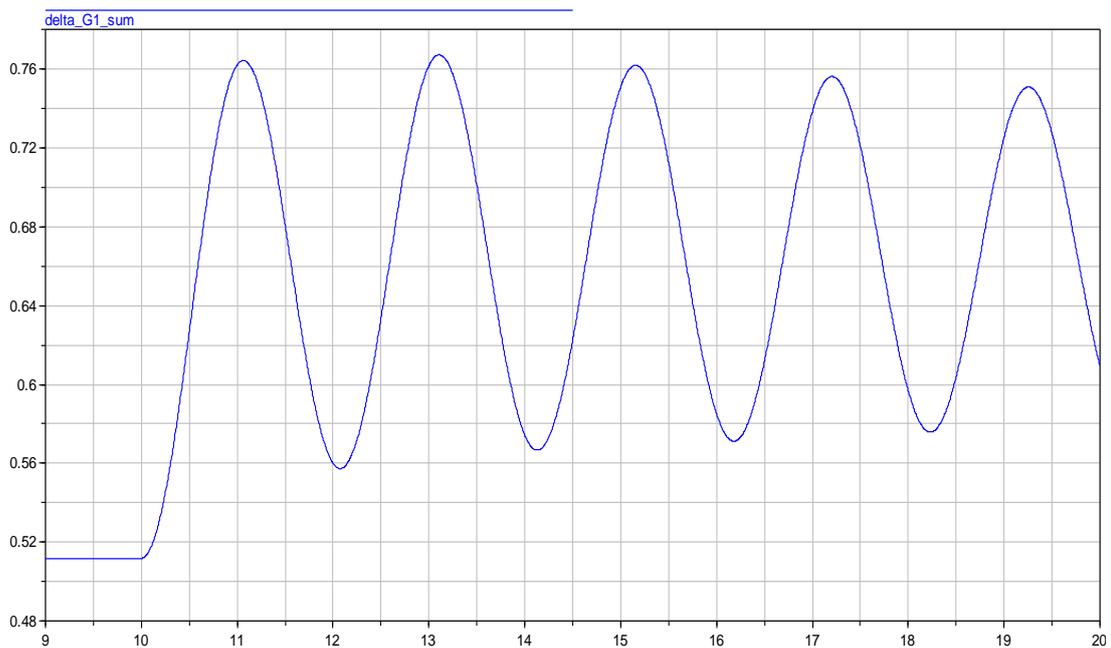
Напряжение на промежуточных подстанциях варьируется в пределах от 1 о.е. до 1,05 о.е., а мощность СК – от 360 до 1000 МВА. Для проведения опыта была разработана модель энергосистемы на языке Modelica и написаны программы анализа устойчивости в программном комплексе Matlab. В качестве возмущения используется наброс мощности на вал турбины от 0,1 до 5% от натуральной. Для нахождения коэффициентов автоматических регуляторов был применён метод сдвига собственных значений матрицы переменных состояния [4]. Рассматривается его применение как при настройке на один какой-то режим, так и на несколько одновременно.

В таблице 1 представлены характеристические корни, соответствующие настройке регуляторов обратной связи на передачу натуральной мощности для различных режимов работы от холостого хода до предельной передаваемой мощности. Полученный переходный процесс при малом набросе мощности изображён на рис. 2.

Таблица 1. Характеристические корни системы при оптимизации на режим передачи натуральной мощности

$S_{СК} = 360 \text{ МВА}, U = 1.0 \text{ о.е.}$			
$P = 0$	$P = 0.1$	$P = 1.0$	$P_{\text{перед}} = 1.05$
$-4.29 \pm j18.66$	$-4.31 \pm j18.66$	$-3.89 \pm j3.99$	$-3.72 \pm j18.28$
-3.57	-2.78	$-3.69 \pm j0.64$	-3.25
-1.00	-1.00	-1.58	$-1.57 \pm j0.94$
$-0.73 \pm j0.19$	$-0.48 \pm j0.29$	-1.00	-1.00
$-0.09 \pm j3.01$	$-0.04 \pm j4.07$	-0.37	0.02

а)



б)

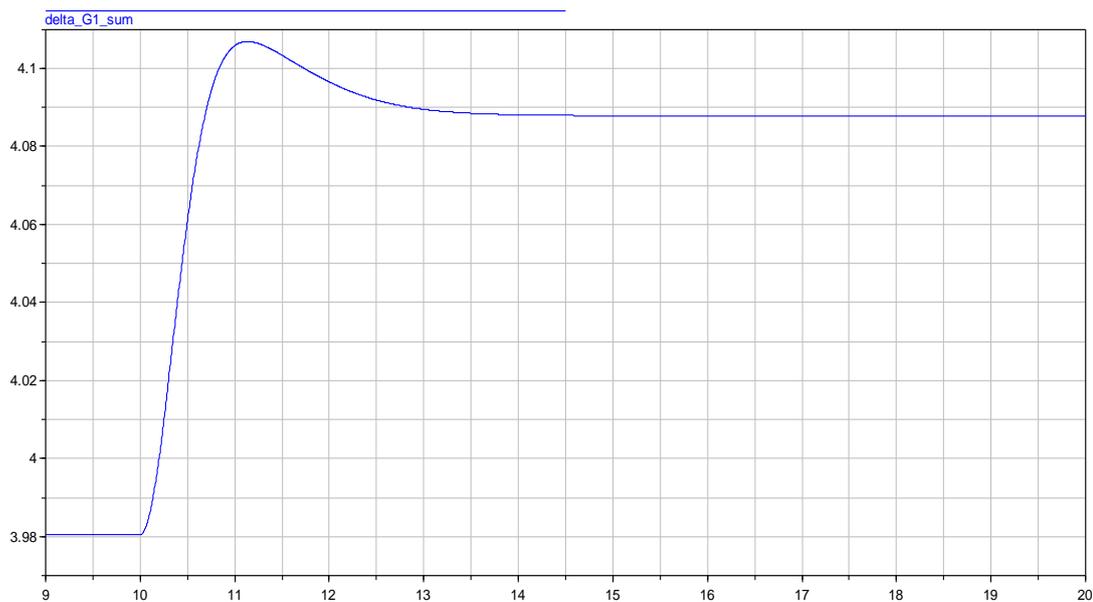


Рис. 2. Переходный процесс (изменение суммарного угла на передаче) при малом набросе мощности: (а) холостой ход (б) передача натуральной мощности

Переходный процесс быстро затухает при передаче натуральной мощности (рис. 2, б), тогда как в режиме холостого хода в системе происходят долго затухающие колебания, что означает сильное снижение уровня статической устойчивости. Граница статической устойчивости наступает при передаче $P_{\text{пред}} = 1.05$, что лишь немного больше натуральной мощности. На рис. 3 представлено изменение предельной передаваемой мощности при изменении напряжения и номинальной мощности синхронных компенсаторов.

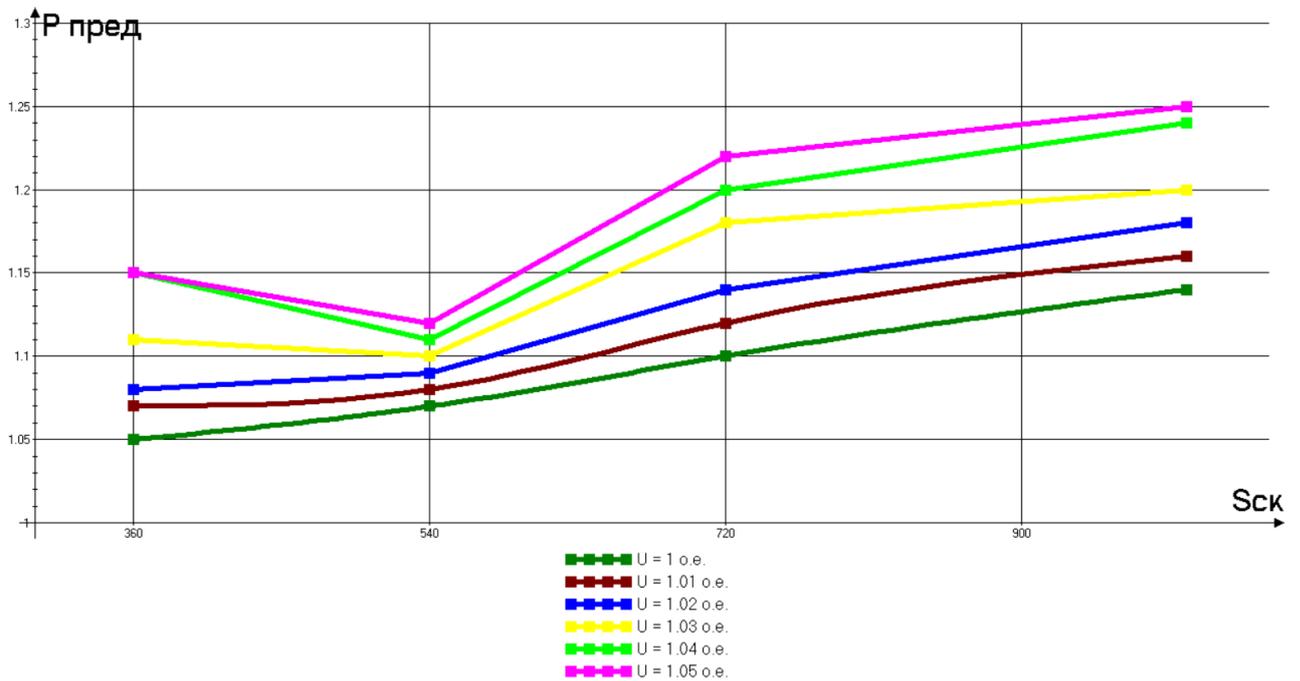


Рис. 3. Зависимость предельной передаваемой мощности от уровня напряжения в промежуточных узлах и мощности $S_{ск}$ установленного синхронного компенсатора

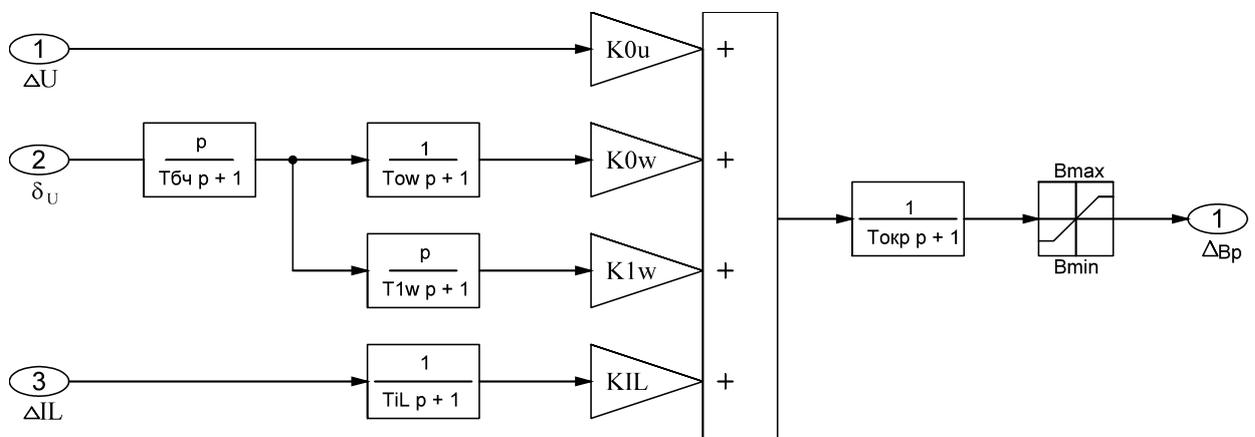


Рис 4. Структурная схема регулятора СТК с дополнительной обратной связью по току линии

Для увеличения запаса статической устойчивости в модель регулятора СТК был добавлен канал по току линии (рис. 4). Постоянная времени СТК $T_{окр}$, принимавшаяся равной 1 секунде при предыдущих исследованиях, также была добавлена как параметр при оптимизации режима. Таким образом, количество параметров оптимизации увеличилось до 48 (по 4 в синхронных машинах и по 5 в каждом СТК).

Следующим шагом была проведена оптимизация по двум режимам одновременно $P = 0.1$ о.е., в котором до этого была наименьшая устойчивость, и 1 о.е. Доминирующие характеристические корни системы в режимах работы от холостого хода до предельного приведены в таблице 2. При мощности СК в 360 МВА предельная мощность составляет 1.08 о.е., а для мощности СК в 720 МВА уже 1.12 о.е.

