

УДК 621.316.722.9

Сугаков Валерий Геннадьевич¹, доцент кафедры электротехники и электрооборудования объектов водного транспорта,

e-mail: toshev@rivregnn.ru

Тошев Александр Александрович¹, соискатель,

e-mail: toshev@rivregnn.ru

Зобов Лаврентий Владиславович¹, аспирант,

e-mail: zob-lavrik@yandex.ru

¹Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия.

СИСТЕМА ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С ВНЕШНЕЙ ДВУНАПРАВЛЕННОЙ ФОРСИРОВКОЙ

Аннотация. В статье рассмотрены способы регулирования возбуждения синхронных генераторов, применяемых в автономных источниках электрической энергии, передвижных электроагрегатах и электростанциях. Разработана принципиальная схема системы возбуждения синхронного генератора с внешней двунаправленной форсировкой. Результаты показывают, что система обеспечивает форсированное изменение возбуждения при сбросе и набросе нагрузки.

Ключевые слова: внешняя форсировка, регулирование возбуждения синхронного генератора, внешний источник питания, отклонение напряжения, двунаправленная форсировка.

Математическим описанием переходных процессов в синхронных генераторах занимались в Волгоградском государственном техническом университете (ВолгГТУ), а именно в их числе к.т.н. С.И.Николаева. В этих работах на основании полных математических выражений Парка-Горева были разработаны разные модели синхронных генераторов, выдающиеся степенью идеальных условий, происходящих в электрической машине.

Вопросами систем автоматического регулирования возбуждения синхронных генераторов с внешней форсировкой на судах уделено меньшее количество исследований в сравнении с общей массой уже исследованных САРВ.

Одними из известных являются система возбуждения синхронного генератора и система возбуждения синхронного генератора с внешней форсировкой, система возбуждения синхронного генератора с управляемой внешней форсировкой [4]. Одним из недостатков этой системы является лимит функциональных возможностей, поскольку система не рассматривает вариант сброса нагрузки. [1]

Разработанная система позволяет форсировать параметры возбуждения как при подключении, так и при отключении электрической нагрузки, тем самым уменьшается время переходного процесса работы генератора в динамическом режиме.

