

УДК 621.313.322

**ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕНТИЛЬНОГО
ГЕНЕРАТОРА СОВМЕЩЕННОГО ТИПА****Ю.В. Зубков**Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Поставлена проблема изучения динамических режимов работы вентильного генератора совмещенного типа (ВГСТ), дано математическое описание генератора, предназначенного для использования в качестве автономного источника малой мощности. На основе уравнений обобщенной электрической машины в осях d - q , связанных с индуктором, получены дифференциальные уравнения ВГСТ, а затем выполнены координатные преобразования для возбудителя и генератора. Разработана имитационная модель, учитывающая явление насыщения магнитопровода ВГСТ разнополюсными магнитными полями, работу генератора на выпрямительную нагрузку параллельно с аккумуляторной батареей. Учет насыщения осуществляется посредством ввода в модель характеристик холостого хода генератора и короткого замыкания возбудителя. Для реализации регулирования выходного напряжения и улучшения его качества в модель включены релейный регулятор напряжения и сглаживающий фильтр. Исследованы переходные режимы работы ВГСТ, в частности наброс и сброс нагрузки, включение возбуждения в разомкнутой системе. В результате анализа кривых тока и напряжения ВГСТ показано, что применение фильтра позволяет уменьшить пульсации до допустимого уровня, а генератор обладает хорошим быстродействием и оперативно реагирует на воздействия по каналам управления (возбуждения) и возмущения (нагрузки).

Ключевые слова: вентильный генератор, магнитное и электрическое совмещение, математическая модель, переходные режимы.

В автономных системах электроснабжения постоянного тока, широко используемых в авиации, автомобильном и железнодорожном транспорте, для обеспечения бесконтактного преобразования энергии находят применение синхронные генераторы, выполненные по каскадной схеме и работающие на выпрямительную нагрузку [1]. Параллельно генератору подключается аккумуляторная батарея, служащая источником первичной мощности возбуждения и накопителем энергии. Поскольку бортовые системы электроснабжения постоянного тока имеют небольшую мощность, возникает смысл объединить составляющие каскадной схемы – возбудитель (СВ) и главный генератор (СГ) – магнитно и электрически, что позволяет уменьшить габариты, расход электротехнической стали и обмоточного провода. Такие генераторы называются совмещенными, или вентильными генераторами совмещенного типа (ВГСТ) [2].

К настоящему времени данный класс электромеханических преобразователей достаточно широко изучен применительно к машинам большой и средней мощности. Рассмотрены схемные решения, обеспечивающие исключение щеточного контакта из процесса преобразования мощности, сформулированы условия бесконфликтного существования разнополюсных магнитных полей в общем маг-

Юрий Валентинович Зубков (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Электромеханика и автомобильное электрооборудование».

нитопроводе, предложены различные способы регулирования выходного напряжения генератора и варианты регуляторов напряжения, созданы неуправляемые и управляемые вентили, работающие при высокой температуре (до 300 °С) и частоте изменения тока, реализованы методы бесщеточного возбуждения синхронных генераторов на основе магнитного и электрического совмещения [3].

Однако поведение ВГСТ в совокупности с системой стабилизации напряжения в динамических режимах работы при резких изменениях нагрузки с учетом эффекта насыщения магнитопровода двумя разнополюсными полями и влияния первичного привода требует более тщательного изучения.

Бортовая система электроснабжения постоянного тока включает первичный двигатель, бесконтактный генератор, фильтр, регулятор напряжения и аккумуляторную батарею (рис. 1).

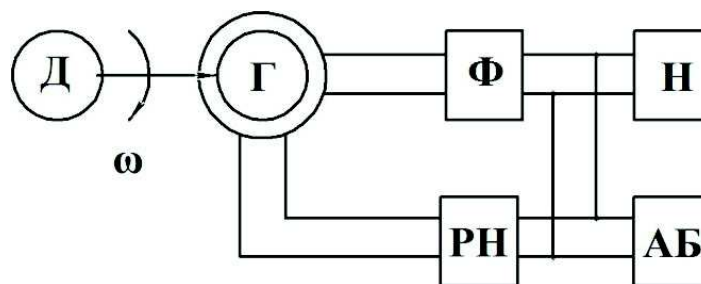


Рис. 1. Функциональная схема бортовой системы электроснабжения:
 Д – первичный двигатель; Г – ВГСТ; Ф – фильтр; Н – бортовая нагрузка;
 РН – регулятор напряжения; АБ – аккумуляторная батарея

ВГСТ как объект автоматического управления представляет собой сложную динамическую структуру, описываемую системой нелинейных дифференциальных уравнений высокого порядка. В задачах управления любой синхронной машиной можно использовать упрощенные линеаризованные варианты динамических моделей, но они дают лишь приближенное представление о поведении машины.