Таблица 2. Характеристические корни системы при оптимизации по двум режимам (0.1 и 1 о.е.) для разной мощности установленных синхронных компенсаторов

$S_{СК} = 360 \text{ МВА}, U = 1.05 \text{ о.е.}$						
$P = 0.0 \text{ о.е.}$	$P = 0.1 \text{ о.е.}$	$P = 0.4 \text{ о.е.}$	$P = 0.6 \text{ о.е.}$	$P = 0.8 \text{ о.е.}$	$P = 1.0 \text{ о.е.}$	$P_{пред} = 1.08 \text{ о.е.}$
$-4.14 \pm j20.84$	$-3.87 \pm j20.93$	$-3.29 \pm j 5.63$	$-4.51 \pm j20.71$	$-4.24 \pm j20.68$	$-4.27 \pm j20.9$	$-3.76 \pm j21.13$
-3.73	-3.53	-2.84	$-3.92 \pm j4.84$	$-3.71 \pm j0.21$	-3.75	$-3.55 \pm j0.06$
-1.00	$-3.15 \pm j1.85$	$-2.16 \pm j 0.94$	-3.47	-3.51	$-2.96 \pm j3.66$	-2.87
$-0.27 \pm j2.97$	$-2.45 \pm j 0.8$	-1.00	-1.00	$-2.17 \pm j1.5$	$-2.9 \pm j1.74$	$-2.56 \pm j2.14$
	-1.00	-0.62	-0.54	-1.00	-2.83	-1.00
	-0.58			-0.54	-1.00	-0.61
$S_{СК} = 720 \text{ МВА}, U = 1.05 \text{ о.е.}$						
$P = 0.0 \text{ о.е.}$	$P = 0.1 \text{ о.е.}$	$P = 0.4 \text{ о.е.}$	$P = 0.6 \text{ о.е.}$	$P = 0.8 \text{ о.е.}$	$P = 1.0 \text{ о.е.}$	$P_{пред} = 1.12 \text{ о.е.}$
$-3.62 \pm j19.55$	$-4.27 \pm j20.9$	$-4.38 \pm j19.56$	$-4.31 \pm j19.32$	$-3.93 \pm j19.27$	$-3.87 \pm j20.93$	$-3.08 \pm j20,02$
-3.55	-3.75	-3.8	-3.47	$-3.57 \pm j4.38$	-3.53	$-3.02 \pm j2.89$
-2.84	$-2.96 \pm j3.66$	$-3.01 \pm j5.79$	$-3.41 \pm j5.19$	-3.52	$-3.15 \pm j1.85$	-2.9
-1.62	$-2.9 \pm j1.74$	-2.83	-2.83	-2.82	$-2.45 \pm j0.81$	-1.65
-1.00	-2.83	$-2.13 \pm j0.91$	$-2.13 \pm j1.32$	$-2.12 \pm j1.34$	-1.00	-1.00
$-0.27 \pm j2.97$	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	-0.58	-0.61
	-0.92	-0.62	-0.54	-0.54		

Из полученных результатов можно увидеть, что при оптимизации по двум режимам уровень статической устойчивости гораздо выше, чем в предыдущем опыте, но он всё равно недостаточен, так как в тех режимах, на которые оптимизация не проводилась, запас статической устойчивости

слишком мал. Для того, чтобы повысить уровень статической устойчивости была проведена оптимизация сразу по трём режимам: $P = 0$ о.е., $P = 0.1$ о.е. и $P = 1$ о.е. Характеристические корни такой оптимизации представлены в таблице 3.

Таблица 3. Характеристические корни системы при оптимизации по трём режимам (0, 0.1 и 1 о.е.)

$S_{ск} = 720 \text{ МВА}, U = 1.05 \text{ о.е.}$						
$P = 0.0 \text{ о.е.}$	$P = 0.1 \text{ о.е.}$	$P = 0.4 \text{ о.е.}$	$P = 0.6 \text{ о.е.}$	$P = 0.8 \text{ о.е.}$	$P = 1.0 \text{ о.е.}$	$P_{пред} = 1.13 \text{ о.е.}$
$-4.18 \pm j18.97$	$-4.48 \pm j19.65$	$-4.87 \pm j19.97$	$-5.49 \pm j19.17$	$-6.11 \pm j18.99$	$-5.42 \pm j18.79$	$-6.01 \pm j17.97$
-3.71	-3.79	-4.78	-3.37	$-3.11 \pm j4.01$	-3.41	$-4.41 \pm j0.99$
-2.68	$-3.27 \pm j3.02$	$-3.28 \pm j1.47$	$-3.29 \pm j1.57$	-3.01	$-3.12 \pm j3.10$	$-3.69 \pm j3.78$
-1.77	$-3.19 \pm j2.01$	$-3.31 \pm j3.79$	$-2.86 \pm j3.96$	$-2.46 \pm j1.03$	$-2.94 \pm j1.58$	-2.78
-1.00	-2.92	-2.78	-2.77	-1.00	-2.59	$-1.73 \pm j1.64$
$-0.31 \pm j2.85$	-1.00	$-1.15 \pm j3.32$	$-1.11 \pm j3.59$	$-0.98 \pm j3.57$	-1.00	-1.00
	-0.58	-1.00	-1.00	-0.39	-0.39	$-0.89 \pm j4.02$
		-0.47	-0.37			-0.39

Сравнивая таблицы 2 и 3, можно увидеть, что предельная передаваемая мощность изменилась лишь незначительно (до 1.13 о.е.), как и запас статической устойчивости. Устойчивостью в режиме холостого хода можно пренебречь, так как такой режим является промежуточным, и для него нет необходимости иметь хорошие показатели статической устойчивости. Гораздо эффективнее было бы получить такие показатели при режиме, близком к предельному, поэтому была проведена оптимизация по трём режимам (малая нагрузка, натуральная мощность, предельный режим). Результаты такой оптимизации представлены в таблице 4, из которой видно, что запас статической устойчивости увеличился для всех режимов, кроме холостого хода, а предельная передаваемая мощность теперь равняется 1.18 о.е.

Таблица 4. Характеристические корни системы при оптимизации по трём режимам (0.1, 1 и 1.18 о.е.)

$S_{СК} = 720 \text{ МВА}, U = 1.05 \text{ о.е.}$						
$P = 0.0 \text{ о.е.}$	$P = 0.1 \text{ о.е.}$	$P = 0.6 \text{ о.е.}$	$P = 1.0 \text{ о.е.}$	$P = 1.05 \text{ о.е.}$	$P = 1.1 \text{ о.е.}$	$P_{\text{пред}} = 1.18 \text{ о.е.}$
$-3.73 \pm j19.64$	$-4.32 \pm j20.02$	$-5.5 \pm j20.28$	$-6.24 \pm j19.2$	$-6.21 \pm j19.01$	$-6.17 \pm j18.82$	$-6.04 \pm j18.57$
-3.58	-4.13	-3.48	$-4.52 \pm j0.91$	$-4.5 \pm j0.97$	$-4.42 \pm j0.97$	$-4.34 \pm j1.05$
-2.84	$-3.11 \pm j3.58$	$-3.3 \pm j1.37$	$-3.36 \pm j3.9$	$-3.49 \pm j3.92$	$-3.69 \pm j3.94$	$-3.99 \pm j4.02$
-1.5	-2.84	$-2.97 \pm j3.88$	-2.86	-2.86	-2.86	-2.86
$-1.18 \pm j3.44$	$-2.39 \pm j1.04$	-2.82	$-1.95 \pm j1.28$	$-1.87 \pm j1.33$	$-1.81 \pm j1.4$	$-1.7 \pm j1.47$
-1	$-1.15 \pm j3.53$	$-1.08 \pm j3.72$	-1	-1	-1	-1
$-0.29 \pm j3.02$	-1	-1	$-0.9 \pm j3.77$	$-0.88 \pm j3.76$	$-0.86 \pm j3.75$	$-0.83 \pm j3.73$
	-0.63	-0.38	-0.4	-0.4	-0.41	-0.42

Графики переходных процессов для предельного режима при малом набросе мощности с полученными настройками коэффициентов регулирования представлены на рис. 4. Устойчивость системы сохраняется, а колебания достаточно быстро затухают.

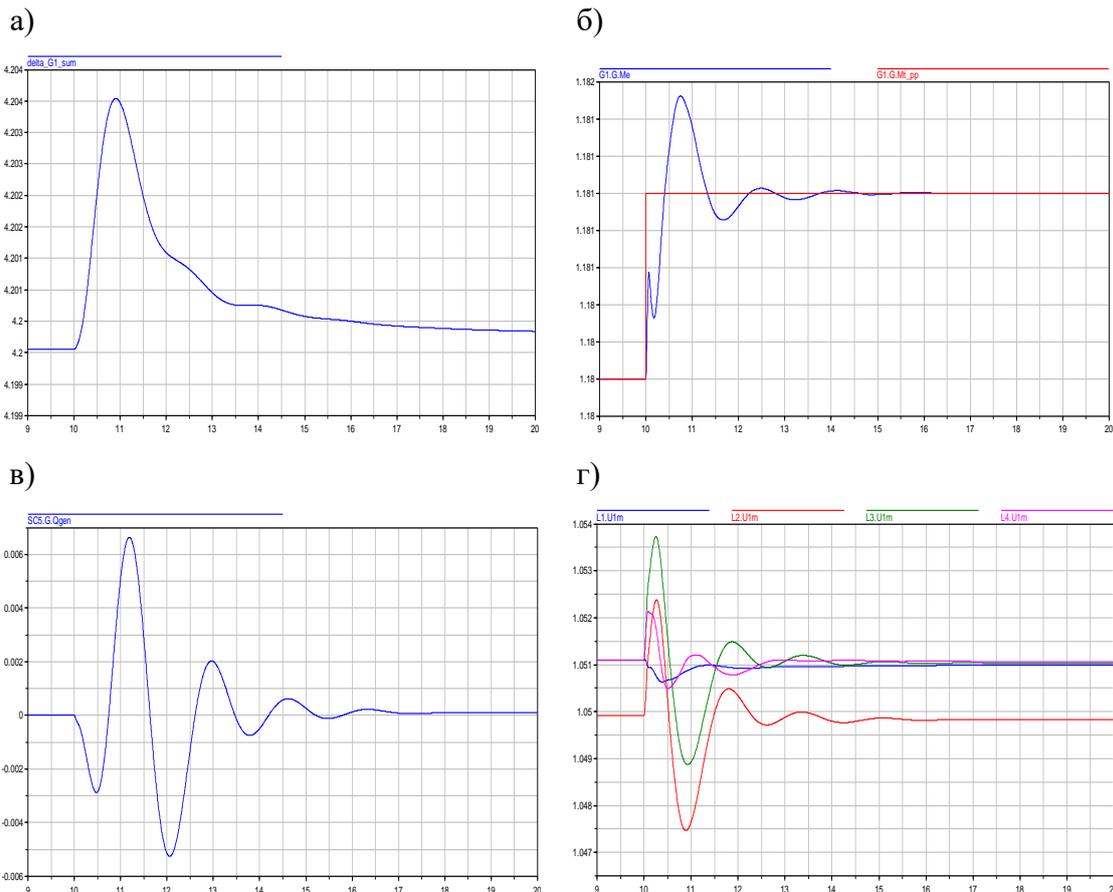


Рис. 4. Переходные процессы при набросе малой мощности: а) суммарный угол на передаче; б) баланс моментов генератора; в) реактивная мощность СК; г) напряжения на промежуточных ПС

В последние годы произошёл качественный скачок в микропроцессорном оборудовании и компьютерном моделировании, появились самообучающиеся нейронные сети. Наиболее заметной работой в области создания глобального регулятора для энергосистемы является линия Pacific DC Intertie в Соединённых Штатах Америки, которая связывает Дамбу Даллеса с Лос-Анжелесом [5]. Она представляет собой линию постоянного тока ± 500 кВ длиной 1360 км и передаваемой мощностью в 3100 МВт. Для регулирования её работы национальные лаборатории Сандия разработали датчики измерения векторов напряжения (PMUs), которые могут измерять значения модуля и угла напряжения по концам линии, синхронизировать их по времени и отправлять на глобальный регулятор, в котором рассчитывается разница частоты колебаний, после чего выдавать управляющий сигнал для изменения мощности, передаваемой по линии. Такой регулятор имеет малые задержки на измерение, передачу и преобразование сигналов по взаимным параметрам (рис. 5), а значит подходит для использования его в рассматриваемой линии.

