

DOI: 10.17516/1999-494X-0212

УДК 621.313.322:621.3.012.1

Research of Dynamics of Gated-Electrical Processes in Simulink

**Konstantin S. Fediy,
Evgeny A. Spirin and Nikolay E. Poloshkov***
*Siberian Federal University
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 28.03.2019, received in revised form 16.08.2019, accepted 21.02.2020

Abstract. Recent advances in the field of electrical engineering, semiconductor and converter technology, have led to introduction of a new class of electric machines, operating in a wide range of rotational velocities, which are called gate. These machines make it possible to build stand-alone power supplies on their basis, to ensure the generation of high power with minimum drive unit requirements.

A mathematical model of the mechanical synchronous generator with voltage stabilization when changing the drive shaft rotational velocity in a wide range have been implemented in MatLab Simulink package composed of specialist electrical block library. The modeling process in MatLab Simulink functions as a construction scheme of the standard block device package and configure of its individual elements.

Obtained results concerning simulation of a gate generator with voltage stabilization based on the example of 32 pole machine with 1 kW showed good ability to generate high electric power over a wide rotational velocity range (90 to 187.5 rpm). Operated intermediate converters are able to maintain the stability of the voltage value at the variable rotational velocity that results in required operation for stand-alone power supplies.

Keywords: gate generator, end design, voltage regulator, inverter, stand-alone power supplies.

Citation: Fediy K.S., Spirin E.A., Poloshkov N.E. Research of dynamics of gated-electrical processes in simulink, J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2020, 13(2), 156-161. DOI: 10.17516/1999-494X-0212

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

* Corresponding author E-mail address: fediy_k@mail.ru

Исследование динамики электрических процессов вентильного генератора в Simulink

К.С. Федий, Е.А. Спирин, Н.Е. Полошков
Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, Красноярск

Аннотация. Современные достижения в области электромашиностроения, полупроводниковой и преобразовательной техники привели к появлению нового класса электрических машин, работающих в широком диапазоне частот вращения, которые получили название вентильных. Эти машины позволяют строить на их основе автономные источники электропитания, обеспечивающие генерирование высококачественной электроэнергии при минимальных требованиях к приводному устройству.

Математическая модель торцевого синхронного генератора со стабилизацией напряжения при изменении частоты вращения приводного вала в широком диапазоне реализована в пакете MatLab Simulink, имеющем в своем составе специализированную электротехническую библиотеку блоков. Процесс моделирования в MatLab Simulink представляет собой построение схемы устройства из стандартных блоков пакета и задание параметров ее отдельных элементов.

Полученные результаты моделирования вентильного генератора со стабилизацией напряжения на примере 32-полюсной машины мощностью 1 кВт показали хорошую способность генерировать высококачественную электроэнергию в широком диапазоне скоростей вращения (от 90 до 187,5 об/мин). Используемые промежуточные преобразователи способны поддерживать постоянство величины напряжения при переменной частоте вращения, обеспечивая необходимую производительность для автономных источников питания.

Ключевые слова: вентильный генератор, торцевая конструкция, стабилизатор напряжения, инвертор, автономные источники питания.

Цитирование: Федий, К.С. Исследование динамики электрических процессов вентильного генератора в Simulink / К.С. Федий, Е.А. Спирин, Н.Е. Полошков // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2020. 13(2). С. 156-161. DOI: 10.17516/1999-494X-0212

Возрастающий интерес к нетрадиционным источникам энергии сдерживается техническими и экономическими факторами. Исследования показывают, что в зависимости от скорости ветра или скорости течения номинальная частота вращения приводного вала генератора может меняться в большом диапазоне оборотов в минуту. Современные достижения в области электромашиностроения, полупроводниковой и преобразовательной техники привели к появлению нового класса электрических машин, работающих в широком диапазоне частот вращения. Они получили название вентильных.

Эти машины позволяют строить на их основе автономные источники электропитания, обеспечивающие генерирование высококачественной электроэнергии при минимальных требованиях к приводному устройству [1].

С учетом накопленного опыта в разработке низкоскоростных синхронных генераторов (НТСГ) для микроГЭС становится возможным разработка торцевого вентильного генератора.

Конструкция торцевого синхронного генератора является наиболее перспективной с точки зрения обеспечения наилучших массогабаритных и энергетических показателей. Это связано с простотой конструкции, отсутствием скользящих контактов, возможностью многопакетно-

го исполнения, лучшим охлаждением активной части из-за расположения тепловыделяющих узлов вблизи периферийных поверхностей машины.

Торцевые синхронные генераторы дают существенный выигрыш по занимаемому пространству за счет приближения электрической машины к рабочему механизму. Малый осевой габарит генератора с возбуждением от постоянных магнитов дает возможность обеспечить конструктивную совместимость их с рядом механизмов, компактность и удобство эксплуатации и сборки.