Наиболее эффективным способом получения решения является компьютерное моделирование.

При анализе работы генератора совмещенного типа в электромеханической системе применим традиционный подход, при котором электромеханический преобразователь моделируется системой магнитосвязанных контуров с сосредоточенными параметрами. Поскольку в общем магнитопроводе размещены две машины – синхронный возбудитель и синхронный генератор, уравнения, описывающие работу ВГСТ, являются уравнениями каскада двух электромеханических преобразователей, параметры которых определяются с учетом взаимного влияния разнополюсных магнитных полей в участках магнитопровода и насыщения магнитной системы.

Дифференциальные уравнения, описывающие ВГСТ, имеют в общем случае переменные коэффициенты. Для перехода к уравнениям с постоянными коэффициентами запишем уравнения в системе координат, жестко связанной с индуктором, а затем выполним координатные преобразования (рис. 2).

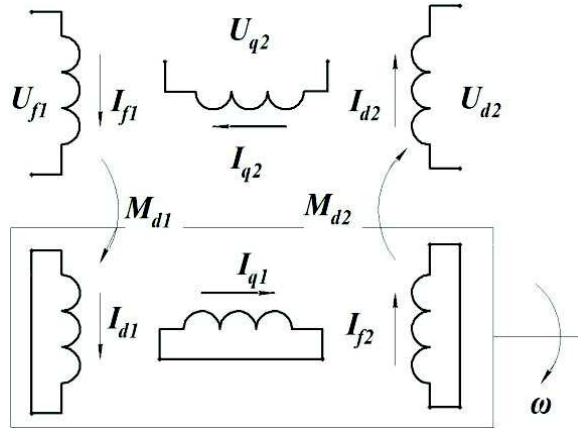


Рис. 2. Схема замещения ВГСТ в системе координат $d - q$

Уравнения возбuditеля в осях $d - q$, неподвижных относительно статора:

$$\begin{aligned}
 0 &= r_r i_{d1} + \frac{d\psi_{d1}}{dt} + p_1 \omega \psi_{q1}; \\
 0 &= r_r i_{q1} + \frac{d\psi_{q1}}{dt} - p_1 \omega \psi_{d1}; \\
 u_{f1} &= r_{f1} i_{f1} + \frac{d\psi_{f1}}{dt}.
 \end{aligned} \tag{1}$$

Уравнения генератора в осях $d - q$, вращающихся синхронно с ротором:

$$\begin{aligned}
 u_{d2} &= r_s i_{d2} + \frac{d\psi_{d2}}{dt} - p_2 \omega \psi_{q2} \\
 u_{q2} &= r_s i_{q2} + \frac{d\psi_{q2}}{dt} + p_2 \omega \psi_{d2} \\
 0 &= r_{f2} i_{f2} + \frac{d\psi_{f2}}{dt}
 \end{aligned} \tag{2}$$

В уравнениях (1), (2) индексы «1» относятся к напряжениям, токам, потоко- сцеплениям, параметрам возбuditеля, «2» – к параметрам генератора. Нули в левых частях выражений (1, 2) указывают на режим работы первого каскада (СВ) – «короткое замыкание».

Потоко- сцепления:

$$\begin{aligned}
 \psi_{d1(2)} &= L_{d1(2)} i_{d1(2)} + M_{d1(2)} i_{f1(2)} \\
 \psi_{q1(2)} &= L_{q1(2)} i_{q1(2)} \\
 \psi_{f1(2)} &= L_{f1(2)} i_{f1(2)} + M_{d1(2)} i_{d1(2)}
 \end{aligned}$$

Электромагнитный момент и уравнение динамики:

$$M_e = p_2(i_{q2}\Psi_{d2} - i_{d2}\Psi_{q2})$$

$$M = M_e + J \frac{d\omega}{dt}$$

где M – момент сопротивления на валу ВГСТ;
 J – момент инерции вращающихся частей (генератора и приводного двигателя);
 p_2 – число пар полюсов генератора;
 ω – угловая частота вращения ротора.