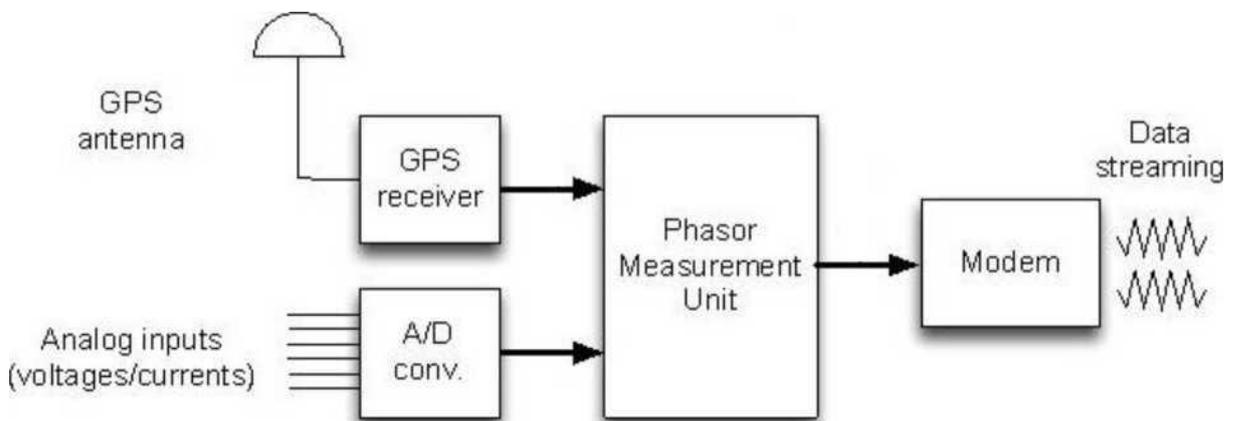


Рис. 5. Принципиальная схема глобального регулятора в Pacific DC Intertie

Структурные схемы регуляторов, применённые в СК и СТК представлены на рис. 6. У генератора оптимизируется 5 параметров:

По отклонению напряжения K_{0U} , по производной напряжения K_{1U} , по отклонению частоты K_{0w} , по производной частоты K_{1w} , по току в линии K_{IL} .

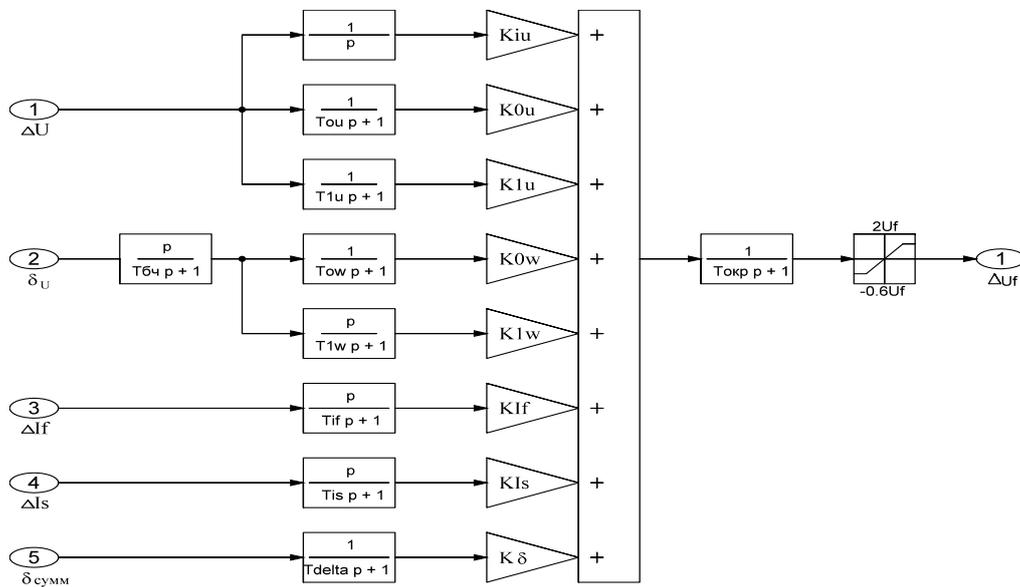
У СК оптимизируется 9 параметров:

По отклонению напряжения K_{0U} , по производной напряжения K_{1U} , по интегралу напряжения K_{iU} , по току статора K_{Is} , по току возбуждения K_{If} , по отклонению частоты K_{0w} , по производной частоты K_{1w} , по суммарному углу на передаче $\delta_{\text{сумм}}$, постоянная времени каналов по взаимному углу T_{delta} .

У каждого СТК оптимизируется 8 параметров:

По отклонению напряжения K_{0U} , по производной напряжения K_{1U} , по току в линии K_{IL} , по отклонению частоты K_{0w} , по производной частоты K_{1w} , по суммарному углу на передаче $\delta_{\text{сумм}}$, постоянная времени общего канала регулирования $T_{\text{окр}}$, постоянная времени канала по взаимному углу T_{delta} .

а)



б)

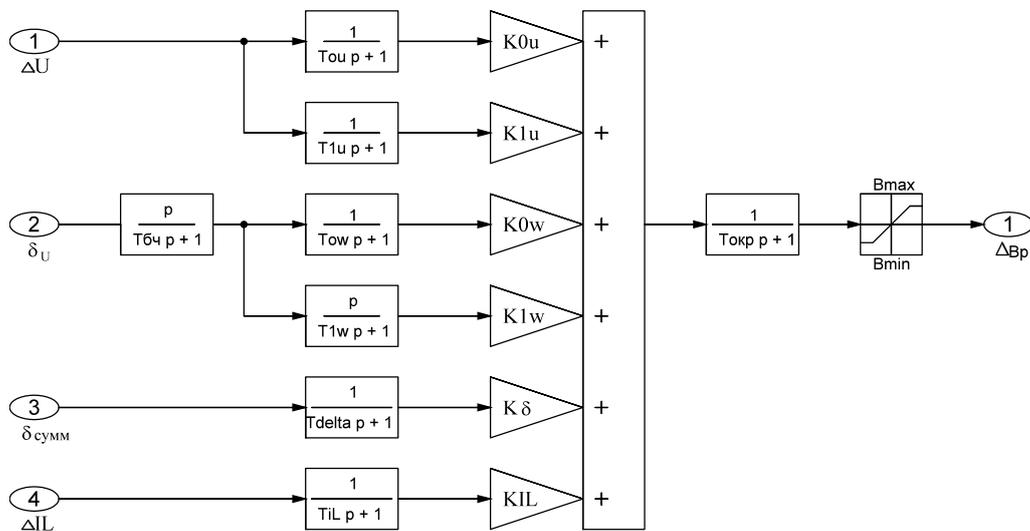


Рис. 6. Структурная схема регулятора СК (а) и СТК (б)

Таблица 5. Характеристические корни системы при оптимизации по трём режимам (0.1, 0.6 и 1.18 о.е.)

$S_{СК} = 720 \text{ МВА}, U = 1.05 \text{ о.е.}$						
$P = 0.0 \text{ о.е.}$	$P = 0.1 \text{ о.е.}$	$P = 0.4 \text{ о.е.}$	$P = 0.6 \text{ о.е.}$	$P = 1.0 \text{ о.е.}$	$P = 1.18 \text{ о.е.}$	$P_{\text{пред}} = 1.34 \text{ о.е.}$
$-3.19 \pm j19.96$	$-3.09 \pm j17.98$	$-3.01 \pm j18.02$	$-2.91 \pm j17.99$	$-2.71 \pm j17.99$	$-2.49 \pm j17.99$	$-2.39 \pm j18.02$
-2.31	$-1.71 \pm j0.07$	-1.72	$-1.81 \pm j4.81$	$-2.49 \pm j4.49$	-1.59	-1.59
-1.00	$-1.01 \pm j0.62$	$-1.39 \pm j4.83$	-1.59	-1.91	$-1.06 \pm j0.79$	-1.00
$-0.31 \pm j2.68$	-1.00	$-1.09 \pm j0.38$	$-1.08 \pm j0.67$	$-1.11 \pm j0.69$	-1.00	$-0.98 \pm j0.92$
	$-0.89 \pm j3.92$	-1.00	-1.00	-1.00	-0.30	-0.29
		-0.36	-0.31	-0.29		

Таблица 6. Коэффициенты каналов регулирования при оптимизации по трём режимам (0.1, 0.6 и 1.18 о.е.)

№ узла	Каналы регулирования генератора (K_G), СТК (K_{Ri}) и СК (K_{SC})						
	K_{0U}	K_{1U}	K_{0w}	K_{1w}	K_{iL}	K_{iU}, K_{iI}, K_{iS}	K_{delta}
1	$K_{G_{0U}} = -49.1$ $K_{R1_{0U}} = -24.9$	$K_{G_{1U}} = -6.0$ $K_{R1_{1U}} = -11.4$	$K_{G_{0w}} = -0.2$ $K_{R1_{0w}} = -0.3$	$K_{G_{1w}} = -0.3$ $K_{R1_{1w}} = -1.9$	$K_{R1_{iL}} = 0.3$	$K_{G_{if}} = -1.3$	$K_{R1_{\text{delta}}} = 0$
2	$K_{R2_{0U}} = -35.1$	$K_{R2_{1U}} = -8.1$	$K_{R2_{0w}} = 2.1$	$K_{R2_{1w}} = 1.0$	$K_{R2_{iL}} = 3.1$	-	$K_{R2_{\text{delta}}} = 0.2$
3	$K_{R3_{0U}} = -33.8$	$K_{R3_{1U}} = -8.2$	$K_{R3_{0w}} = 1.9$	$K_{R3_{1w}} = 1.7$	$K_{R3_{iL}} = 3.2$	-	$K_{R3_{\text{delta}}} = 1.7$
4	$K_{R4_{0U}} = -34.2$	$K_{R4_{1U}} = -7.2$	$K_{R4_{0w}} = 3.7$	$K_{R4_{1w}} = 1.1$	$K_{R4_{iL}} = 2.2$	-	$K_{R4_{\text{delta}}} = 1.9$
5	$K_{SC_{0U}} = -33.9$ $K_{R5_{0U}} = -33.8$	$K_{R5_{1U}} = -8.1$ $K_{SC_{1U}} = -5.9$	$K_{R5_{0w}} = 2.2$ $K_{SC_{0w}} = -0.6$	$K_{R5_{1w}} = 2.1$ $K_{SC_{1w}} = 0.9$	$K_{R5_{iL}} = 2.1$	$K_{SC_{if}} = 5.2$ $K_{SC_{is}} = -0.4$ $K_{SC_{ui}} = 0.1$	$K_{R5_{\text{delta}}} = 2.0$ $K_{SC_{\text{delta}}} = 3.0$
6	$K_{R6_{0U}} = -33.9$	$K_{R6_{1U}} = -7.8$	$K_{R6_{0w}} = 2.9$	$K_{R6_{1w}} = 1.1$	$K_{R6_{iL}} = 3.0$	-	$K_{R6_{\text{delta}}} = 1.9$
7	$K_{R7_{0U}} = -34.0$	$K_{R7_{1U}} = -7.9$	$K_{R7_{0w}} = 2.8$	$K_{R7_{1w}} = 0.8$	$K_{R7_{iL}} = 1.9$	-	$K_{R7_{\text{delta}}} = 2.7$
8	$K_{R8_{0U}} = -34.1$	$K_{R8_{1U}} = -8.1$	$K_{R8_{0w}} = 1.9$	$K_{R8_{1w}} = -0.9$	$K_{R8_{iL}} = 3.1$	-	$K_{R8_{\text{delta}}} = 2.1$

Было проведено два опыта. В первом – оптимизация для режима передачи натуральной мощности, а во втором – по трем режимам $P = 0.1, 0.6$ и 1.18 о.е. , результаты второго опыта приведены в таблице 5. Запас статической устойчивости сильно возрос, а предельная передаваемая мощность значительно увеличилась – до 1.34 о.е. Настройки каналов регулирования представлены в таблице 6, а переходные процессы при малом набросе мощности – на рис. 7. Стоит отметить, что полученное значение предельной передаваемой мощности, равное 1.34 о.е. , существенно превышает все предыдущие значения. Благодаря этому удастся обеспечить необходимое требование по запасу статической устойчивости в 20% при передаче по линии мощности от 1 до 1.1 о.е.