Эти конструктивные решения компонентов генератора позволяют выполнять его необслуживаемым, что существенно уменьшает расходы на эксплуатационные энергоустановки в целом, повышая их конкурентоспособность [2].

Для обеспечения заданных показателей качества было использовано имитационное моделирование в пакете MatLab Simulink, которое является наиболее удобным и наглядным методом исследования процессов, происходящих в электромеханических системах. MatLab имеет в своем составе специализированную электротехническую библиотеку блоков. Процесс моделирования в Matlab Simulink представляет собой построение схемы устройства из стандартных блоков пакета и задание параметров ее отдельных элементов.

Номинальные данные генератора, на основе которого проводилось исследование, представлены в табл. 1.

Основными компонентами вентильного генератора являются: синхронный генератор переменного тока на постоянных магнитах, трехфазный мостовой выпрямитель и стабилизатор напряжения.

Математическая модель торцевого синхронного генератора со стабилизацией напряжения при изменении частоты вращения приводного вала в широком диапазоне, реализованная в MatLab Simulink, изображена на рис. 1.

Основным элементом модели является блок Permanent Magnet Synchronous Machine – модель синхронной машины с постоянными магнитами из электротехнической библиотеки SimPowerSystems [3]. Согласно справочной системе Simulink данный блок содержит описание системы уравнений синхронной магнитоэлектрической машины в системе координат, вращающейся синхронно с ротором.

$$\frac{d}{dt} \cdot i_d = \frac{1}{L_d} \cdot U_d - \frac{R}{L_d} \cdot i_d + \frac{L_q}{L_d} \cdot p \cdot \omega_r \cdot i_q, \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} \cdot i_q = \frac{1}{L_q} \cdot U_q - \frac{R}{L_q} \cdot i_q + \frac{L_d}{L_q} \cdot p \cdot \omega_r \cdot i_d - \frac{\lambda \cdot p \cdot \omega_r}{L_q}, \quad (2)$$

$$M_e = 1,5 \cdot p \cdot (\psi \cdot i_q + (L_d - L_q) \cdot i_d \cdot i_q), \quad (3)$$

Таблица 1

Table 1

Номинальное напряжение U_H, B	Номинальное напряжение P_H, Bm	Номинальный ток I_H, A	Число пар полюсов P	Частота вращения $n, об / мин$
220	1000	1.894	16	187.5

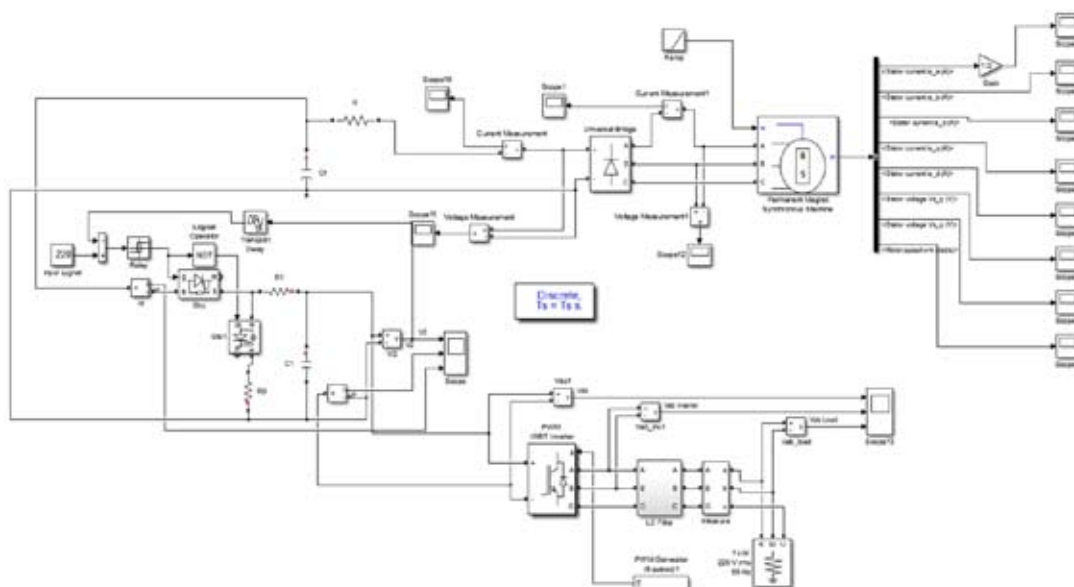


Рис. 1. Структурная схема модели торцевого синхронного генератора со стабилизацией напряжения

Fig. 1. Block diagram of a model of an end synchronous generator with voltage stabilization