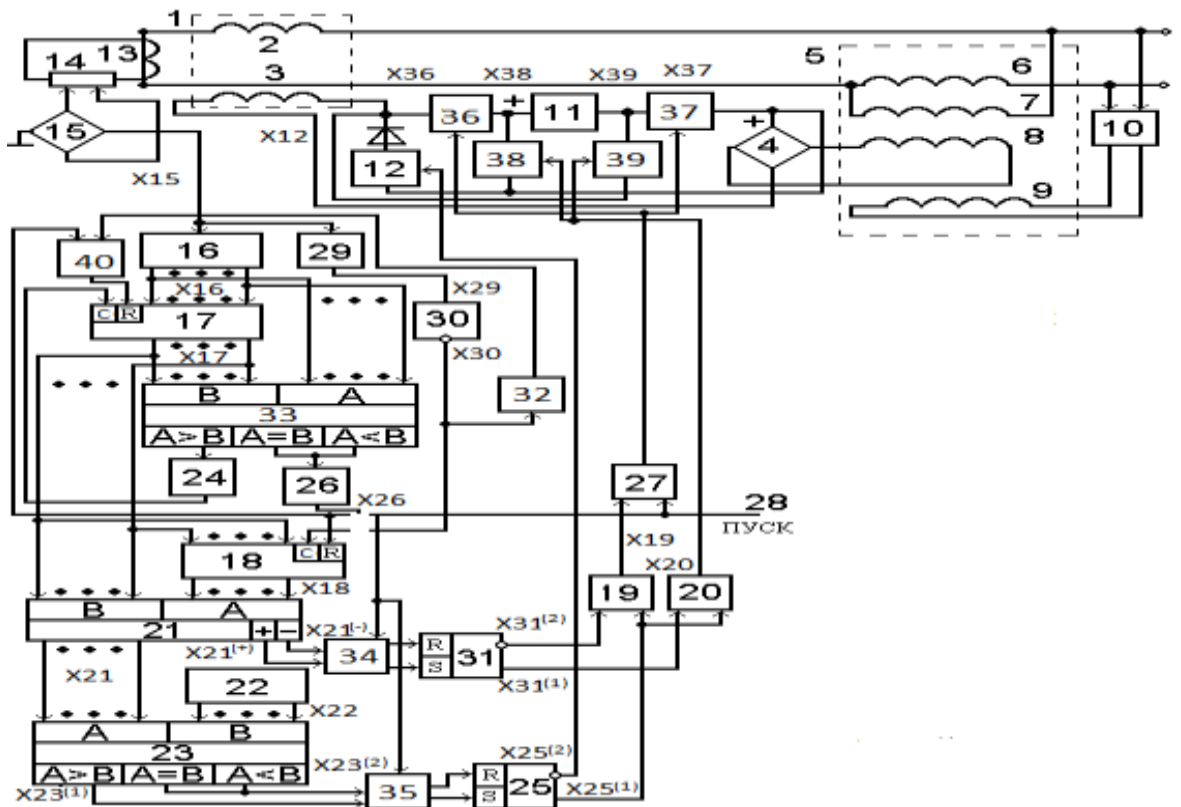


Рисунок. 2 - Принципиальная схема системы возбуждения синхронного генератора с внешней двунаправленной форсировкой

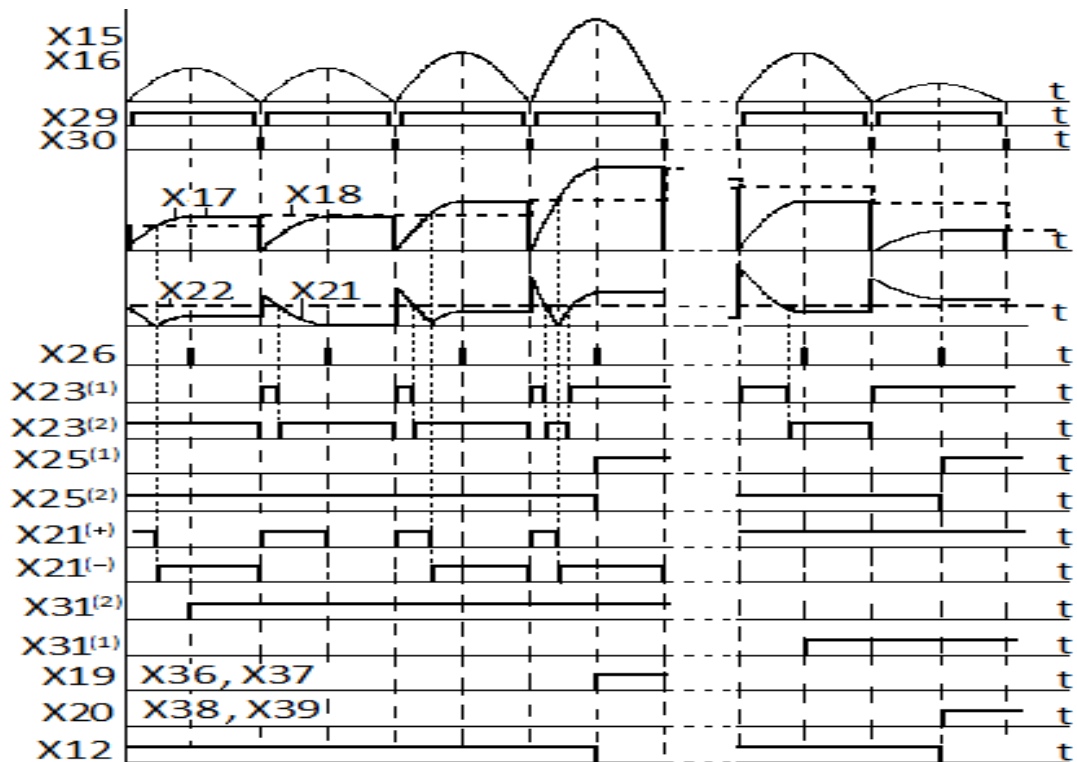


Рисунок. 2- Эпюры сигналов на основных элементах схемы

Система автоматического регулирования возбуждения СГ с внешней двунаправленной форсировкой имеет следующие ключевые особенности:

Для увеличения точности регулировки на обмотку управления 8 трансформатора 4 поступает ток с выхода корректора напряжения 10. Проверяется условие, если напряжение генератора, по какой-либо причине увеличилось, то увеличивается выходной ток корректора 10, текущий по обмотке 8. В этот же момент времени насыщение стали сердечника трансформатора 5 возрастает, а электромагнитная передача из первичных обмоток 6 и 7 во вторичную обмотку 8 спадает. ЭДС обмотки 8 уменьшается, ток возбуждения спадает, и напряжение генератора восстанавливается на прежнем уровне. Если напряжение генератора уменьшилось, то насыщение стали трансформатора также спадает, а электромагнитная передача и ток возбуждения увеличиваются, стабилизируя напряжение на заданном уровне.

В этот же момент с процессами, описанными выше, анализируется величина тока нагрузки $i_2(t)$, текущего по первичной обмотке трансформатора 13.

Ток во вторичной обмотке трансформатора тока 13 рассчитывается по следующей формуле:

$$i_2(t) = \frac{i(t)}{k} \quad (1)$$

где k – коэффициент трансформации трансформатора 1, протекая по шунту 14, происходит падение напряжения на нем, которое рассчитывается по следующей формуле:

$$u_2(t) = i_2(t) \times r \quad (2)$$

где r – сопротивление шунта 14, которое подается на вход выпрямителя 15. На выходе выпрямителя 15 появляется пульсирующее напряжение

$$u(t) = |u_2(t)| \quad (3)$$

X15 (фиг. 2), поступающее на вход АЦП 16. На выходе преобразователя 16 формируется код X16 (фиг. 2) мгновенного значения входного напряжения

$$K(t) = \frac{u(t)}{u_n} \quad (4)$$

где u_n – шаг квантования АЦП 16.

Этот код X16 по своей сути, представляет код мгновенного значения тока нагрузки генератора. Увеличивающийся код X16 на выходе АЦП 16 поступает на первый вход компаратора 33. На первый вход компаратора 33 поступает нулевой код с входа регистра памяти 17. Из-за этого возникает сигнал на выходе БОЛЬШЕ компаратора 33. По фронту этого сигнала дифференциатор 24 генерирует импульс на вход записи регистра памяти 17, в который сохраняется текущий код X16 мгновенного значения тока. По мере роста кода X16 на выходе АЦП 16 происходит перезапись кода в регистр памяти 17, а на его выходе формируется код X17, который соответствует амплитуде тока нагрузки. После записи кода текущей амплитуды в регистр памяти 17 перезапись останавливается и появляется сигнал на выходе РАВНО и МЕНЬШЕ компаратора 33. В этот же момент времени, пульсирующее напряжение X15 с выхода выпрямителя 15 поступает на вход элемента формирователя-ограничителя 29, который формирует прямоугольный импульс X29, который передается на вход элемента НЕ 30. На выходе элемента НЕ 30 с началом каждой половины волны тока, появляется короткий импульс X30. Этот импульс X30 сохраняет в регистр памяти 18 код X17 с выхода регистра памяти 17 и на выходе регистра памяти 18 формируется код X18 предыдущей амплитуды тока нагрузки. С задержкой времени импульс X30 с выхода элемента НЕ 30 через элемент задержки 32 поступает через элемент ИЛИ 40 и осуществляет сброс регистра памяти 17, готовя его к формированию следующего кода амплитуды тока нагрузки.



В результате каждую половину периода, создается предыдущий код X18 амплитуды тока $I_{m(i)}$ на выходе регистра памяти 18 и последующий код X17 амплитуды тока нагрузки $I_{m(i+1)}$, на выходе регистра памяти 17.