В общем случае m -фазного возбудителя и n -фазного генератора напряжения и токи в собственных осях и осях d , q связаны следующими уравнениями:

$$i_{d1} = \frac{2}{m} \left[i_a \cos \vartheta + i_b \cos \left(\vartheta - \frac{2\pi}{m} \right) + \dots + i_m \cos \left(\vartheta - \frac{2\pi(m-1)}{m} \right) \right]$$

$$i_{q1} = \frac{2}{m} \left[i_a \sin \vartheta + i_b \sin \left(\vartheta - \frac{2\pi}{m} \right) + \dots + i_m \sin \left(\vartheta - \frac{2\pi(m-1)}{m} \right) \right]$$

Обратное преобразование:

$$u_{d2} = u_{d1} \cos \vartheta - u_{q1} \sin \vartheta$$

$$u_{b2} = u_{d1} \cos \left(\vartheta - \frac{2\pi}{n} \right) - u_{q1} \sin \left(\vartheta - \frac{2\pi}{n} \right)$$

.....

$$u_{n2} = u_{d1} \cos \left(\vartheta - \frac{2\pi(n-1)}{n} \right) - u_{q1} \sin \left(\vartheta - \frac{2\pi(n-1)}{n} \right)$$

Потокоцепления, входящие в уравнения (1), (2), зависят от насыщения стали магнитопровода ВГСТ и не остаются постоянными при изменении режима работы. Так как в силу несимметрии магнитной цепи проводимость магнитного потока генератора неодинакова по продольной и поперечной осям, поперечная составляющая магнитного потока, которая замыкается в основном по воздуху, мало зависит от насыщения стали. Продольная составляющая потока замыкается по оси полюсов и, следовательно, существенно зависит от насыщения. Кроме того, состояние магнитной цепи ВГСТ определяется совместным действием двух разнополюсных магнитных полей, что также сказывается на потокоцеплениях возбудителя и генератора при моделировании.

Для учета насыщения используем зависимости ЭДС генератора от постоянной составляющей тока ротора $E_{oG} = f(I_{R=})$ и тока ротора от тока возбуждения возбудителя $I_R = f(I_f)$, полученные опытным или расчетным путем. Расчетное определение параметров ВГСТ заключается в решении серии задач магнитостатики и нахождении зависимостей собственных и взаимных индуктивностей обмоток от совместного действия магнитных полей возбудителя и генератора различной интенсивности в общем сердечнике.

Эта задача решена посредством численного моделирования магнитного поля ВГСТ методом конечных элементов [4].

Для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения в модель введен

R-C-фильтр. Стабилизация выходного напряжения ВГСТ осуществляется с помощью релейного регулятора напряжения.

На компьютерной модели (рис. 3) были исследованы переходные режимы работы ВГСТ, в частности наброс и сброс нагрузки, включение возбуждения в разомкнутой системе.

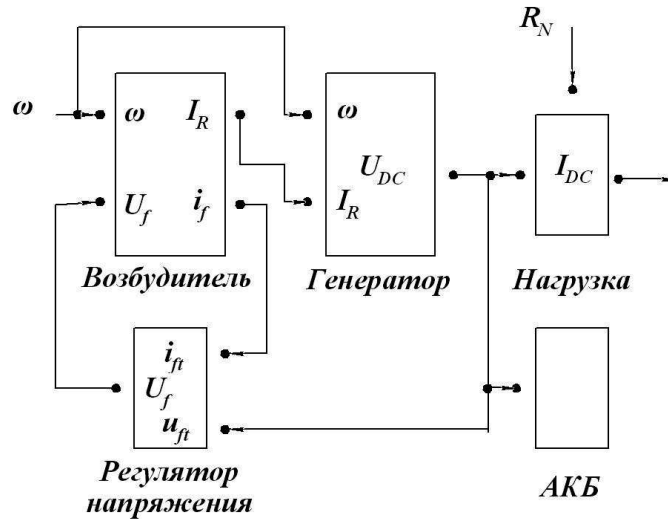


Рис. 3. Модель ВГСТ

Параметры генератора: $R_f = 50$ Ом; $R_R = 3,05$ Ом; $R_S = 0,37$ Ом; $L_f = 0,8274$ Гн, $L_R = 0,055$ Гн, $L_S = 0,004$ Гн, $M_{01} = 0,1399$ Гн, $M_{02} = 0,01$ Гн.

На рис. 4 приведены осциллограммы переходного процесса включения генератора на номинальное напряжение возбуждения 28 В на холостом ходу. В момент времени $t = 0,005$ с происходит наброс номинальной нагрузки. На рис. 5 показано изменение тока в электрически совмещенной обмотке ротора.

