

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ НА ОСНОВЕ АКТИВНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ

Н. Ю. Шевырева, Ю. Т. Портной,
Ю. В. Шевырев, Д. Э. Доброхотов

Рассмотрен вариант построения системы автоматического регулирования напряжения синхронного генератора с постоянными магнитами на основе активного выпрямителя напряжения. Приведена структурная схема системы автоматического регулирования напряжения синхронного генератора. Структурная схема выполнена по принципу подчинённого регулирования координат. Применение активного выпрямителя напряжения, включённого параллельно шинам синхронного генератора, позволяет обеспечить наряду с поддержанием заданного значения напряжения синхронного генератора стабилизацию напряжения постоянного тока. Отрицательная обратная связь по напряжению синхронного генератора обеспечивает его заданное значение независимо от нагрузки. Поддержание заданного значения напряжения синхронного генератора осуществляется за счёт регулирования реактивной мощности, генерируемой активным выпрямителем напряжения. Отсутствие фильтра на входе активного выпрямителя напряжения приводит к значительному искажению синусоидальной формы напряжения синхронного генератора. При включении фильтра на входе активного выпрямителя напряжения суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения в установившемся режиме не превышает нормированного значения. Применение ПИ-регулятора выпрямленного напряжения активного выпрямителя напряжения и И-регулятора напряжения синхронного генератора обеспечивают стабилизацию в установившихся режимах напряжения на шинах синхронного генератора и выпрямленного напряжения активного выпрямителя напряжения независимо от нагрузки.
Ключевые слова: синхронный генератор с постоянными магнитами, регулирование напряжения синхронного генератора, активный выпрямитель напряжения, отрицательная обратная связь по напряжению синхронного генератора, реактивная мощность, искажение синусоидальной формы напряжения синхронного генератора, фильтр.

Введение

Синхронный генератор (СГ) с постоянными магнитами обладает рядом преимуществ: отсутствием вращающихся контактов, хорошими энергетическими, массогабаритными и виброакустическими характеристиками, возможностью электро-стартерного запуска, относительной простотой конструкции. Однако особенностью такого генератора является нестабильность выходного напряжения при изменении величины и коэффициента мощности нагрузки. В [1] показана возможность стабилизации напряжения синхронного генератора с постоянными магнитами при переменной величине нагрузки за счет использования параллельного включения полупроводникового преобразователя в виде активного выпрямителя напряжения (АВН). Стабилизация осуществляется регулированием перетоков реактивной мощности между генератором, преобразователем и нагрузкой. Однако в [1] не рассмотрены системы автоматического регулирования напряжения синхронного генератора с постоянными магнитами. В данной статье рассмотрен вариант построения системы автоматического регулирования (САР) напряжения синхронного генератора с постоянными магнитами на основе АВН. Наряду с поддержанием заданного значения напряжения СГ применение АВН позволяет обеспечить поддержание заданного значения напряжения постоянного тока.

Система автоматического регулирования напряжения синхронного генератора с постоянными магнитами

Рассмотрим систему автоматического регулирования напряжения синхронного генератора с постоянными магнитами на основе двухуровневого АВН.

В этом случае для поддержания заданного значения напряжения независимо от параметров синхронного генератора и нагрузки необходимо его автоматическое регулирование при помощи отрицательной обратной связи (о. о. с.) по напряжению на шинах генератора.

На рис. 1 приведена функциональная схема АВН с САР напряжения для случая, когда регулируемой величиной является действующее значение основной гармоники линейного напряжения $U_{1л}$ на шинах генератора [2]. На рисунке показана также цепь нагрузки на стороне переменного тока Z_n и на стороне постоянного тока R_n . Между зажимами питающей сети A, B, C и входами АВН $A1, B1, C1$ включены буферные реакторы с активными сопротивлениями R_p и индуктивностями L_p , которые наряду с емкостью C_d в звене постоянного тока определяют основные свойства АВН.

Напряжение на входе АВН формируется средствами широтно-импульсной модуляции (ШИМ), вследствие чего в напряжении присутствуют гармонические составляющие высокой частоты. Для фильтрации высших гармоник напряжения в схему введен фильтр Ф,

который ослабляет высшие гармоники напряжения, генерируемые АВН в сеть переменного тока, в соответствии с требованиями к качеству напряжения.

Система автоматического регулирования, приведённая на рис. 1, выполнена по принципу векторной САР АВН [3] при добавлении о. о. с. по $U_{1л}$ и регулятора напряжения $U_{1л}$ [2]. Значение $U_{1л}$ вычисляется в блоке вычисления $U_{1л}$, на вход которого поступают измеренные мгновенные значения напряжения сети. Измерение токов осуществляется с помощью датчиков ДТ_а, ДТ_б, ДТ_с.