Эти коды X17 и X18 передаются на входы вычитателя 21 и на его выходе формируется код X21 разности предыдущий и последующий амплитуды тока нагрузки, и разность рассчитывается по формуле:

$$\Delta I_m = I_{m(i)} - I_{m(i+1)} \quad (5)$$

приращение амплитуды за половину периода, которое передается на первый вход компаратора 23. На второй вход компаратора 23 с выхода задатчика 22 формируется код X22 допустимой разности амплитуд тока $\Delta I_{m \text{ доп.}}$, при котором не будет требоваться форсированного изменения возбуждения.

Если приращение амплитуды тока не превышает допустимую величину

$$\Delta I_m \leq \Delta I_{m \text{ доп.}} \quad (6)$$

и форсировка не требуется, то формируется сигнал X23⁽²⁾ на выходе РАВНО или МЕНЬШЕ компаратора 23. В момент времени окончания создания следующего кода амплитуды тока, импульсом X26 триггер 25 изменяется в нулевое состояние, и сигнал X25⁽²⁾ с его инверсного выхода передается на управляющий вход ключа 12, который переходя в открытое положение, напрямую включает и соединяет выпрямитель 4 к индуктору 3.

Если приращение амплитуды тока превышает допустимую величину

$$\Delta I_m > \Delta I_{m \text{ доп.}} \quad (7)$$

и требуется форсировка, то появляется сигнал X23⁽¹⁾ на выходе БОЛЬШЕ компаратора 23. В момент завершения создания очередного кода амплитуды тока, когда появляется импульс X26 на выходе дифференциатора 26, открывается ключ 35 и триггер 25 изменяет свое состояние и становится равным 1. Сигнал X25⁽¹⁾ с прямого выхода триггера 25 готовит по вторым входам элементы И 19 и 20.

При подключении нагрузки предыдущая амплитуда тока меньше последующей

$$\Delta I_{m(i)} < \Delta I_{m(i+1)} \quad (8)$$

и код X17 больше кода X18, поэтому код X21 разности на выходе вычитателя 21 имеет отрицательный знак. В момент завершения формирования кода амплитуды тока импульсом X26 с выхода дифференциатора 26 на короткий промежуток времени ключ 34 переходит в открытое состояние и сигналом X21⁽⁻⁾ с выхода признака отрицательной разности вычитателя 21 триггер 31 переводится в нулевое состояние. Сигналом X31⁽²⁾ с инверсного выхода триггера 31 открывает элемент И 19, и с его выхода через элемент ИЛИ 27 передается сигнал X19 на соответствующие управляющие входы ключей 36 и 37. Эти ключи 36 и 37 открываются и подключаются последовательно согласно с внешним источником 11, с выпрямителем 4, создавая форсированный рост возбуждения при набросе нагрузки.

При сбросе нагрузки предыдущая амплитуда тока больше последующей

$$\Delta I_{m(i)} > \Delta I_{m(i+1)} \quad (9)$$

и код X17 меньше кода X18, поэтому код X21 разности на выходе вычитателя 21 представляет положительный знак. Сигналом X21⁽⁺⁾ с выхода признака положительной разности вычитателя 21 триггер 31 переводится в состояние соответствующее единице. Сигнал X31⁽¹⁾ с прямого выхода триггера 31 открывает элемент И 20, сигналом X20 с выхода которого подключаются ключи 38 и 39. Эти ключи 38 и 39 подключают внешний источник 11 последовательно встречно с выпрямителем 4, что создает форсированное уменьшение возбуждения при сбросе нагрузки. [9]



Математическая модель системы возбуждения с внешней двунаправленной форсировкой

В состав модель входит синхронный генератор мощностью 60KVA (synchronous Machine pu Fundamental2) и несколько ступеней нагрузок. Используется программный комплекс MATLAB 2015 Simulink.