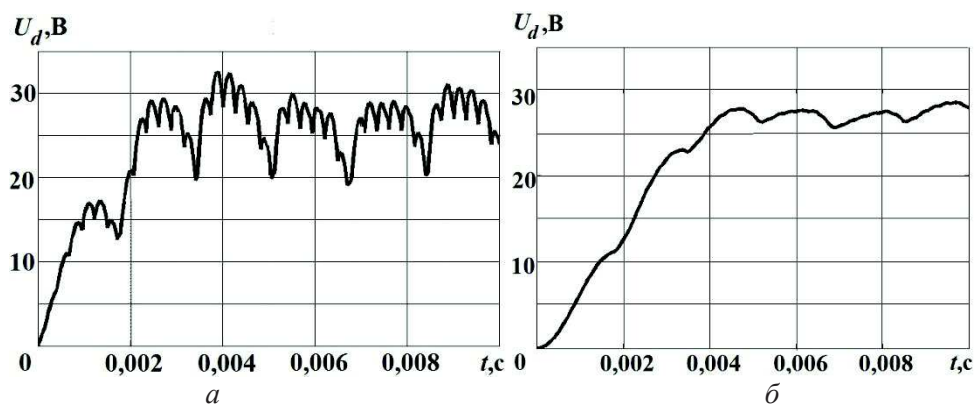


Рис. 4. Выходное напряжение ВГСТ:
а – до фильтра; б – после фильтра

Анализ данных моделирования показывает, что выходное напряжение ВГСТ содержит существенные пульсации, для устранения которых необходим выходной сглаживающий фильтр. После фильтрации коэффициент пульсаций выпрям-

ленного напряжения не превышает 2,5 %, что удовлетворяет большинство потребителей.

При включении возбуждения время нарастания напряжения до номинального значения не превышает 4 мс, что указывает на хорошее быстродействие по управляющему воздействию.

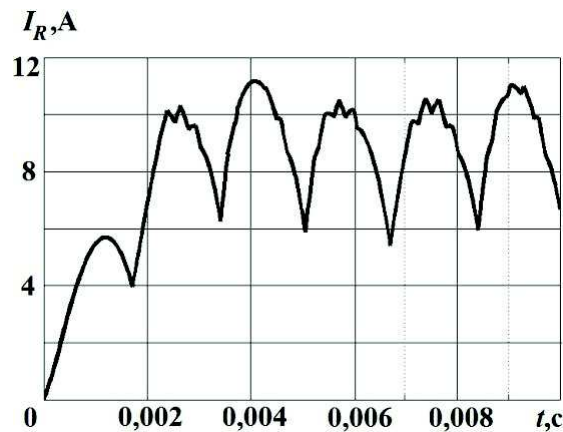


Рис. 5. Ток ротора

При набросе нагрузки наблюдается незначительный провал выходного напряжения, который отрабатывается регулятором по цепи возбуждения возбуждителя за 3 мс.

Высокочастотные пульсации, вызываемые модуляцией напряжения в РН, в кривой выходного напряжения не наблюдаются, что объясняется демпфирующим действием магнитопровода на высшие гармонические магнитного поля.

Вывод

В кривой выпрямленного напряжения ВГСТ содержатся недопустимо большие высшие гармонические. Применение сглаживающего фильтра позволяет уменьшить пульсации до приемлемого уровня. Генератор обладает хорошим быстродействием и оперативно реагирует на воздействия по каналам управления (возбуждения) и возмущения (нагрузки). Регулятор напряжения поддерживает при этом стабильное выходное напряжение.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бут Д.А. Бесконтактные электрические машины. – М.: Высшая школа, 1990. – 416 с.
2. Высоцкий В.Е., Зубков Ю.В., Тулупов П.В. Математическое моделирование и оптимальное проектирование вентильных электрических машин. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 340 с.
3. Пластун А.Т. Совмещенные возбуждающие устройства с радиальной асимметрией магнитной системы. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 440 с.
4. Зубков Ю.В. Расчет магнитного поля вентильного генератора совмещенного типа // Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии: Тр. 4-й Междунар. науч.-техн. конф., ч. 1. – Тольятти, 2012. – С. 40-46.
5. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – 1-е изд. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 288 с.

Статья поступила в редакцию 14 апреля 2015 г.

SIMULATION OF A COMBINED RECTIFIER-LOADED GENERATOR

Yu. V. Zubkov

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

The problem of studying the dynamic modes of a combined rectifier-loaded generator (CRLG) is stated. The mathematical description of a generator to be used as an independent low-power source is given. The CRLG differential equation based on the equations of a generalized electric machine in the dq axes, which are associated with an inductor, are obtained, and then the coordinate transformations for the exciter and generator are done. A simulation model taking into account the saturation of the CRLG magnetic circuit with opposite-poles magnetic fields, the generator's work for the rectifier load together with the battery is developed. The saturation calculation is done by input into the model the parameters of the generator's idling and the exciter's short-circuit. A relay voltage regulator and a smoothing filter are included into the model to control the input voltage and to improve it. The CRLG transient modes, in particular load surge and shedding, and switching on the excitation in an open system, are examined. The analysis of the current and voltage waveforms has shown that using a filter reduces the ripple to an acceptable level, and the generator is quick to respond to the impact through the control (excitation) and disturbance (load) channels.

Keywords: *rectifier generator, electric and magnetic combination, mathematical model, transient modes.*

Yuri V. Zubkov (Ph.D.(Techn.)), Associate professor.