Векторная САР содержит двухконтурную САР напряжения СГ, внутренним контуром которого является контур регулирования реактивного тока i_y , и двухконтурную САР выпрямленного напряжения АВН U_d , внутренним контуром которой является контур регулирования активного тока i_x .

«Блок ориентации по $U_{ABC} \rightarrow xy$ » выполняет вычисление параметров: амплитуду U_{1m} и круговую частоту ω_u сетевого напряжения и по результатам измерения мгновенных значений напряжений в фазах сети, а также осуществляет преобразование входных токов в координатную систему (x, y) , ориентированную по вектору сетевого напряжения U [3]. В этом блоке вычисляется также угол ϕ_u (угол поворота вектора напряжения питающей сети в неподвижной системе координат A, B, C). Блок компенсации перекрестных связей компенсирует взаимное

влияние активной i_x и реактивной i_y составляющих вектора входного тока АВН I [3]. Блок «Преобразование координат $xy \rightarrow ABC$ » выполняет преобразование заданных входных напряжений выпрямителя из вращающейся системы координат (x, y) в неподвижную трёхфазную систему координат (A, B, C) . Сигналы рассогласований между заданными (i_x^*, i_y^*) и фактическими (i_x, i_y) значениями преобразованных токов поступают на входы ПИ-регуляторов токов. Выходные сигналы регуляторов токов после дополнения сигналами компенсирующих связей поступают на входы преобразователя координат вектора управляющих напряжений $xy \rightarrow ABC$. После преобразования координат формируются управляющие воздействия u_{na}^*, u_{nb}^* и u_{nc}^* , поступающие на вход блока управления АВН, с выхода которого осуществляется управление драйверами 6-ти транзисторов АВН. Передаточные функции регуляторов реактивного i_y и активного токов i_x и регулятора выпрямленного напряжения U_d АВН определяются по методике, изложенной в [3]. В рассматриваемом случае применяются ПИ-регуляторы реактивного и активного тока АВН и ПИ-регулятор выпрямленного напряжения АВН U_d . На вход ПИ-регулятора выпрямленного напряжения АВН подается сигнал задания выпрямленного напряжения U_d^* .

Рассмотрим методику определения передаточной функции регулятора напряжения СГ.