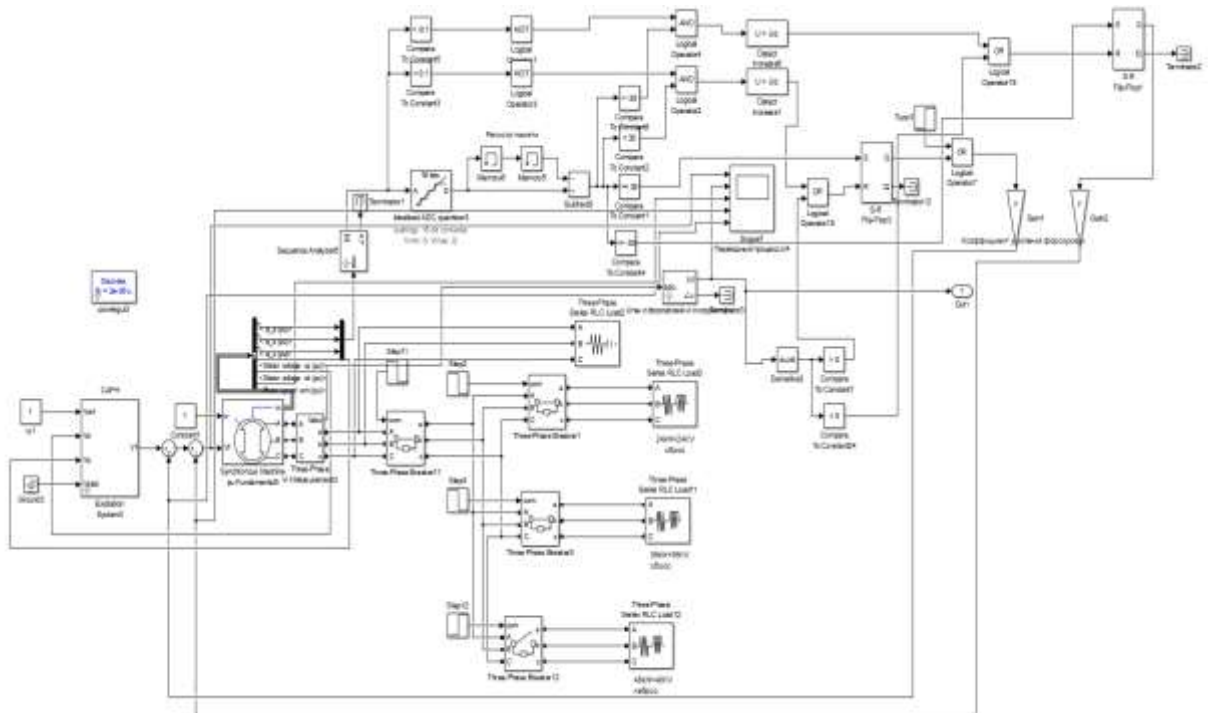


Рисунок. 4– Имитационная модель синхронного генератора с внешней двунаправленной форсировкой и контролем приращения напряжения

Процесс моделирования происходит во всех трех моделях в течение 5 секунд следующим образом:

1. Первая ступень нагрузки 24kW активной мощности и 24kVar реактивной мощности(three-phase load7) отключается от шин генератора на 1-ой секунде моделирования с помощью подачи сигнала с блока step6 на управляющий контакт трехфазного автоматического выключателя (three-phase breaker6)
2. Вторая ступень нагрузки 36kW активной мощности и 36kVar реактивной мощности(three-phase load6) отключается от шин генератора на 2-ой секунде моделирования с помощью подачи сигнала с блока step7 на управляющий контакт трехфазного автоматического выключателя (three-phase breaker7)
3. Третья ступень нагрузки 48kW активной мощности и 48kVar реактивной мощности(three-phase load9) подключается к шинам генератора на 3-ей секунде моделирования с помощью подачи сигнала с блока step9 на управляющий контакт трехфазного автоматического выключателя (three-phase breaker9)
4. Четвертая ступень нагрузки 48kW активной мощности и 48kVar реактивной мощности(three-phase load9) отключается от шин генератора на 4-ой секунде моделирования с помощью подачи сигнала с блока step8 на управляющий контакт трехфазного автоматического выключателя (three-phase breaker8)
5. В системе используется стандартная система автоматического регулирования напряжения с компаундированием excitation system имеющая обратную связь с генератором с помощью векторов v_d и v_q . V_f напряжение возбуждения.