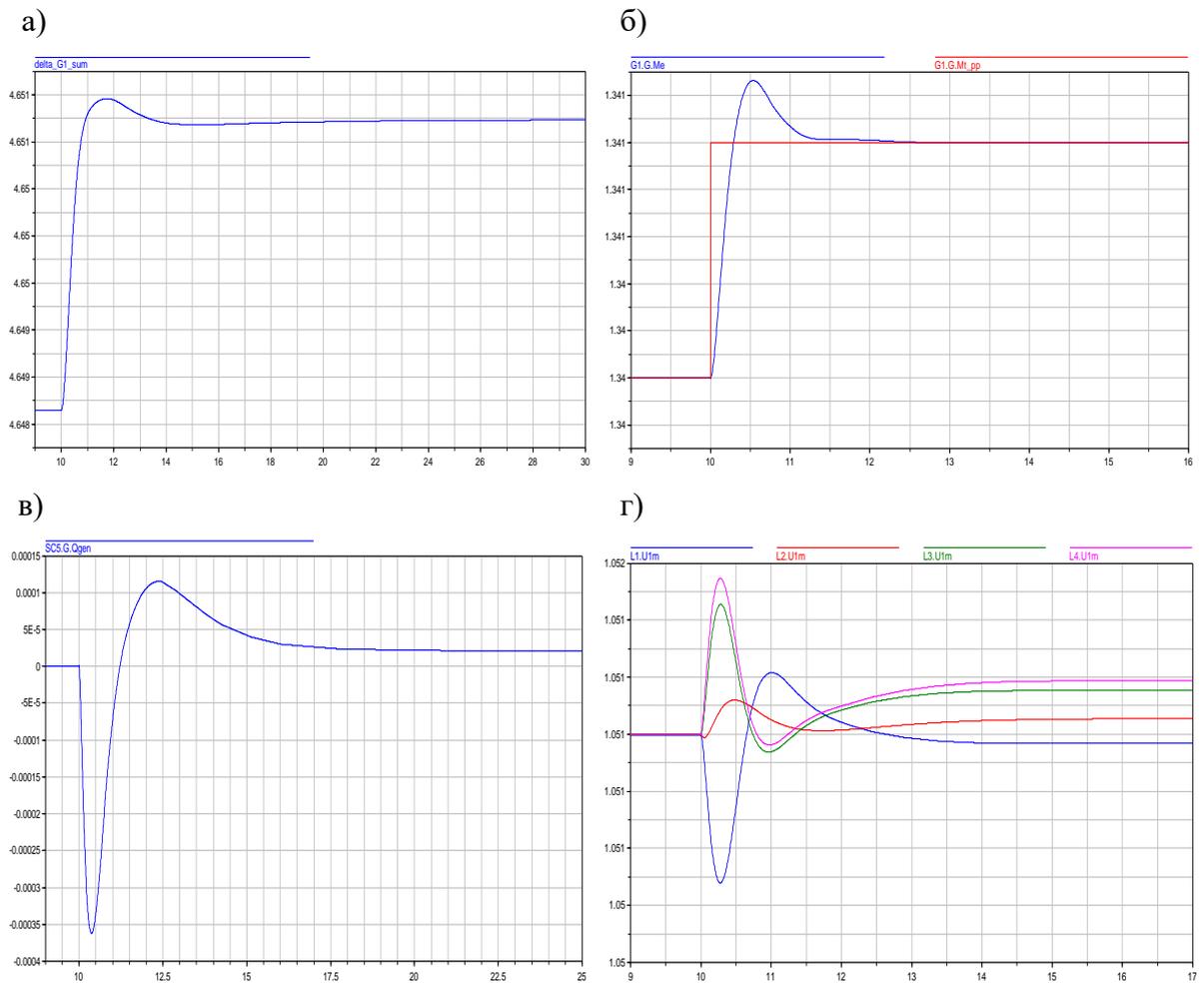


Рис. 7. Переходные процессы при набросе малой мощности: а) суммарный угол на передаче; б) баланс моментов генератора; в) реактивная мощность СК; г) напряжения на промежуточных ПС

В качестве результата можно отметить, что столь сильное повышение пределов передаваемой мощности обеспечивается одним синхронным компенсатором малой мощности, дополнительными каналами регулирования автоматических регуляторов и оптимизацией коэффициентов этих каналов. При этом в именованных единицах предельная передаваемая мощность равняется 10 ГВт при мощности установленного СК в 720 МВА (7.2% от мощности на передаче), а общая проводимость всех СТК на промежуточных

узлах, которая необходима для поддержания выбранного режима, составляет 1.1 о.е. (8 ГВАр).

К устройствам демпфирования колебаний, активно применяемым за рубежом, также относятся стабилизаторы энергосистемы, известные как Power System Stabilizer (PSS). Они делятся на однополосные и широкополосные. С помощью дополнительного стабилизирующего сигнала такие устройства управляют напряжением возбуждения генераторов.



Рис. 8. Однополосный стабилизатор энергосистемы

В простейшем случае, однополосный стабилизатор (рис. 8) представляет из себя три последовательных звена (усилительное звено, фильтр высших частот и блок фазовой компенсации), на вход первого из которых подается сигнал по отклонению частоты вращения ротора. Также, на вход может подаваться разность электромагнитной мощности с механической, которая, обычно, принимается постоянной. Из-за такого упрощения эффективность стабилизатора снижается, так как он оказывается малоприспособлен для демпфирования колебаний, происходящих при отличной от установленной механической мощности.

Наиболее совершенным является широкополосный стабилизатор (рис. 9), состоящий из трёх параллельных частотных групп – низкочастотной, среднечастотной и высокочастотной. В отличие от однополосных стабилизаторов, они помогают обеспечить гибкую настройку в широком диапазоне режимов, так как каждая частотная группа настраивается индивидуально.

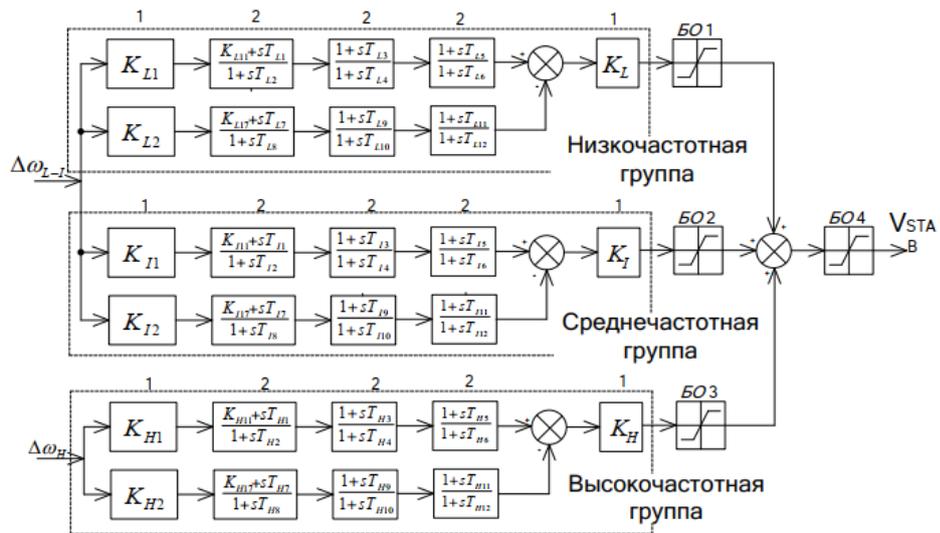


Рис. 9. Широкополосный стабилизатор энергосистемы

Для визуализации отличий в работе трёх типов стабилизаторов был проведён опыт незначительного изменения уставки напряжения на питающем генераторе. На рис. 10 представлена зависимость взаимного угла от времени, из которой видно, что широкополосный стабилизатор (PSS1) выходит на новый установившийся режим быстрее и с меньшей интенсивностью переходных процессов. Однополосный стабилизатор с входным каналом по разности мощностей (PSS3) показывает наихудший результат. Стоит отметить, что несмотря на эффективность широкополосного стабилизатора, его первичная настройка сопряжена с определенными трудностями, которые отсутствуют в однополосных стабилизаторах.

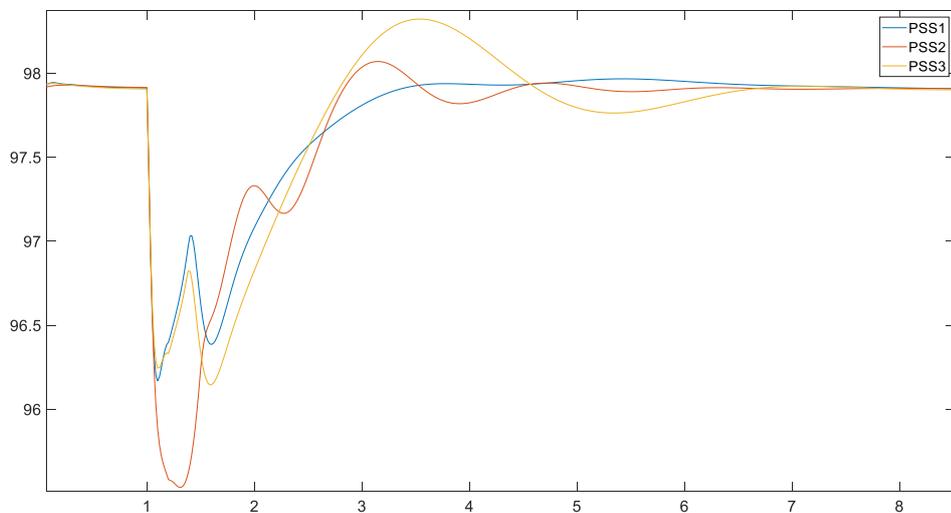
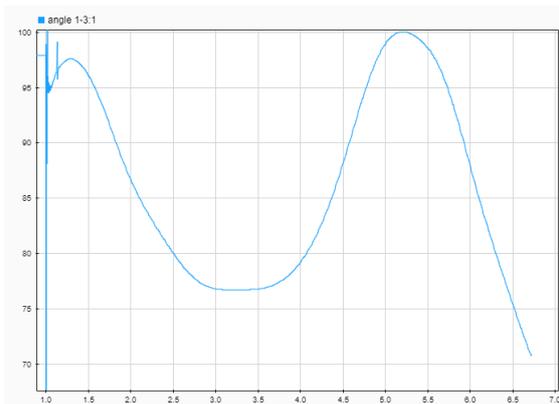


Рис. 10. Изменение угла на передаче для разных типов стабилизаторов

Для того, чтобы проверить работу стабилизаторов в условиях конечных возмущений, был проведен опыт трёхфазного короткого замыкания (рис. 11). Без применения стабилизатора система оказывалась неустойчива, так же, как и с однополосным стабилизатором с каналом по разности мощностей (PSS3). При двух других видах стабилизаторов устойчивость сохранялась.

а)



б)

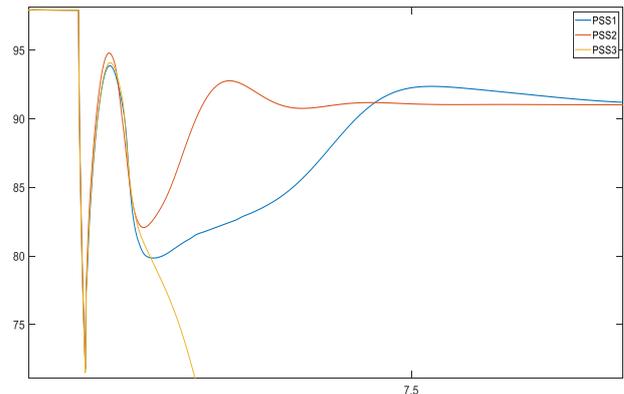


Рис. 11. Опыт трёхфазного короткого замыкания без использования стабилизатора (а) и с использованием (б)

Коэффициенты каналов в этих стабилизаторах можно настраивать, например, с помощью программного комплекса Matlab утилитой Control System Toolbox. Проведём такую настройку на примере широкополосного стабилизатора (рис. 9). Начальные коэффициенты для всех частотных каналов (одинаковые для генератора и синхронного компенсатора) приведены ниже:

$$K_{L1} = 66, K_{L2} = 66, K_L = 10;$$

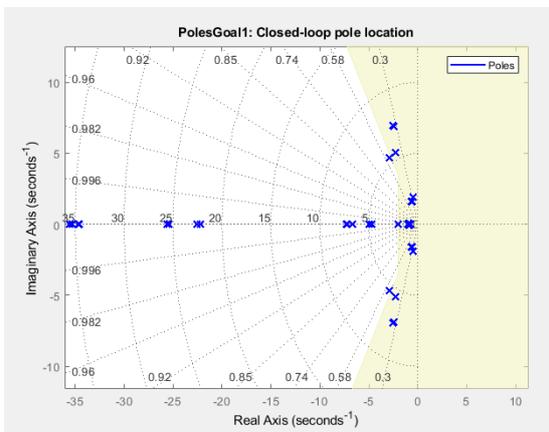
$$K_{I1} = 66, K_{I2} = 66, K_I = 48;$$

$$K_{H1} = 66, K_{H2} = 66, K_H = 235.$$

Регулируемыми блоками в этой утилите являются сами коэффициенты частотных каналов. Диапазон регулирования по частоте выбран от 0.1 до 10 Гц, что совпадает с частотами тех колебаний, которые должен фильтровать стабилизатор. Также можно настроить минимальное расстояние до мнимой оси для характеристических корней. Результат работы утилиты показан на рис. 12. Жёлтая зона отображает наложенные ограничения. Наименьший по

модулю корень до оптимизации, равный $-0.479 \pm j1.91$ сместился до значения $-0.941 \pm j1.37$.