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} \cdot (M_m - F \cdot \omega - M_e), \quad (4)$$

где i_d, i_q – проекции тока статора на осях системы координат, А; U_d, U_q – проекции напряжения, подводимого к статору на осях системы координат, В; L_d, L_q – индуктивности синхронной машины по продольной и поперечной осям, Гн; R – активное сопротивление фазы статора, Ом; p – число пар полюсов; ω – частота вращения ротора, рад/с; ψ – потокосцепление фазы статора, Вб; M_m – механический момент на валу генератора, Н·м; F – коэффициент, определяющий трение в подшипниковых опорах генератора, Н·м·с; J – момент инерции ротора генератора, кг·м²; M_e – электромагнитный момент генератора, Н·м.

Переход к трехфазной системе координат осуществляют по следующим уравнениям:

$$u_A = u_d \cdot \sin(\omega \cdot t) + u_q \cdot \cos(\omega \cdot t), \quad (5)$$

$$u_B = u_d \cdot \sin(\omega \cdot t - \frac{2\pi}{3}) + u_q \cdot \cos(\omega \cdot t - \frac{2\pi}{3}), \quad (6)$$

$$u_C = u_d \cdot \sin(\omega \cdot t + \frac{2\pi}{3}) + u_q \cdot \cos(\omega \cdot t + \frac{2\pi}{3}). \quad (7)$$

Порты А, В и С – выводы статорной обмотки машины.

При реализации генераторного режима блока Permanent Magnet Synchronous Machine возникает проблема задания частоты вращения привода генератора, так как изначально в блоке предполагается задание вращающего момента. В модели эта проблема решена с помощью блока линейно изменяющегося воздействия Ramp, подающего на входной порт W сигнал, соответствующий изменению скорости вращения генератора от 0 до 187,5 об/мин, что соответствует 32-полюсной машине.

Далее полученное переменное напряжение выпрямляется трехфазным мостовым выпрямителем (схема Ларионова) и подается на импульсный регулятор – стабилизатор напряжения на GTO тиристорах (рис. 2). Величина среднего значения напряжения задается на входе гистерезисного регулятора (Relay) и может поддерживаться постоянной, когда схема используется в качестве стабилизатора, или может изменяться для регулирования напряжения (тока) нагрузки. На рис. 3 представлены графики напряжения нагрузки, тока нагрузки и тока в цепи питания на выходе стабилизатора.

Постоянное напряжение со стабилизатора напряжения сглаживается LC-фильтром и поступает на мост, собранный на IGBT-транзисторах. Мост представляет собой инвертор, использующий широтно-импульсную модуляцию для формирования синусоидального напряжения 220 В и частотой 50 Гц (рис. 4).

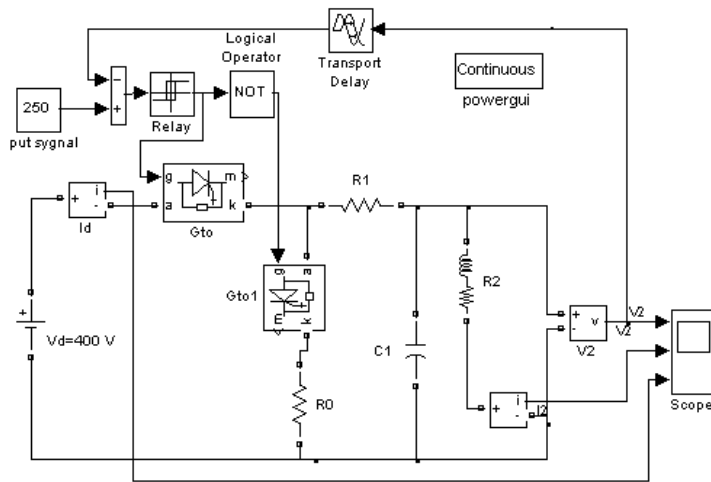


Рис. 2. Модель стабилизатора напряжения

Fig. 2. Voltage stabilizer model

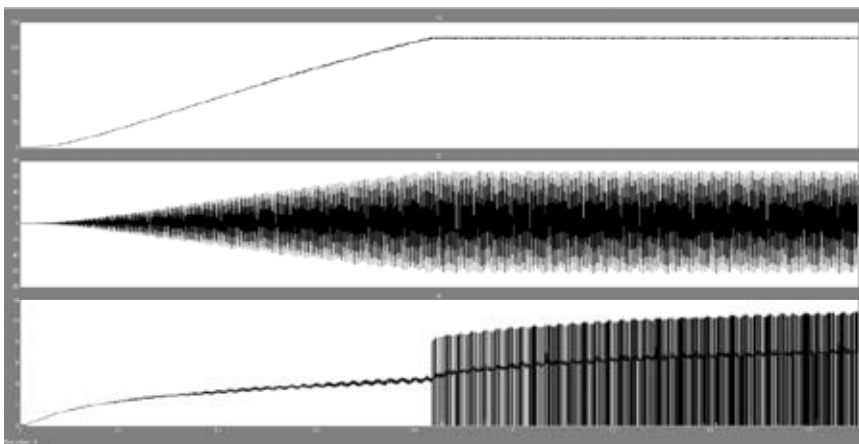


Рис. 3. Графики напряжения нагрузки, тока нагрузки и тока в цепи питания

Fig. 3. Graphs of load voltage, load current, and current in the power supply circuit