Модель с элементами форсировки работает следующим образом: Sequence Analyzer6 преобразует трехфазный ток статора I_s_a , I_s_b , I_s_c , в действующее значение, взятое по

модулю выход $|u|$, Idealized ADC quantizer1 АЦП преобразователь конвертирует сигнал тока возбуждения в 16-битный код. Memory 2(задержка на 2 шага моделирования) и Memory 1(задержка на один шаг моделирования) представляют из себя регистр памяти в котором хранятся 16-битный коды тока с задержками, шаг моделирования $2e^{-5}$. В блоке subtract1 происходит вычитание текущего значения тока в 16 битном эквиваленте из предыдущего значения тока, тем самым оценивается приращение тока возбуждения во времени в цифровом коде. В отличии от модели с обычной двунаправленной форсировкой, на рисунке 4 изображена модель, в которую было добавлено устройство коррекции напряжения derivative3, которое уменьшает пульсации выходного напряжения генератора путем своевременного регулирования открывания и закрывания триггеров форсировки. Если дифференциал (скорость изменения напряжения) на выводах генератора больше нуля, то есть напряжение растет, например, при сбросе нагрузки триггер flip-flop3 для форсировки при набросе нагрузки закрывается путем подачи логической единицы с элемента logic operator18. Если дифференциал (скорость изменения напряжения) на выводах генератора меньше нуля, то есть напряжение уменьшается, например, при набросе нагрузки триггер flip-flop1 для форсировки при сбросе нагрузки закрывается путем подачи логической единицы с элемента logic operator19. Тем самым, наличие форсировки обуславливается и с помощью САРН, обратной связью по напряжению возбуждения, и с помощью схемы с анализом и проверкой условий по току возбуждения, а так же и с помощью элемента коррекции напряжения, который проверяет напряжение на выводах генератора и регулирует ширину импульса форсировки.

При набросе нагрузки:

Выход вычитателя subtract1 подключен к блокам проверки на допустимую разность амплитуд тока $\Delta I_{m \text{ доп}} > 30$, если значение тока БОЛЬШЕ или РАВНО 30 сигнал равный логической единице открывает, через S вход RS – триггер Flip-flop4. RS Триггер Flip-flop4 закрывается с помощью подачи логической единицы с элемента Detect increase2 при условии, если значение входа в него больше, чем его предыдущее значение, а его входом является выход с логического оператора И logic operator6, иными словами, происходит проверка, есть ли изменение действующего значения тока возбуждения, менее чем на 0.1(10% от номинальных $100\%=1$ в о.е.) с помощью элемента compare to constant0 и элемента NOT logical operator8, а так же элемент И logical operator 9, который подключен своим входом к элементу сравнения допустимой разности амплитуд тока $\Delta I_{m \text{ доп}} < 30$. RS Триггер Flip-flop4 своей работой дает разрешающий сигнал на наличие форсировки, величина которой устанавливается в элементе gain3 для форсировки при набросе нагрузке т.е. положительном увеличении тока возбуждения более чем на 0.1 и при допустимой разности амплитуд тока $\Delta I_{m \text{ доп}} > 30$, запрещающий сигнал на наличии форсировки при набросе нагрузке, при положительном увеличении тока возбуждения менее чем на 0.1 И при допустимой разности амплитуд тока $\Delta I_{m \text{ доп}} < 30$. Элемент gain3 имеет кратность форсировки 7 и подключен через сумматор и дает отрицательную обратную связь, тем самым обеспечивая форсировку напряжения возбуждения Vf генератора при набросе нагрузки на 3-ей секунду моделирования.

При сбросе нагрузки:

Выход вычитателя subtract1 подключен к блокам проверки на допустимую разность амплитуд тока $\Delta I_{m \text{ доп}} < -30$, если значение тока МЕНЬШЕ или РАВНО -30 сигнал равный логической единице открывает, через S вход RS – триггер Flip-flop2. RS Триггер Flip-flop2 закрывается с помощью подачи логической единицы с элемента Detect increase3 при условии, если значение входа в него больше, чем его предыдущее значение, а его входом является выход с логического оператора И logic operator9, иными словами, происходит проверка, есть ли изменение действующего значения тока возбуждения, менее чем на -0.1(-10% от номинальных $100\%=1$ в о.е.) с помощью элемента compare to constant2 и элемента NOT logical operator5, а так же элемент И logical operator 9, который подключен