а)



б)

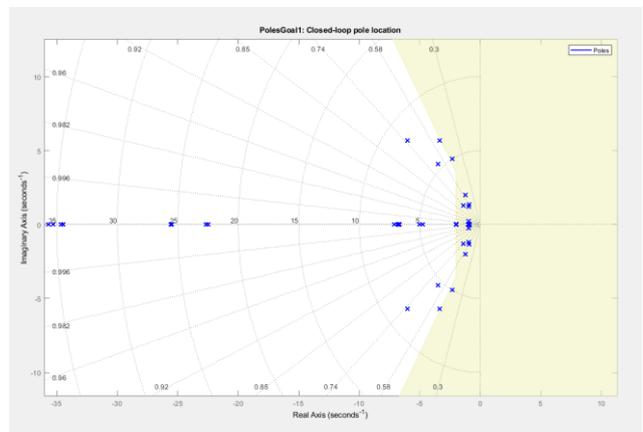


Рис. 12. Характеристические корни системы до оптимизации коэффициентов (а) и после (б)

Коэффициенты частотных каналов после оптимизации приведены ниже. На рис. 13 изображено изменение взаимного угла до и после оптимизации коэффициентов.

Генератор:

$$K_{L1} = 71, K_{L2} = 71, K_L = 23;$$

$$K_{I1} = 65, K_{I2} = 64, K_I = 28;$$

$$K_{H1} = 64, K_{H2} = 64, K_H = 229.$$

Синхронный компенсатор:

$$K_{L1} = 79, K_{L2} = 77, K_L = 37;$$

$$K_{I1} = 68, K_{I2} = 62, K_I = 15;$$

$$K_{H1} = 51, K_{H2} = 51, K_H = 210.$$

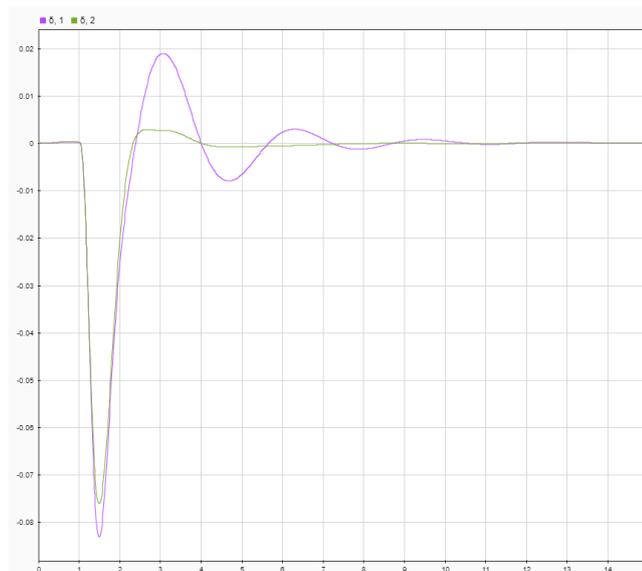


Рис. 13. Изменение взаимного угла до и после оптимизации коэффициентов стабилизаторов

Во второй главе рассмотрена динамическая устойчивость сверхдальних линий электропередачи на примере опыта двухфазного короткого замыкания. Отмечено, что вопросы динамической устойчивости таких линий в более ранних исследованиях почти не затрагивались, либо были исследованы на сильно упрощённых схемах. Так, в [6] динамическая устойчивость была рассмотрена на примере наброса мощности в 1 ГВт для линии, аналогичной рассмотренной на рис. 1. Номинальное напряжение равнялось 1150 кВ, натуральная мощность – 7360 МВт, линия была разбита на несколько участков по 600 километров каждый. В каждом узле установлен управляемый шунтирующий реактор.

Рассмотренный наброс мощности (1 ГВт) можно считать достаточно значительным возмущением, соответствующим проверке на динамическую устойчивость. Тем не менее, репрезентативнее было бы исследовать опыт короткого замыкания. Такие опыты до настоящего времени ещё не проводились, в первую очередь из-за проблем с работоспособностью численных методов. Также необходимо отметить, что представленная схема является слишком упрощённой, и ей необходима дальнейшая корректировка, иначе результаты нельзя считать соответствующими действительности.

Короткое замыкание сопровождается значительными бросками напряжения на всех промежуточных подстанциях, а также броском и электромагнитного момента генератора, который может достигать 5-8 о.е. Это вызвано большими ёмкостными проводимостями участков линии. Последовательное электрическое торможение может быть использовано, чтобы увеличить уровень динамической устойчивости, а для ограничения бросков напряжения могут быть применены устройства ограничения перенапряжений (ОПН).

Устройства ОПН устанавливаются на каждой промежуточной подстанции и являются варисторами, то есть нелинейными сопротивлениями, которые заземляют с одной стороны. Их вольт-амперная характеристика (рис. 14)

подчиняется выражению $U = A \cdot I^{0.08}$, в котором коэффициент А равняется

$$\frac{U_{ref}}{I_{ref}^{0.08}} = 1.041, (U_{ref} = 11, I_{ref} = 2).$$

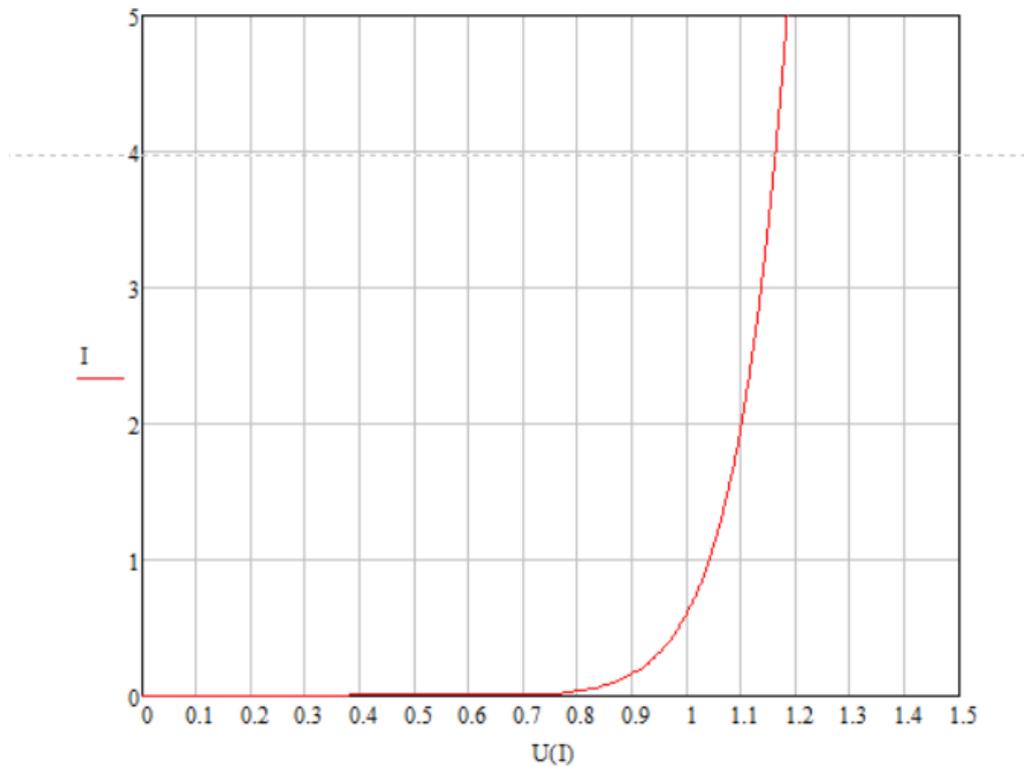


Рис 14. Вольт-амперная характеристика ОПН

Динамическая устойчивость теряется при существенных возмущениях в системе, если выбранные мероприятия по обеспечению этой устойчивости недостаточны. Это приводит к тяжёлым авариям, таким как каскадные отключения и асинхронный ход. Одной из эффективных мер по обеспечению динамической устойчивости является продольное электрическое торможение, которое позволяет добиться приемлемого качества переходных процессов при конечных возмущениях [7]. Как правило, короткие замыкания в системе длятся лишь десятые доли секунды, что накладывает требование сверхвысокого быстродействия на работу высоковольтных выключателей.

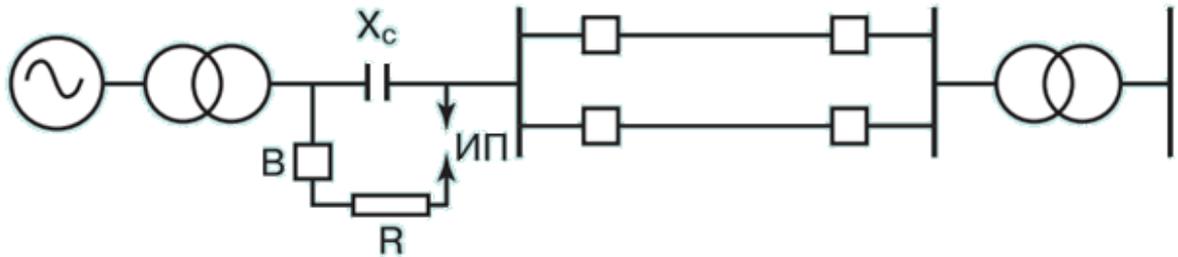


Рис 15. Применение продольного электрического торможения

Принцип работы продольного электрического торможения рассмотрен на примере схемы на рис. 15. Искровые промежутки (ИП) пробиваются при появлении перенапряжений, вызванных возникновением аварийного режима, вследствие чего батарея статических конденсаторов с сопротивлением X_c , включенная последовательно в цепь статора, оказывается шунтированной сопротивлением R . Эта схема позволяет обеспечить необходимое быстродействие в системе при больших возмущениях.

Модель устройства ОПН была написана на языке моделирования динамических систем Modelica. Для того, чтобы обеспечить работоспособность численных методов, в модель добавлено два инерциальных звена с малыми постоянными времени. Модуль напряжения вычисляется по составляющим по оси d и q , после чего по вольт-амперной характеристике определяется значение тока в ОПН. Полученное значение тока разбивается на составляющие по оси d и q , которые затем подаются на входа инерционных звеньев. Выходные сигналы поступают непосредственно в уравнения баланса токов соответствующих узлов электропередачи.

Результаты моделирования изображены на рис. 16-17. Опыт представляет собой двухфазное короткое замыкание длительностью 0.1 с на шинах генератора. Динамическая устойчивость не сохраняется, поэтому необходимо применить дополнительные мероприятия. В качестве такого мероприятия выбрано быстродействующее регулирование мощности турбины. В таком случае система сохраняет динамическую устойчивость, а перенапряжения эффективно ограничиваются с помощью устройств ОПН.