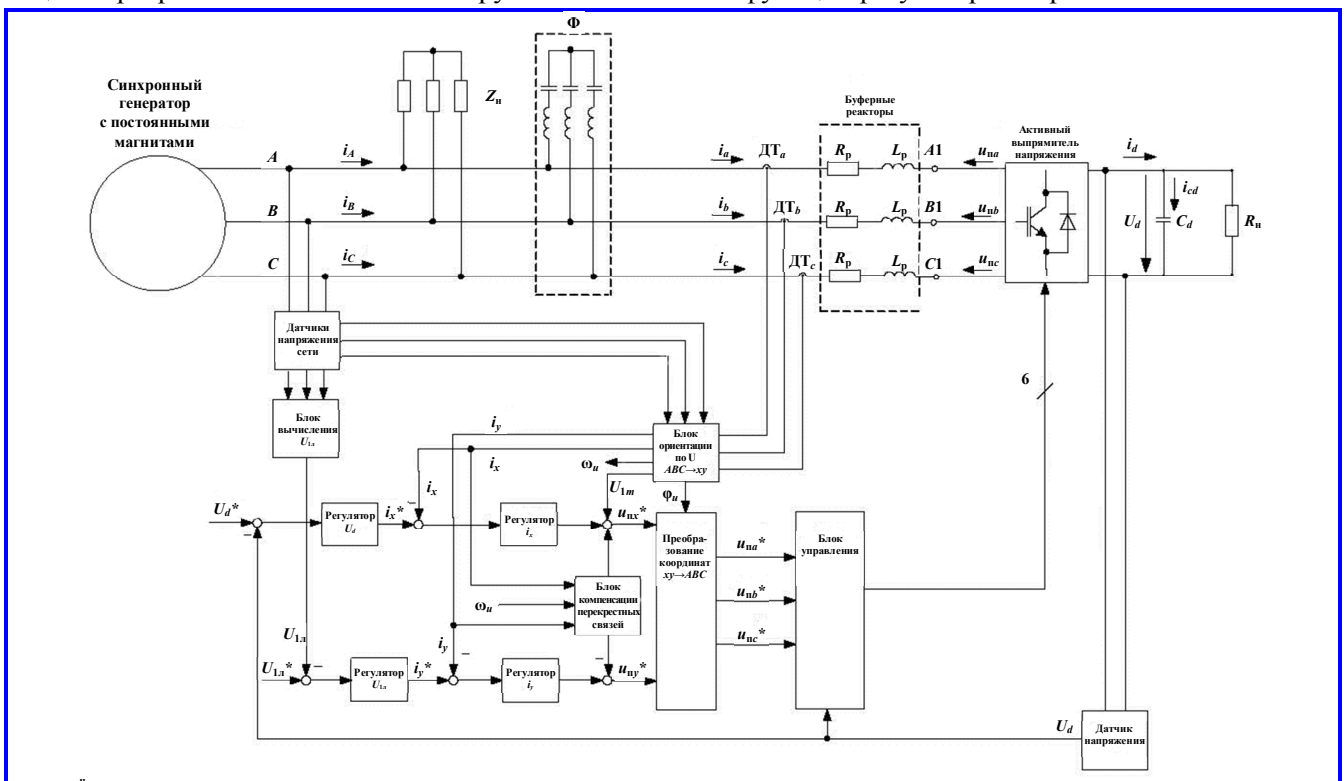


Рис. 1. Функциональная схема активного выпрямителя напряжения с системой автоматического регулирования напряжения синхронного генератора

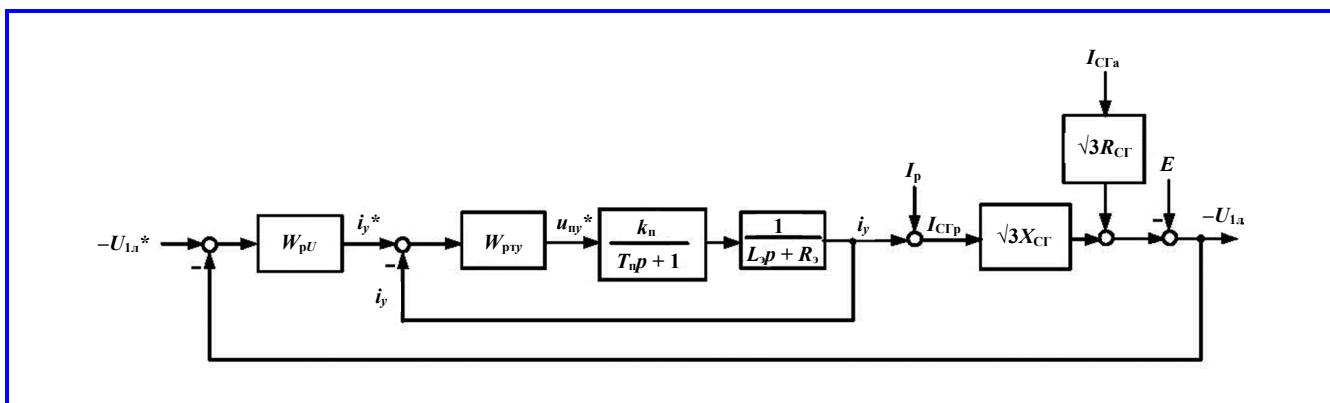


Рис. 2. Структурная схема системы автоматического регулирования напряжения синхронного генератора

На рис. 2 приведена структурная схема САР АВН для случая, когда в качестве регулируемой величины выбрано линейное напряжение $U_{1л}$ на шинах СГ. Структурная схема выполнена по принципу подчинённого регулирования координат, которая аналогична рассмотренной в [4].

При построении структурной схемы САР воспользуемся формулой для определения падения линейного напряжения СГ ΔU , приведенной в [5]:

$$\Delta U = \sqrt{3} (I_{сга}R_{сг} + I_{сгp}X_{сг}),$$

где $I_{сга}$ – значение основной гармоники активного тока СГ; $I_{сгp}$ – значение основной гармоники реактивного тока СГ; $R_{сг}$, $X_{сг}$ – активное и индуктивное сопротивление СГ.

Действующее значение основной гармоники линейного напряжения $U_{1л}$ равно:

$$U_{1л} = E - \Delta U,$$

где E – электродвижущая сила (ЭДС) СГ.

Внутренним контуром САР напряжения СГ является замкнутый контур регулирования реактивного тока АВН i_y . АВН представляется в виде инерционного звена, где k_n – коэффициент передачи АВН; T_n – постоянная времени АВН. Эквивалентная индуктивность $L_3 = L_{сг} + L_p$, где $L_{сг}$ – индуктивность СГ; L_p – индуктивность буферного реактора. Эквивалентное активное сопротивление $R_3 = R_{сг} + R_p$, где $R_{сг}$ – активное сопротивление СГ; R_p – активное сопротивление буферного реактора. Передаточная функция регулятора реактивного тока W_{pI} находится по методике, изложенной в [3].

Внешним контуром САР напряжения СГ является контур регулирования $U_{1л}$. В контур регулирования $U_{1л}$ входят контур регулирования реактив-

ного тока i_y и регулятор напряжения $U_{1л}$. Возмущающим воздействием является реактивный ток I_p нагрузки Z_n на стороне переменного тока СГ.