своим входом к элементу сравнения допустимой разности амплитуд тока $\Delta I_{m \text{ доп}} > -30$. RS Триггер Flip-flop2 своей работой дает разрешающий сигнал на наличие форсировки, величина которой устанавливается в элементе gain4 для форсировки при сбросе нагрузке т.е. при уменьшении тока возбуждения более чем на -0.1 и при допустимой разности амплитуд тока $\Delta I_{m \text{ доп}} < -30$, запрещающий сигнал на наличии форсировки при набросе нагрузке, при положительном увеличении тока возбуждения менее чем на -0.1 И при допустимой разности амплитуд тока $\Delta I_{m \text{ доп}} > -30$. Элемент gain4 имеет кратность форсировки 7 и подключен через сумматор и дает положительную обратную связь, тем самым обеспечивая форсировку напряжения возбуждения V_f генератора при сбросе нагрузки на 1-ой, 2-ой, и 4-ой секунде моделирования.

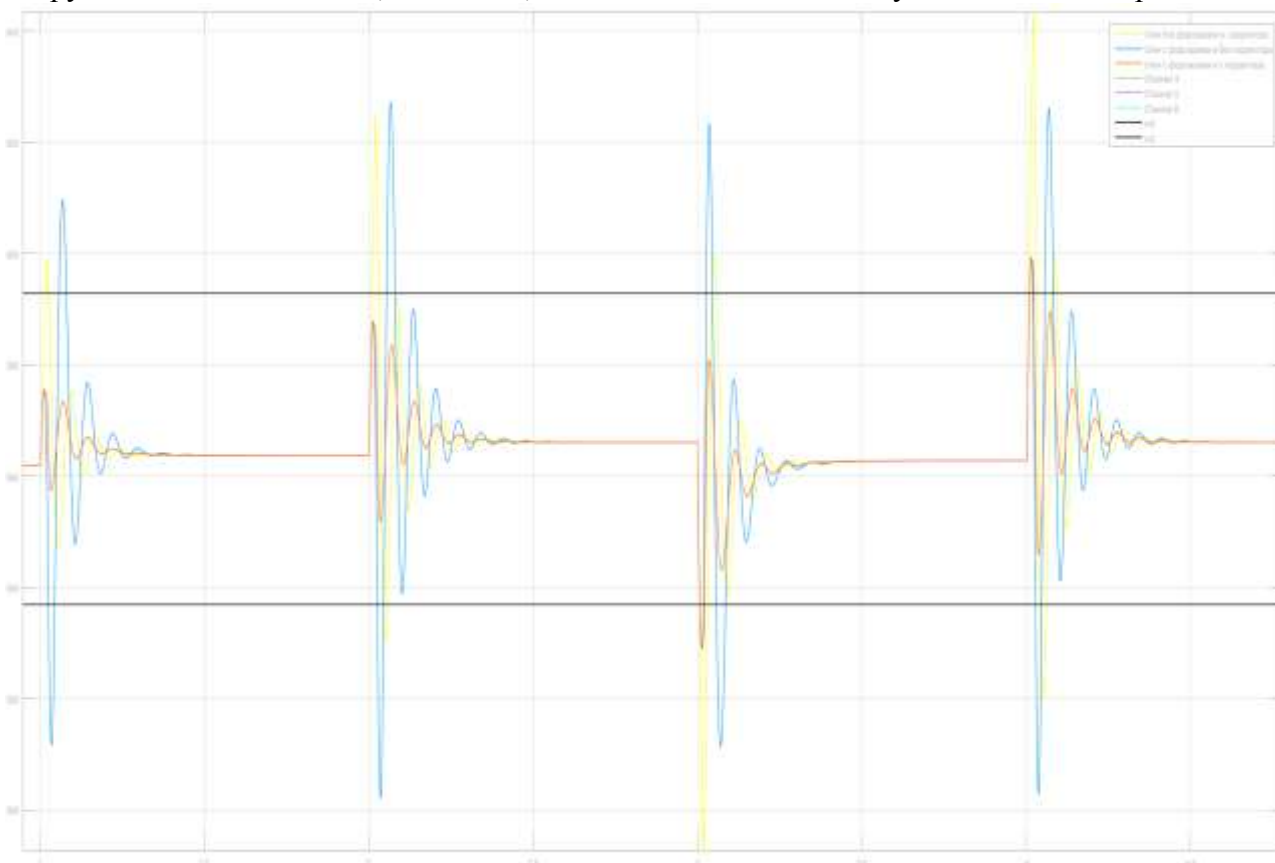


Рисунок. 6 – Сравнительная осциллограмма действующего значения напряжения на выводах генератора