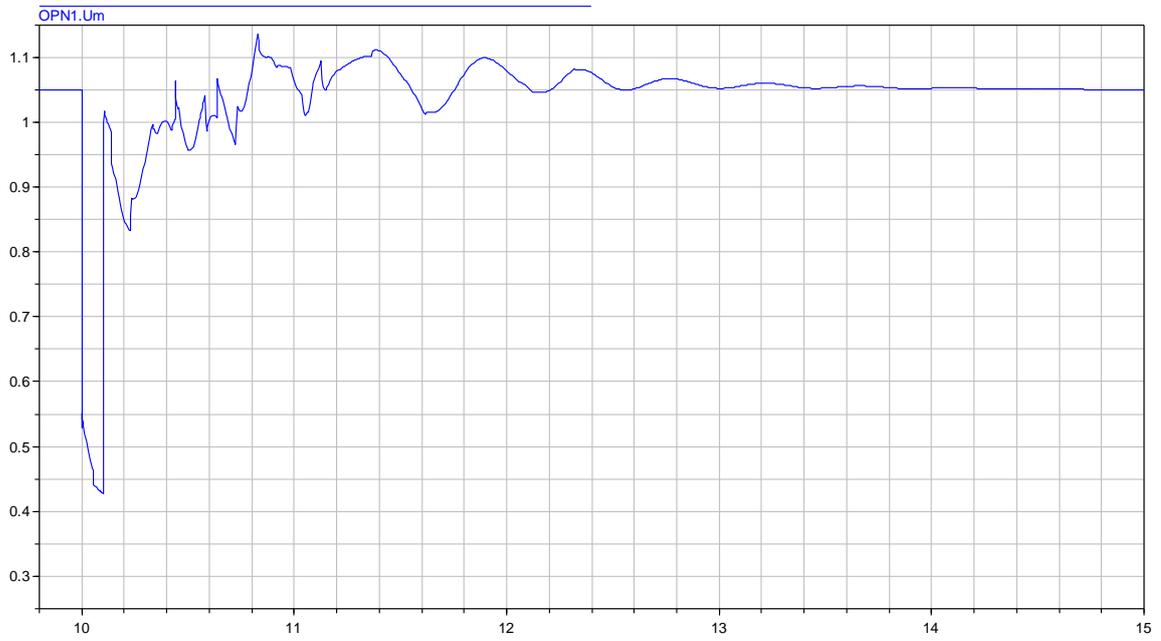


Рис. 16. Напряжение на шинах генератора при двухфазном коротком замыкании

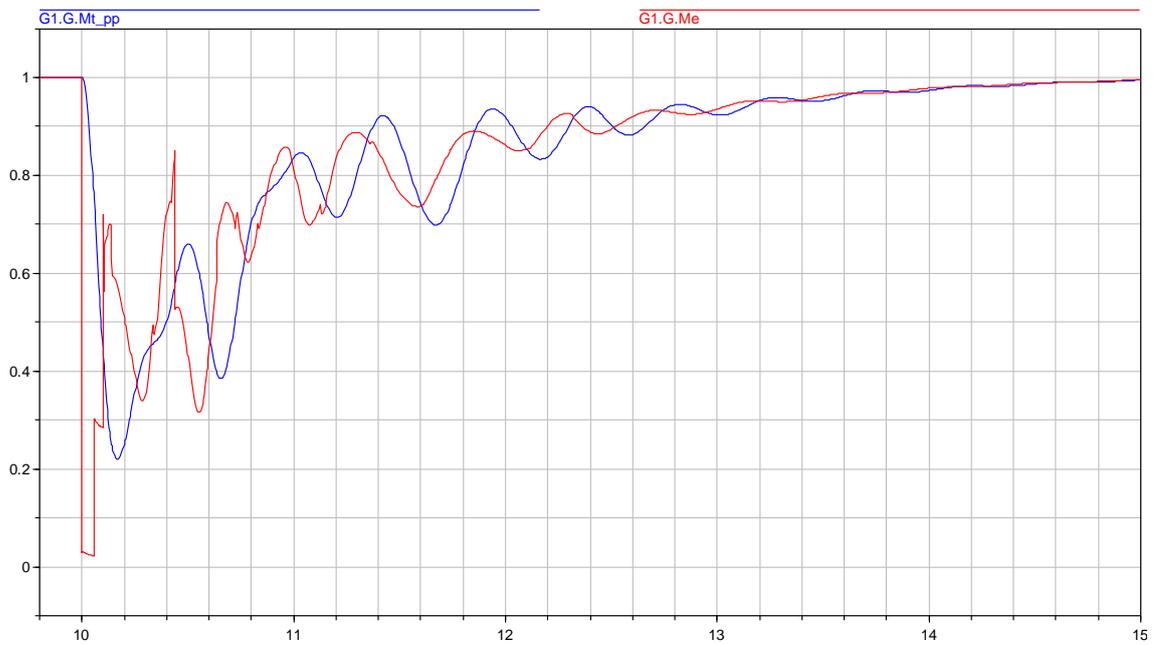


Рис. 17. Баланс моментов генератора при двухфазном коротком замыкании

В третьей главе рассмотрены перспективы применения нейронных сетей для централизованного определения коэффициентов регуляторов. Приведены основные типы моделей обучения. Отмечено, что развитие микропроцессорного оборудования позволяет применять новый тип автоматических регуляторов возбуждения – адаптивные АРВ. Такие регуляторы позволят убрать недостаток классических регуляторов, в которых коэффициенты каналов регулирования задавались для определённого режима, и появление в системе другого режима вызывало существенное снижение запаса статической и динамической устойчивости. В адаптивных АРВ происходит централизованный расчёт и изменение коэффициентов каналов регулирования для каждого режима.

Типичными моделями обучения являются глубокие сети прямого распространения, они позволяют аппроксимировать произвольную нелинейную функцию (рис. 18, *a*). Искусственная нейронная сеть может быть представлена в виде совокупности узлов, соединенных друг с другом набором связей, которые могут усиливаться или ослабляться, умножаясь на соответствующие веса [8].

Эти сети получили своё название из-за того, что они являются композицией некоторого количества функций, каждая из которых называется слоем нейронной сети. Количество таких функций (количество слоёв) напрямую показывает глубину модели. «Прямое распространение» в названии отражает тот факт, что сеть получает некоторые вводные данные x , пропускает их через все свои внутренние функции (слои) и выдаёт на выходе результат y .

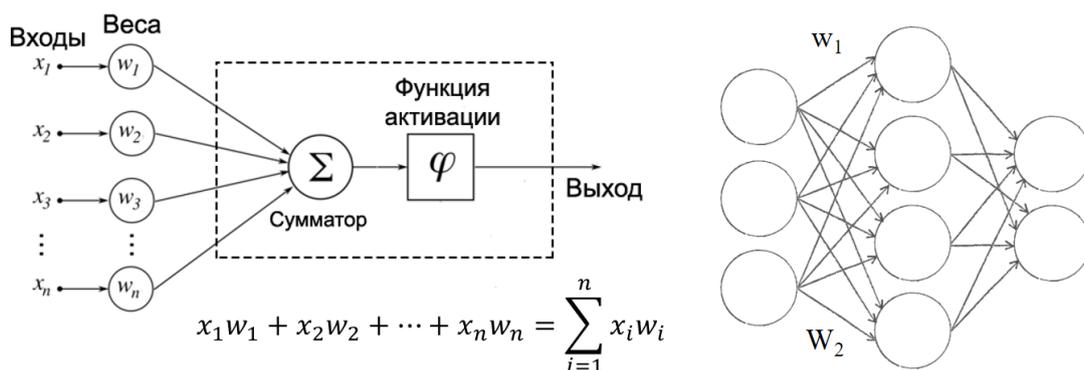
Аппроксимация произвольной функции является основной задачей работы нейронной сети. Для её получения на вход подаются вводные (обучающие) данные, которые представляет из себя набор значений аппроксимируемой функции в разных точках. Они указывают, какой выходной сигнал y должен быть при значении аргумента x . Нейронная сеть

должна сама определить, каким образом будет работать каждый её слой для достижения наилучшей аппроксимации.

Каждый слой представляет из себя один или несколько входных сигналов, каждый со своим весом w , приходящих на сумматор, в котором формируется взвешенная сумма. Для её обработки и формирования выходного сигнала используется функция активации. Примерами таких функций являются линейный выпрямитель, сигмоидная (логистическая) функция и гиперболические функции (рис. 18, б).

Функции активации могут напрямую задаваться человеком при создании первичной конфигурации модели. В таком случае успешной аппроксимацией будет являться перечень со значениями весов w для каждого слоя, которые нейронная сеть должна определить сама.

а)



б)

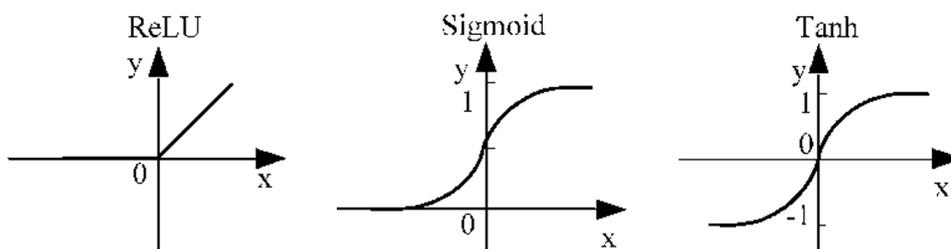


Рис. 18. Общая схема узла нейронной сети (а) и основные виды функций активации (б)

Новым направлением в машинном обучении является обучение с подкреплением. В таком обучении происходит динамическая настройка параметров стратегии выбора действий, выполняемых агентом [9]. В отличие от обычного обучения, в котором нейронная сеть обучается на заранее

подготовленных примерах и знает правильный ответ, обучение с подкреплением представляет собой взаимодействие сети с окружающей средой, в которой ей приходится самостоятельно формировать как правильные выходные, так и входные данные. Важным понятием в таких сетях является награда, которая присваивается агенту за любое действие, в котором он переходит из одного состояния в другое (рис. 19, а). Задачей агента является максимизировать награду за некоторый длительный промежуток времени.

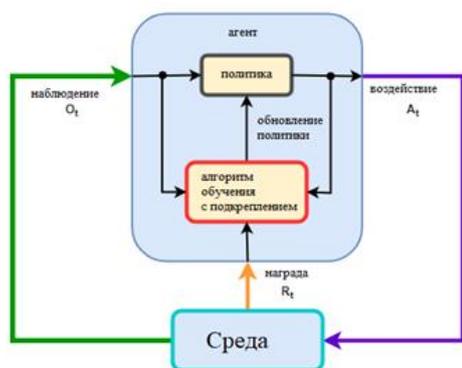
Обучение можно представить в виде Марковского процесса принятия решений, в котором агент имеет перечень доступных для совершения действий A , набор всех возможных состояний S и функцию перехода T , которая определяет вероятность перехода агента в состояние s_2 после состояния s_1 после действия a . Награду за выполненное действие агент получает после достижения состояния s_2 .

В простейшем случае награда R представляет из себя взвешенную сумму (1), в которой коэффициент γ отвечает за убывание значимости более далёкой награды.

$$R = r_{t+1} + \gamma r_{t+2} + \gamma^2 r_{t+3} + \dots = \sum_{i=0}^{\infty} \gamma^i r_{t+i+1}, \quad (1)$$

Одним из самых распространенных методов на основе обучения с подкреплением, является метод «исполнитель-критик». Его суть заключается в независимости отвечающего за выработку управляющего воздействия блока (сети-исполнителя) от блока, служащего для оценки успешности действий этой сети (сеть-критик). Структурная схема этого метода представлена на рис. 19, б. В процессе работы эти две сети выполняют следующие действия: сеть-исполнитель $\mu(S)$ получает входным сигналом наблюдение S , а на выходе выдает соответствующее действие A , которому соответствует максимальное долгосрочное вознаграждение. Сеть-критик $Q(S, A)$ на свой вход получает как наблюдение S , так и действие A , а на выходе выводит соответствующее ожидание долгосрочного вознаграждения.

а)



б)

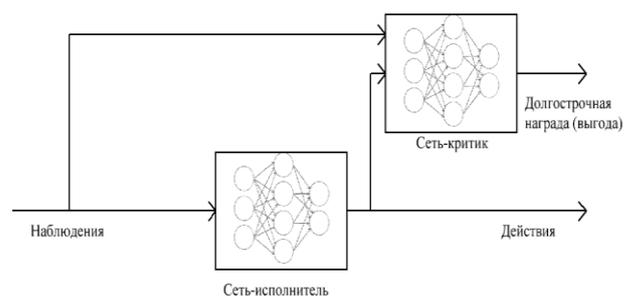


Рис. 19. Адаптивная система управления на основе обучения с подкреплением (а) и взаимодействие сетей исполнителя и критика (б)

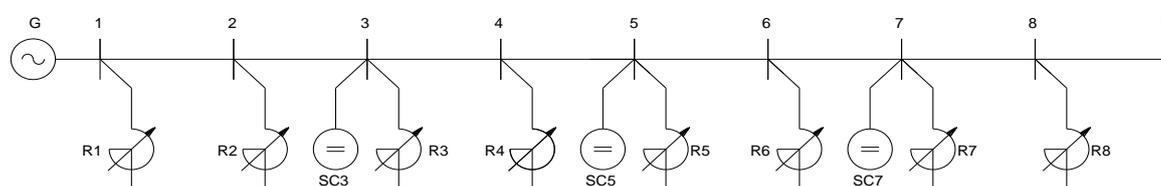


Рис. 20. Тестовая модель энергосистемы

Исследовалась модель энергосистемы, представленная на рис. 20. Изначальные параметры регуляторов были получены после расчёта в система Matlab. На рис. 22 (а), изображена схема глобального адаптивного регулятора, на основе нейронных сетей и обучения с подкреплением. Задачей является замена традиционных АРВ в исследуемой системе на адаптивные регуляторы, выдающие сигналы управления на генератор, синхронный компенсатор и СТК. При моделировании формируются две подсистемы. Первая, подсистема наблюдения, отвечает за все сигналы, необходимые для правильной работы регуляторов. Наблюдаемыми величинами выбраны напряжение в узлах сети и скольжение синхронных машин. Вторая, подсистема награды, формируется сложным образом и отвечает за выдачу награды. Положительная награда выдаётся, если удалось удержать наблюдаемые параметры в районе уставок (1 о.е. для напряжения и 0 для скольжения), то есть за сохранение устойчивости.