Коэффициент обратной связи по напряжению принят равным 1.

Значение передаточной функции регулятора напряжения СГ, которое находится в соответствии с методикой, изложенной в [4], равно:

$$W_{pU} = \frac{1}{T_{нU}p},$$

где $T_{нU} = a_U a_T T_n X_{сг} \sqrt{3}$ – постоянная времени регулятора; a_T – коэффициент настройки регулятора тока W_{pI} ; a_U – коэффициент настройки регулятора напряжения W_{pU} ; p – комплексная переменная.

Регулятор напряжения является И-регулятором. Постоянная времени $T_{нU}$ регулятора напряжения зависит от индуктивного сопротивления СГ $X_{сг}$ и, следовательно, от параметров СГ. При изменении параметров СГ, чтобы получить требуемые переходные процессы, регулятор напряжения необходимо перестраивать.

Исследование системы автоматического регулирования напряжения синхронного генератора с постоянными магнитами

Задача исследования системы автоматического регулирования напряжения синхронного генератора с постоянными магнитами решается при помощи пакета MatLab, который содержит систему визуального моделирования Simulink и пакет расширения SimPower Systems.

В основу разработанной компьютерной модели положена функциональная схема АВН с САР напряжения СГ (рис. 1). Компьютерная модель представ-

ляется в виде блок-диаграммы, которая содержит все элементы исходной функциональной схемы АВН с САР напряжения СГ в виде отдельных блоков.

Компьютерная модель позволяет выполнить расчеты следующих величин:

- действующее значение полного тока СГ (абсолютное и относительное);
- действующее значение активного тока СГ (абсолютное и относительное);
- действующее значение реактивного тока СГ (абсолютное и относительное);
- действующее значение тока АВН (абсолютное и относительное).
- отклонение линейного напряжения δU от номинального на шинах СГ;
- суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения K_U на шинах СГ;
- активная мощность P СГ;
- реактивная мощность Q СГ;
- коэффициент мощности $\cos\varphi$ СГ;
- напряжение U_{1n} на шинах СГ;
- амплитуда первой гармоники напряжения U_{1m} на шинах СГ;
- выпрямленное напряжение АВН U_d .

Относительные значения вычисляются по отношению к номинальному току СГ.

Исследования проводились на компьютерной модели при следующих условиях:

- трехфазная обмотка СГ соединена в звезду;
- рабочая частота СГ $f_{СГ} = 50$ Гц;
- линейная ЭДС СГ составляет $E = 420$ В;
- номинальный полный ток СГ $I_{СГ} = 900$ А;
- индуктивное сопротивление СГ $X_{СГ} = 0,1$ Ом;
- активные сопротивления СГ и линии от СГ до АВН, ввиду их малости, не учитываются;
- емкость звена постоянного тока $C_d = 20\,000$ мкФ;
- индуктивность буферного реактора $L_p = 0,058$ мГн;
- активное сопротивление буферных реакторов $R_p = 0,0032$ Ом;
- система регулирования напряжения активного выпрямителя напряжения (АВН) настроена на поддержание линейного напряжения СГ на уровне 380 В;
- мощность нагрузки на стороне постоянного тока $P = 100$ кВт, активная мощность нагрузки на стороне переменного тока $P = 400$ кВт, коэффициент мощности нагрузки на стороне переменного тока составляет $\cos\varphi_n = 0,7$;
- напряжение на стороне постоянного тока $U_d = 600$ В.
- несущая частота ШИМ АВН $f_{PWM} = 2,4$ кГц;
- емкость фильтра Φ принята равной 786 мкФ, индуктивность фильтра Φ принята равной нулю.

Исследовались переходные процессы в СГ и АВН при включении нагрузки Z_n на стороне переменного тока при отсутствии фильтра Φ на входе АВН и его наличии.

Результаты моделирования представлены на рис. 3 – 9 в виде графиков.

Приложение нагрузки Z_n потребителей переменного тока происходит в момент времени 0,8 с. От нуля до момента времени 0,8 с и далее приложена нагрузка R_n потребителей постоянного тока.

На рис. 3 и 4 представлены графики изменения во времени коэффициента мощности СГ по первой гармонике $\cos\varphi$, отклонения напряжения U_{1n} от номинального δU и суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения K_U на шинах СГ при отсутствии и наличии фильтра АВН соответственно. На рис. 5 представлены графики изменения во времени реактивной мощности Q и активной мощности P синхронного генератора, которые не зависят от наличия фильтра АВН. На рис. 6 приведен график изменения во времени выпрямленного напряжения АВН U_d , которое не зависит от наличия фильтра АВН. На рис. 7 показаны графики изменения во времени амплитуды первой гармоники напряжения U_{1m} синхронного генератора, которые не зависят от наличия фильтра АВН. На рис. 8 и 9 представлены графики изменения во времени действующих значений токов АВН $I_{АВН}$ и СГ $I_{СГ}$ в относительных единицах при отсутствии и наличии фильтра АВН соответственно.