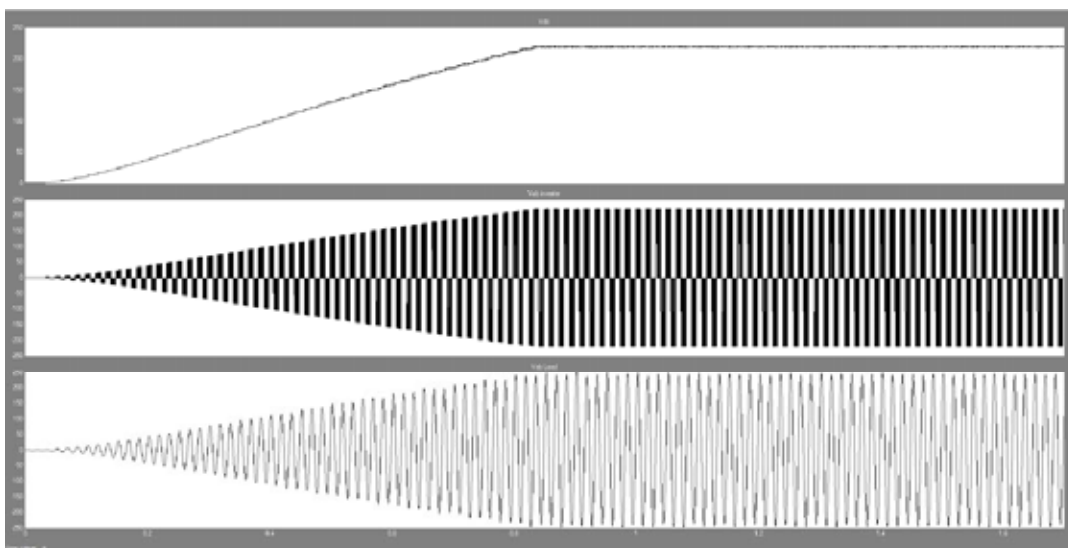


Рис. 4. Графики напряжения нагрузки, тока нагрузки и тока в цепи питания

Fig. 4. Graphs of load voltage, load current, and current in the power supply circuit

В момент времени с 0 до 0,8 с происходит пуск и разгон генератора до минимально допустимых оборотов (90 об/мин), необходимых для получения удовлетворяющего качества напряжения. Результаты моделирования вентильного генератора со стабилизацией напряжения на примере 32-полюсной машины мощностью 1 кВт показали хорошую способность генерировать высококачественную электроэнергию в широком диапазоне скоростей вращения (от 90 до 187,5 об/мин). Используемые промежуточные преобразователи способны поддерживать постоянство величины напряжения, при переменной частоте вращения обеспечивая необходимую производительность для автономных источников питания.

Список литературы / References

[1] Аракелян А.К., Афанасьев А.А. *Вентильные электрические машины и регулируемый электропривод*. В 2 кн. Кн. 1. Вентильные электрические машины. М.: Энергоатомиздат, 1997. 509 с. [Arakelyan A.K., Afanasyev A.A. *Ventilnie Valve electric machines and electric adjustment*. In 2 V. Book 1. Valve electrical machines. M., Energoatomisdat, 1997. 509 p. (in Russ.)]

[2] Встовский А.Л. и др. Современные технологии проектирования низкоскоростного синхронного генератора для свободнопоточной микроГЭС. *Инновационное развитие регионов Сибири*. Сб. ст. научно-практической конференции. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2005. С. 27-33 [Vstovskii A.L. et al. Modern technologies of designing low-speed synchronous generator for svobodnopotochnoy micro hydro. *Innovative Development of Siberia*. Sat. Art. Scientific-practical conference.– Krasnoyarsk: CPI KSTU, 2005. P. 27-33 (in Russ.)]

[3] Герман-Галкин С.Г. *MatLab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК*. СПб.: Корона – Век, 2008. 368 с. [Herman-Galkin S.G. *MatLab & Simulink. Designing mechatronic systems on a PC*. SPb., The Crown – Century, 2008. 368 p. (in Russ.)]