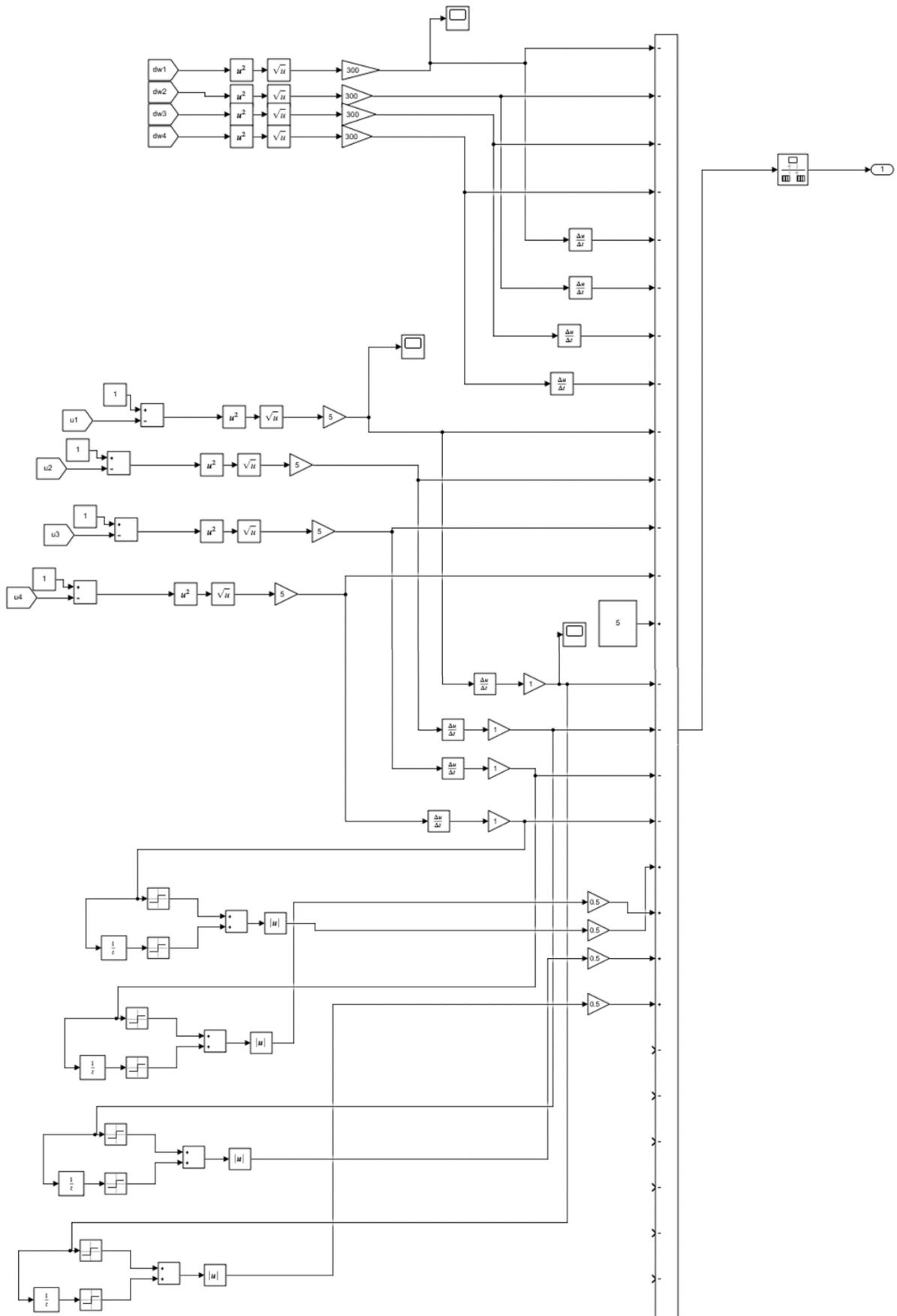
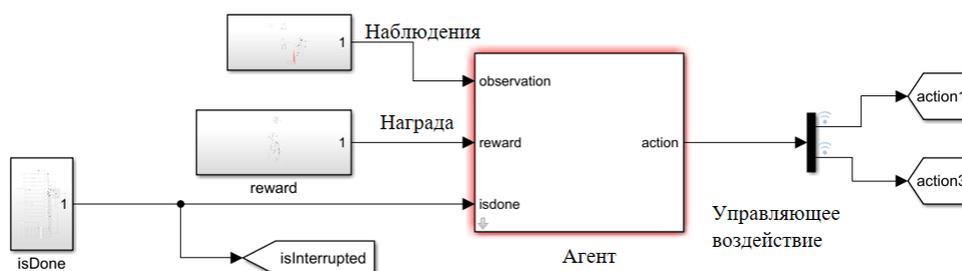


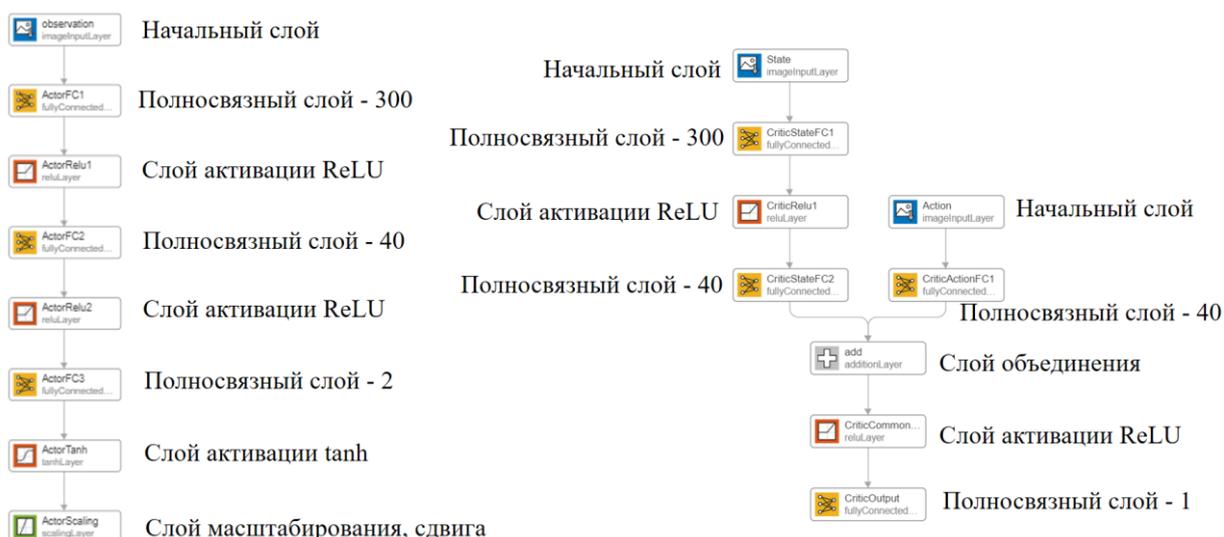
Рис. 21. Формирование функции награды

Если наблюдаемые параметры отклонились от уставок, то выдаётся отрицательная награда. Для того, чтобы избежать появления незатухающих колебаний, в формуле награды используется логическое слагаемое sign . Все веса слагаемых, входящих в эту формулу, определяются размерностью соответствующих величин. Потеря устойчивости, которая может произойти во время обучения, контролируется сигналом isDone , который прерывает обучение при возникновении больших отклонений угла на передаче. В формуле награды это учтено постоянным слагаемым, из-за которого агент всегда получает награду, если устойчивость сохранилась. Это стимулирует его продолжать расчёт. На рис. 21 изображена блок-схема формирования функции награды.

а)



б)



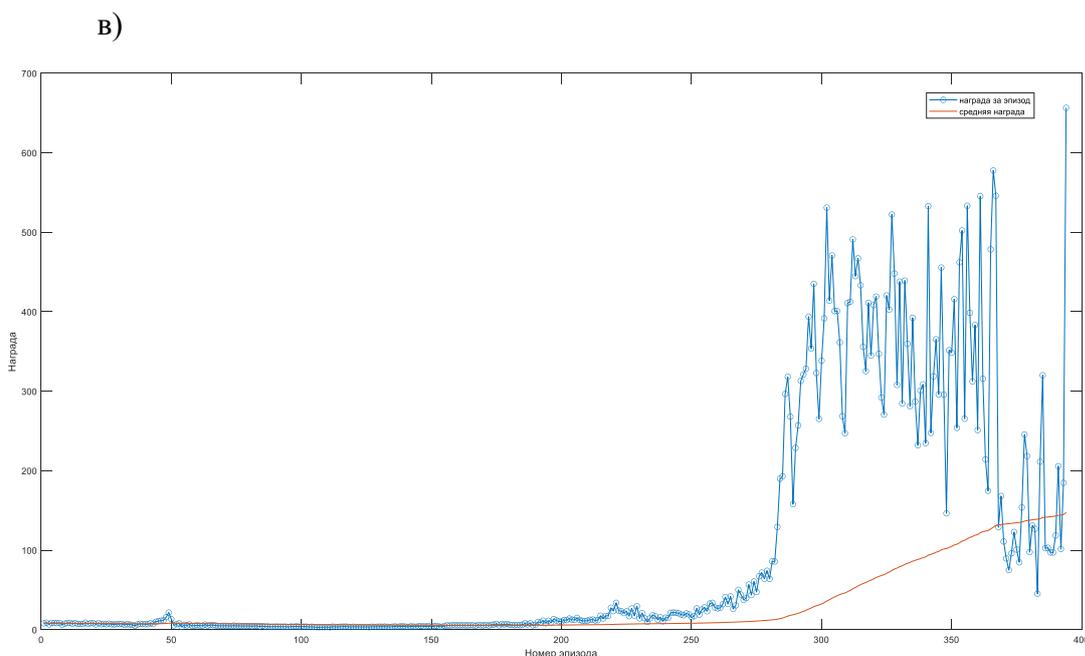


Рис. 22. Реализация метода обучения с подкреплением (а), структура сетей исполнителя и критика (б), распределение награды за эпизод (в)

Блок агента состоит из двух нейронных сетей – исполнителя и критика (рис. 22, б). Обучаемыми являются только полносвязные слои, которые могут иметь до 300 нейронов. Полносвязные слои сети-исполнителя ActorFC содержат по 300, 40 и 2 нейрона соответственно, а в качестве их функций активации используется линейный выпрямитель (для первых двух слоёв) и гиперболический тангенс ActorTanh (для третьего слоя). Слой сдвига в сети-исполнителе служит для смещения области значений функции ActorTanh в соответствии с требованиями к управляющему воздействию. Последний слой сети-критика состоит из одного нейрона, который выдаёт только одно значение – меру качества работы сети-исполнителя. Так как область значений этой функции находится в диапазоне $(-1; 1)$, то присутствует слой ActorScaling, масштабирующий область значений и сдвигающий ее в диапазон $(0; 6)$. Именно в таком числовом диапазоне действует регулятор. Слои критика CriticStateFC также содержат 300 и 40 нейронов с линейным выпрямителем в качестве функции активации.