Результаты исследования свидетельствуют о следующем.

Наличие или отсутствие фильтра АВН не влияет на значения $\cos\varphi$, δU , Q , P , U_d , U_{1m} .

В момент времени $t = 0,8$ с, когда прикладывается нагрузка, равная 400 кВт, происходит просадка напряжения СГ. Отклонение напряжения в момент включения нагрузки достигает 35%. Однако через промежуток времени, равный примерно 0,4 с, происходит возвращение напряжения СГ к исходному значению, равному 380 В. Такое большое отклонение напряжения объясняется тем, что при исследовании взят самый тяжелый случай – ступенчатое приложение максимальной нагрузки. На практике такой режим маловероятен. Поэтому реально отклонение напряжения будет значительно меньше.

Восстановление напряжения происходит за счет действия отрицательной обратной связи по напряжению АВН. В этом случае АВН обеспечивает автоматическое генерирование либо потребление требуемого значения реактивной мощности. Изложенное иллюстрируется графиком изменения реактивной мощности во времени (рис. 4), из которого видно, что за

счет о. о. с. по $U_{1л}$ в течение переходного процесса происходит уменьшение реактивной мощности СГ. Это приводит к уменьшению реактивного тока СГ и восстановлению заданного значения напряжения СГ. Соответственно коэффициент мощности СГ во время переходного процесса изменяется в пределах от 0,5 (индуктивный) до 0,96 (индуктивный).

В момент приложения нагрузки на стороне переменного тока выпрямленное напряжение АВН U_d уменьшается, однако после окончания переходного процесса (примерно через 0,2 с) возвращается к исходному значению. Из приведенных на рис. 6, 7 и 8 графиков переходных процессов видно, что применение ПИ-регулятора выпрямленного напряжения АВН U_d и И-регулятора напряжения

СГ обеспечивают постоянство в установившихся режимах выпрямленного напряжения АВН и напряжения на шинах СГ независимо от нагрузки. Отсутствие фильтра АВН приводит к значительному искажению синусоидальной формы напряжения СГ. Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения K_U на шинах СГ в этом случае значительно превышает нормированное значение 8% [6]. При включении фильтра АВН суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения K_U на шинах СГ уменьшается и в установившемся режиме не превышает нормированного значения 8%. Однако в момент приложения нагрузки происходит кратковременное увеличение K_U выше допустимого значения.

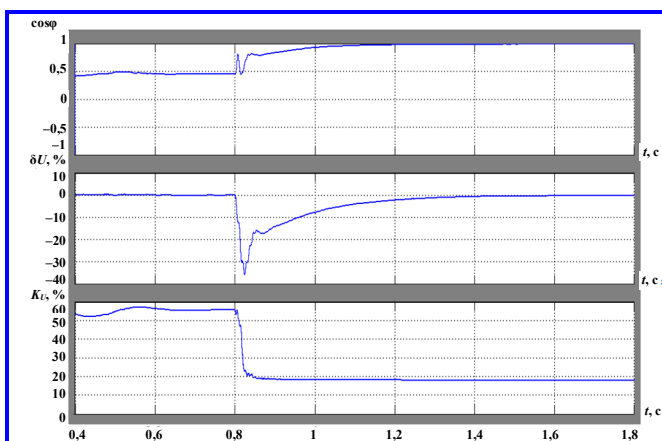


Рис. 3. Коэффициент мощности синхронного генератора по первой гармонике $\cos\varphi$, отклонение напряжения δU и суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения K_U на шинах СГ при отсутствии фильтра АВН

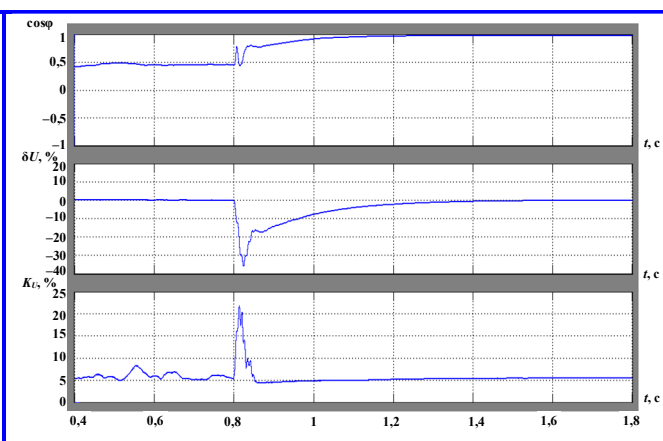


Рис. 4. Коэффициент мощности синхронного генератора по первой гармонике $\cos\varphi$, отклонение напряжения δU и суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения K_U на шинах СГ при наличии фильтра АВН