Желтым отображена осциллограмма выходного напряжения генератора для модели без форсировки. Голубым отображены осциллограмма выходного напряжения генератора для модели с двунаправленной форсировкой. Оранжевым отображена осциллограмма выходного напряжения генератора для модели с двунаправленной форсировкой и устройством коррекции напряжения. Черным отображена зона $\pm 5\%$ от установившегося значения напряжения генератора 565В для определения окончания переходного процесса. Из сравнительной осциллограммы видно, что наилучшие результаты моделирования, а именно, время переходного процесса, величина перерегулирования достигаются в модели с двунаправленной форсировкой и устройством коррекции напряжения.

Вывод

Предложенная система возбуждения генератора и имитационная модель имеет высокую форсировочную способность, ограниченную лишь параметрами внешнего

источника 11. При этом обеспечивается двунаправленная форсировка возбуждения, как при набросе, так и при сбросе нагрузки генератора.

Список литературы:

1. Система возбуждения синхронного генератора с управляемой внешней форсировкой. RU 2 523 005 C1
2. Сугаков В. Г., Хватов О. С. Основы автоматического регулирования выходных электрических параметров Часть 2. Автоматическое регулирование напряжения автономных источников электрической энергии. Учебное пособие для вузов. – Кстово: НВВИКУ (ВУ), 2007, с. 44-52.
3. Сугаков В. Г., Хватов О. С. Системы автоматического регулирования параметров электрической энергии судовых электростанций. Часть 2. Автоматическое регулирование напряжения судовых источников электрической энергии. Учебное пособие. – Н. Новгород: Изд-во ФГОУ ВПО «ВГАВТ», 2011, с. 59-95.
4. Система возбуждения синхронного генератора. Описание изобретения к патенту RU 2470454, кл. Н 02 Р 9/14, 2012.
5. Николаева С.И. Математическое описание переходных процессов в синхронных генераторах. - Известия Волгоградского государственного технического университета (ВолгГТУ) – Волгоград, 2009.
6. Коротков В.Ф. Автоматическое регулирование в электроэнергетических системах: учебник для вузов / В.Ф. Коротков.— М.: Издательский дом МЭИ, 2013. — 416 с.
7. Сугаков В.Г., Хватов О.С., Малышев Ю.С., Тощев А.А. Оценка и коррекция небаланса напряжений в системах электроснабжения с автономными источниками электроэнергии. - Актуальные проблемы электроэнергетики»: материалы научно-технической конференции. Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева – Н.Новгород: НГТУ, 2014. – 206 с.
8. Сугаков В.Г., Хватов О.С., Малышев Ю.С., Тощев А.А., Сычушкин И.В. Форсировка систем возбуждения синхронных генераторов. - Вестник астраханского государственного технического университета. Серия Морская техника и технология. №3. – Астрахань, 2015.
9. Система возбуждения синхронного генератора с внешней двунаправленной форсировкой. RU 2 725 137 C1

SYNCHRONOUS GENERATOR EXCITATION SYSTEM WITH EXTERNAL BIDIRECTIONAL BOOST

Valery G. Sugakov, Alexander A. Toshchev, Lavrentii V. Zobov

Abstract. The article deals with ways to regulate the excitation of synchronous generators used in Au-tonomous sources of electric energy, mobile power plants and power plants. A schematic diagram of the synchronous generator excitation system with external bidirectional boost has been developed. The results show that the system provides a forced change in the excitation when resetting and load-ing.

Keywords: external boost, synchronous generator excitation regulation, external power supply, voltage deviation, bidirectional boost.