На рис. 22 (в) изображено распределение награды, которую получает агент во время каждого эпизода обучения регулятора. Нижняя кривая

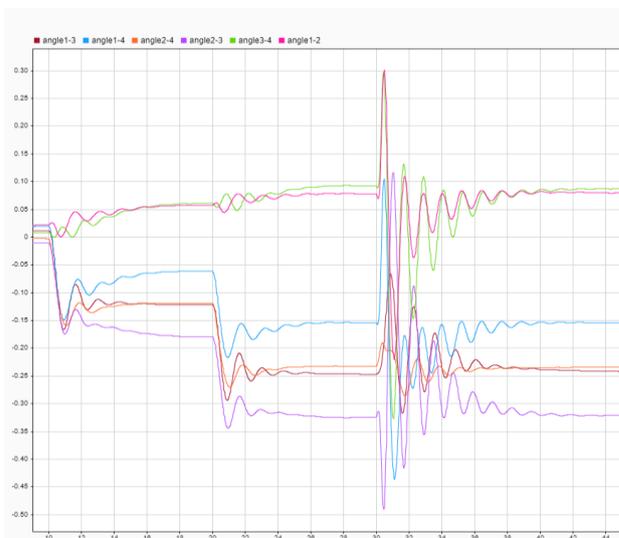
отражает среднюю награду за предыдущие эпизоды обучения (динамика обучения регулятора). Каждый эпизод обучения представляет собой работу электроэнергетической системы с теми настройками в адаптивном регуляторе, которые были выбраны во время предыдущего эпизода обучения. Тот факт, что график средней награды увеличивается, говорит об успешном обучении алгоритма. Однако скорость обучения является недостаточной, что может быть связано с неоптимальной функцией награды или недостаточной глубиной выбранной нейронной сети. С двухсотого эпизода награда начинает значительно увеличиваться, вследствие чего регулятор сохраняет устойчивость дольше. После трёхсотого эпизода агент сохраняет устойчивость уже весь эпизод обучения, несмотря на то, что отклонения режимных параметров достаточно велики. Максимальная награда достигается около четырёхсотого эпизода, после чего процесс обучения прекращается. Относительным минусом данного процесса обучения является его скорость. На персональном компьютере для такой относительно простой системы обучение занимает несколько десятков часов, и оно значительно замедляется при увеличении слоёв, нейронов, входных и выходных переменных, а также изменении формы функции награды. Для того, чтобы обучить регуляторы в масштабах всей энергосистемы, понадобятся мощности суперкомпьютеров. Необходимо отметить, что трудоёмок только сам процесс обучения, тогда как уже обученная система потребляет относительно малую мощность и может быть реализована на контроллерах.

На рис. 23 представлено сравнение результатов работы двух регуляторов – классического (а, б) и адаптивного (в, г). Переходные процессы вызываются снижением передаваемой по линии мощности (два снижения в момент времени $t_1 = 10$ с и $t_2 = 20$ с) и трёхфазным коротким замыканием в момент $t_3 = 30$ с. В обучении участвовал только первый процесс.

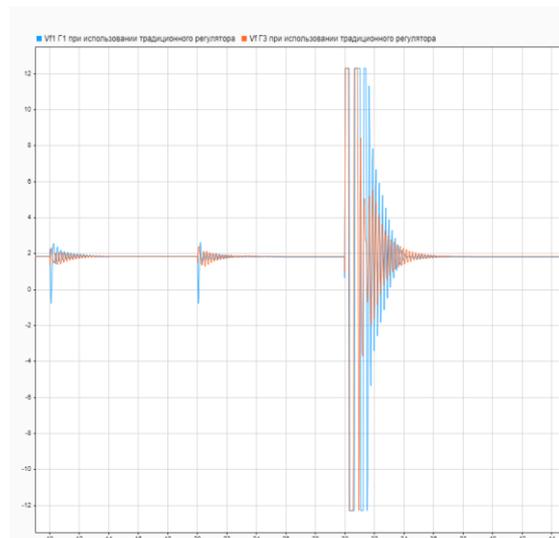
Полученные в ходе оптимизации на один установившийся режим настройки автоматического регулятора приводят к большим колебаниям напряжения возбуждения синхронных машин, что особенно заметно для

трёхфазного короткого замыкания (рис. 23, б). Напряжение возбуждения изменяется от верхних до нижних предельных значений в течение длительного времени. В то же время для адаптивного регулятора (рис. 23, г) сигналы управления, выданные нейронной сетью, оказываются значительно меньше и быстрее затухают. Следствием этого является и более быстрое затухание колебаний взаимных углов (рис. 23, в) по сравнению с классическим регулятором (рис. 23, а).

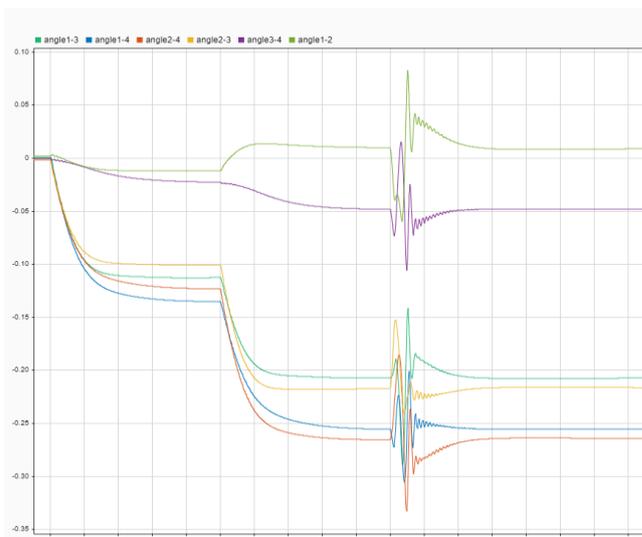
а)



б)



в)



г)

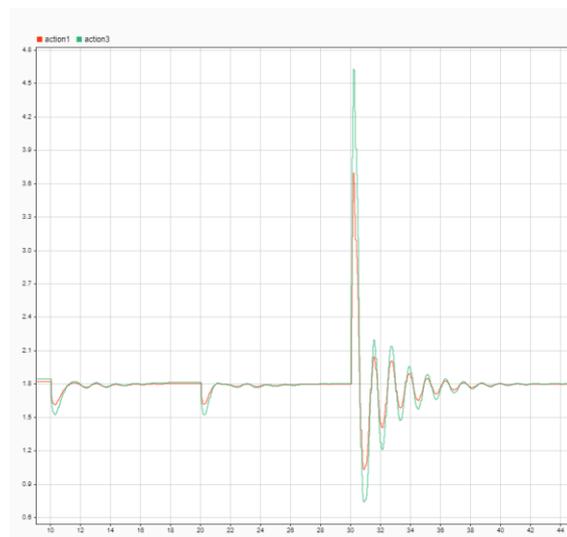


Рис. 23. Переходные процессы при конечных возмущениях с использованием классического (а, б) и адаптивного (в, г) регуляторов

Важным результатом является то, что адаптивный регулятор на основе нейронной сети достаточно корректно реагирует на изменения в энергосистеме, на которые он не проходил обучение, что особенно заметно для трёхфазного короткого замыкания, во время которого система сохраняет динамическую устойчивость. Из этого можно сделать вывод, что адаптивный регулятор корректно идентифицирует объект управления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Достигнут предел передаваемой по линии мощности в 1.22 о.е. при использовании синхронного компенсатора мощностью 720 МВА (7.2% от мощности передачи) и напряжении на промежуточных узлах в 1.05 о.е.;
2. Разработана и проверена модель автоматического регулятора возбуждения с дополнительными обратными связями. В регуляторы синхронных машин были добавлены каналы по интегралу напряжения, току статора и току возбуждения. В регуляторы статических тиристорных компенсаторов добавлены каналы по току линии и производной напряжения. Во все регуляторы добавлен канал регулирования по полному углу на передаче, что позволило увеличить предел передаваемой мощности вплоть до 10 ГВт в именованных единицах;
3. Проведён опыт двухфазного короткого замыкания в режиме передачи натуральной мощности, что позволило оценить уровень динамической устойчивости. Показано, что без дополнительных мероприятий система теряет устойчивость. Предложено применение продольного электрического торможения совместно с быстродействующим регулированием мощности турбины. Для ограничения перенапряжений, возникающих при переходных процессах, разработана модель ОПН. Применение всех перечисленных мероприятий позволяет системе сохранять свою динамическую устойчивость;
4. Выполнены синтез и оценка эффективности централизованного регулятора возбуждения на основе искусственных нейронных сетей и метода обучения с подкреплением;
5. Показаны основные принципы формирования функции награды для регулятора. Отмечено, что регулятор успешно демпфирует не только те колебания, на которых он проходил обучение, но и те, с которыми он не сталкивался;
6. Показано, что существует принципиальная возможность преодолеть традиционные сложности в настройке автоматических регуляторов

возбуждения путём использования адаптивных каналов регулирования. При этом адаптивный регулятор корректно идентифицирует объект управления, к тому же в нём остаётся потенциал для дальнейшей оптимизации путём дополнительного обучения как в новых режимах, так и при иной конфигурации нейронной сети. При этом отмечено, что сложность расчёта в рамках глобальной энергосистемы велика, и для обучения регуляторов потребуются мощности суперкомпьютеров. С другой стороны, уже обученная система может быть реализована на обычных контроллерах.

ПУБЛИКАЦИИ, СОДЕРЖАЩИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Статьи в изданиях из перечня ВАК:

1. Беляев А.Н., Переслыцких О.О. Повышение устойчивости сверхдальних линий электропередачи переменного тока на основе распределенного управления устройствами FACTS // Электричество. 2021. № 1. с. 4-12;
2. Полушкин В.П., Переслыцких О.О., Беляев А.Н. Синтез централизованного адаптивного регулятора возбуждения на основе нейронных сетей методом обучения с подкреплением // Известия НТЦ Единой энергетической системы № 83(2), 2020, С. 39-50;
3. Переслыцких О.О., Беляев А.Н. Устойчивость сверхдальних линий электропередачи с управляемой поперечной компенсацией // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25. № 1. С. 60—70.

Статьи в изданиях, индексируемых в международных реферативных базах цитирования Scopus и Web of Science:

4. O. O. Pereslytskikh, V. S. Suvorova and A. N. Belyaev, "Synthesis of Centralized Adaptive Excitation Control System by Reinforcement Learning Approach," 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), 2021, pp. 1514-1519, doi: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396109;
5. A.N. Belyaev, O.O. Pereslytskikh and A.S. Rodionova, "Distributed Control of Compensation Devices for Enhancing Stability of Long-distance AC Transmission System," 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), St. Petersburg and Moscow, Russia, 2020, pp. 1157-1161. doi: 10.1109/ElConRus49466.2020.9039109;
6. A. V. Golovina, O. O. Pereslytskikh, A. S. Rodionova and A. N. Belyaev, "Analysis of Operation and Stability of Ultra-long Transmission Lines with Controlled Shunt Compensation," 2019 IEEE Conference of Russian Young

Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), Saint Petersburg and Moscow, Russia, 2019, pp. 963-968.

Статьи в других изданиях:

7. Пересльцких О.О., Рыбаченко И.В., Беяев А.Н. Оптимизация алгоритмов управления устройств поперечной компенсации сверхдальних линий электропередачи переменного тока // Материалы X Международной молодежной научно-технической конференции "Электроэнергетика глазами молодежи", том 1, 16–20 сентября 2019 г., Иркутск, С.102-105;
8. Пересльцких О.О., Рыбаченко И.В., Беяев А.Н. Повышение устойчивости сверхдальних линий электропередачи переменного тока с управляемой поперечной компенсацией // Материалы IX Международной молодежной научно-технической конференции "Электроэнергетика глазами молодежи", том 1, 1–5 октября 2018 г., Казань, С.318-322.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рагозин А.А. Обобщенный анализ динамических свойств энергообъединений на основе структурного подхода. //Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. С.-Пб.: СПбГТУ, 1998. 200 с.
2. Кашин И.В., Смолвик С.В. Устойчивость работы протяженных электропередач переменного тока с регулируемыми устройствами поперечной компенсации // Электричество. 2001. № 2, С.10-15.
3. Переслыцких О.О., Беляев А.Н. Устойчивость сверхдальних линий электропередачи с управляемой поперечной компенсацией // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25. № 1. С. 60—70.
4. Александров Г.Н. Передача электрической энергии. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. 411 с.
5. David A. Copp, Ph.D. Distributed Control for Improving Power System Stability// IEEE SMARTGRID April 12, 2018
6. О.О. Переслыцких, И.В. Рыбаченко, А.Н. Беляев. Повышение устойчивости сверхдальних линий электропередачи переменного тока с управляемой поперечной компенсацией.
7. Зеленохат Н.И. Повышение динамической устойчивости энергосистемы с помощью электрического торможения генератора // Электрические сети России, Москва 2004 г.
8. Гудфеллоу Я., Бенджио И., Курвилль А. Глубокое обучение. Москва. Издательство ДМК, 2018
9. Р.С. Саттон, Э.Г. Барто. Обучение с подкреплением. // Москва. БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. 322 с.