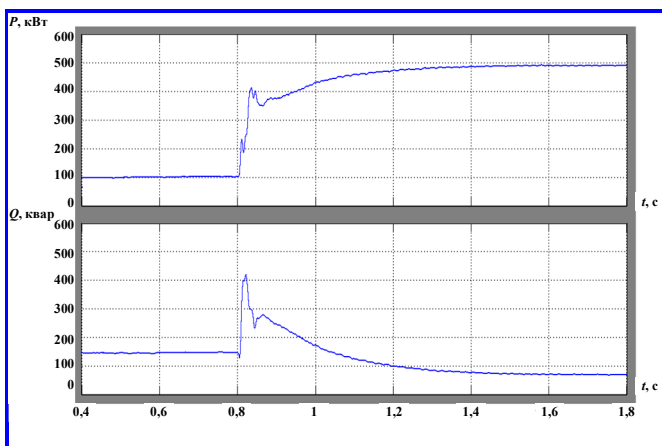


Рис. 5. Активная мощность P и реактивная мощность Q синхронного генератора при наличии и отсутствии фильтра АВН

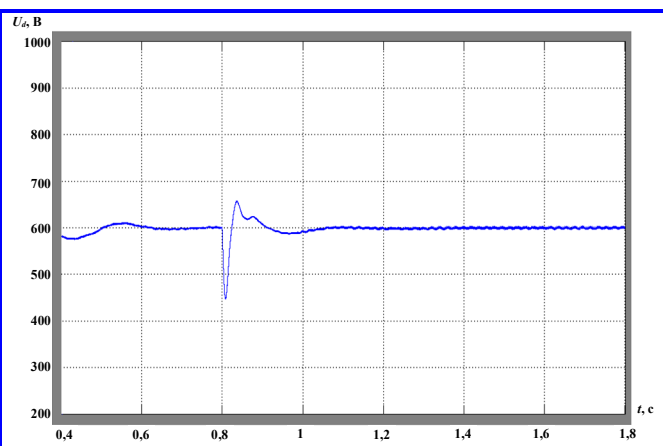


Рис. 6. Выпрямленное напряжение активного выпрямителя напряжения U_d при наличии и отсутствии фильтра АВН

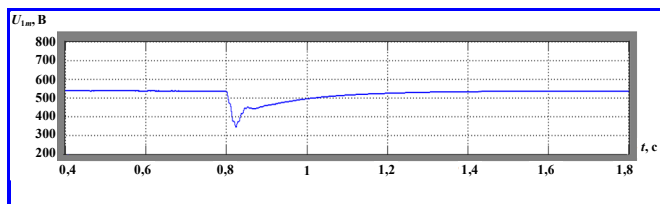


Рис. 7. Амплитуда первой гармоники напряжения U_{1m} синхронного генератора при отсутствии и наличии фильтра АВН

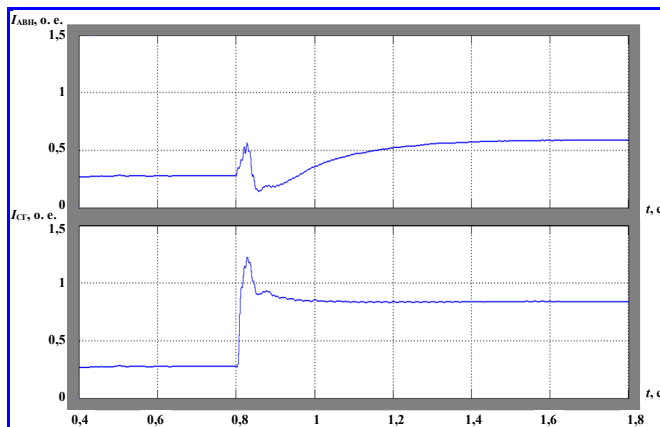


Рис. 8. Действующие значения токов активного выпрямителя напряжения $I_{АВН}$ и синхронного генератора $I_{СГ}$ при отсутствии фильтра АВН

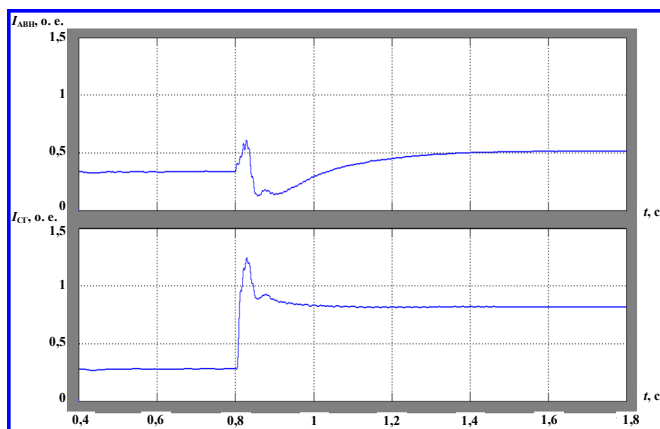


Рис. 9. Действующие значения токов активного выпрямителя напряжения $I_{АВН}$ и синхронного генератора $I_{СГ}$ при наличии фильтра АВН

Действующее значение тока АВН $I_{АВН}$ после приложения нагрузки переменного тока в установившемся режиме меньше действующего значения тока СГ $I_{СГ}$: при отсутствии фильтра АВН – на 26%, при наличии фильтра АВН – на 35% (рис. 8 и 9). Это различие объясняется тем, что при наличии фильтра для поддержания требуемого значения напряжения

СГ требуется меньшее значение реактивного тока АВН из-за емкостного характера тока фильтра.

Все исследования были выполнены при несущей частоте ШИМ АВН $f_{PWM} = 2,4$ кГц. Для анализа влияния величины несущей частоты ШИМ АВН на искажение синусоидальной формы напряжения на шинах СГ, были проведены дополнительные исследования при несущей частоте ШИМ АВН $f_{PWM} = 10$ кГц и отсутствии фильтра.

Анализ полученных результатов показал следующее:

- при отсутствии нагрузки по переменному току увеличение несущей частоты практически не влияет на суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения K_U на шинах СГ, который превышает нормированное значение 8%;
- при наличии нагрузки по переменному току суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения K_U на шинах СГ уменьшается до величины, не превышающей нормированного значения 8%.

Выводы

Предложена система автоматического регулирования напряжения синхронного генератора с постоянными магнитами на основе двухуровневого активного выпрямителя напряжения, подключенного параллельно шинам синхронного генератора. Система автоматического регулирования выполнена по принципу подчиненного регулирования координат.

Применение АВН позволяет обеспечить наряду с поддержанием заданного значения напряжения СГ стабилизацию напряжения постоянного тока на выходе АВН.

Применение отрицательной обратной связи по напряжению СГ в системе управления АВН обеспечивает заданное значение напряжения СГ с постоянными магнитами независимо от наличия фильтра Φ на входе АВН.

Вместе с тем отсутствие фильтра Φ приводит к значительному искажению синусоидальной формы напряжения СГ, а при включении на шины СГ фильтра Φ суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения в установившемся режиме не превышает нормированного значения.

Применение ПИ-регулятора выпрямленного напряжения АВН и И-регулятора напряжения СГ обеспечивают стабилизацию выпрямленного напряжения АВН и напряжения на шинах СГ в установившихся режимах независимо от нагрузки.

Действующее значение тока АВН $I_{АВН}$ после приложения нагрузки переменного тока при отсутствии фильтра АВН в установившемся ре-

жиме меньше действующего значения тока СГ $I_{СГ}$ на 26%, а при наличии фильтра меньше действующего значения тока СГ $I_{СГ}$ на 35%.

Литература

1. Стабилизация напряжения синхронного генератора с постоянными магнитами при переменной нагрузке / С. А. Харитонов, Д. В. Коробков, Д. В. Макаров [и др.] // Доклады ТУСУР. – 2012. – № 1 (25). – С. 139 – 146.
2. Применение активных выпрямителей напряжения при эксплуатации буровых установок / Н. Ю. Шевырева // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2017. – № 10 (специальный выпуск 21). – С. 3 – 14.
3. Виноградов А. Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / А. Б. Виноградов. – Иваново : ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2008. – 298 с.
4. Шевырев Ю. В. Динамические процессы в электромеханических системах соизмеримой мощности с фильтрокомпенсирующими устройствами / Ю. В. Шевырев // Электротехника. – 2004. – № 12. – С. 24 – 30.
5. Анастасиев П. И. Справочник по проектированию электрических сетей и электрооборудования / П. И. Анастасиев, М. Д. Бершицкий, Б. Н. Буре [и др.]. – Москва : Энергоатомиздат, 1991. – 464 с.
6. ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 июля 2013 г. № 400-ст : введен впервые : дата введения 01.07.2014 / разработан ООО «Линвит» и Техническим комитетом по стандартизации ТК 30 «Электромагнитная совместимость технических средств». – Москва : Стандартинформ, 2014. – 15 [1] с.

Поступила в редакцию 23.04.2021

Наталья Юрьевна Шевырева, кандидат технических наук, доцент,
т. 8 (903) 556-11-57, e-mail: nshev90@yandex.ru.

(Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина»).

Юрий Теодорович Портной, кандидат технических наук, доцент, главный специалист,
т. 8 (916) 728-71-18, e-mail: otdel32@hq.vniiem.ru.
(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

Юрий Вадимович Шевырев, доктор технических наук, профессор,
т. 8 (916) 311-06-46, e-mail: uvshev@yandex.ru.

(Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»).

Дмитрий Эдуардович Доброхотов, ведущий инженер, т. 8 (495) 366-34-11, e-mail: otdel32@hq.vniiem.ru.
(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

AUTOMATIC VOLTAGE REGULATION SYSTEM FOR SYNCHRONOUS PERMANENT MAGNET GENERATOR BASED ON ACTIVE VOLTAGE RECTIFIER

**N. Yu. Shevyreva, Yu. T. Portnoi
Yu. V. Shevrev, D. E. Dobrokhotov**

An option of building an automatic voltage regulation system for a synchronous permanent magnet generator based on active voltage rectifier is considered in the article. A block diagram of synchronous generator automatic voltage regulation system is provided. The block diagram has been generated on the basis of subordinated coordinate regulation principle. The application of an active voltage rectifier connected in parallel to the buses of synchronous generator allows ensuring stabilization of d.c. voltage along with maintaining the specified voltage of a synchronous generator. Inverse voltage feedback of the synchronous generator ensures the specified voltage value irrespective of the load. The maintenance of the specified synchronous generator voltage is ensured due to the regulation of reactive power generated by the active voltage rectifier. The absence of filter at the input of the active voltage rectifier leads to significant distortion of the sine-wave form of synchronous generator voltage. When the filter at the input of the active voltage rectifier is on, the total coefficient of the voltage harmonic components in the steady state mode does not exceed the specified value. The application of PI-controller for rectified voltage of the active voltage rectifier and I-controller for synchronous generator voltage ensure stabilization of voltage on the synchronous generator buses and rectified voltage of the active voltage rectifier in the steady state modes, irrespective of the load.

Key words: permanent magnet synchronous generator, synchronous generator voltage control, active voltage rectifier, synchronous generator voltage inverse feedback, reactive power, distortion of synchronous generator voltage sine-wave form, filter.

References

1. Stabilization of voltage of synchronous generator with constant magnets at variable loading / S. A. Kharitonov, D. V. Korobkov, D. V. Makarov [et al.] // Power electronics. Power engineering. – 2012. – No. 1 (25). – Pp. 139–146.
2. Application of active front end during operation of drilling rigs/ N. Yu. Shevyreva // Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal). – 2017. – No. 10 (special issue 21). – Pp. 3–14.
3. Vinogradov A. B. Vector control of AC electric drives/ A.B. Vinogradov. – Ivanovo : Ivanovo State Power University named after V. I. Lenin, 2008. – p. 298.
4. Shevyrev Yu. V. Dynamic processes in electromechanical systems of commensurable power with filter compensating devices / Yu. V. Shevyrev // Electrical engineering. – Moscow, 2004. – No. 12 – Pp. 24–30.
5. Anastasiev P. I. Handbook for designing of electric power networks and electrical equipment / P. I. Anastasiev, M. D. Bershitskiy, B. N. Bure [et al.]. – Moscow : Energoatomizdat, 1991. – p. 464.
6. GOST 32144–2013. Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in public electrical systems : national standard of the Russian Federation : official edition : approved and brought into force by the Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology No. 400-CT of July 22, 2013 : introduced for the first time : effective date 01.07.2014 / prepared by JSC Linvit and the Technical Committee for Standardization (TC 30) in the Field of Electromagnetic Compatibility. – Moscow : Standartinform, 2014. – p. 15 [1].

*Natalia Yurevna Shevyreva, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Associate Professor,
tel.: 8 (903) 556-11-57, e-mail: nshev90@yandex.ru.
(National University of Oil and Gas «Gubkin University»).*

*Yuri Teodorovich Portnoi, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Associate Professor, Chief Specialist,
tel.: 8 (916) 728-71-18, e-mail: otdel32@hq.vniiem.ru.
(JC «VNIEM Corporation»).*

*Yuri Vadimovich Shevyrev, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Professor,
tel.: 8 (916) 311-06-46, e-mail: uvshev@yandex.ru.
(National University of Science & Technology (MISIS)).*

*Dmitrii Eduardovich Dobrokhoto, Leading Engineer, tel.: 8 (495) 366-34-11, e-mail: otdel32@hq.vniiem.ru.
(JC «VNIEM Corporation»).*