

УДК 621.314:621.382:621.314.572

**МЕХАТРОННЫЕ СИСТЕМЫ ГЕНЕРИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ
НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН С САМОВОЗБУЖДЕНИЕМ**

А.Г.Гарганеев¹, докт.техн.наук, **С.А.Харитонов²**, докт.техн.наук

¹ – Национальный исследовательский томский политехнический университет,
пр. Ленина, 30, Томск, 634050, Россия,

² – Новосибирский государственный технический университет,
пр. Карла Маркса, 20, Новосибирск, 630064, Россия. E-mail: kharit@yandex.ru

Рассмотрены принципы генерирования электроэнергии в автономных системах электроснабжения на основе электрических машин с самовозбуждением. Проведен анализ условий функционирования систем электроснабжения для летательных аппаратов. Выявлены достоинства и недостатки синхронных генераторов с постоянными магнитами. Показана общность процессов самовозбуждения в электрических машинах постоянного тока, асинхронных и синхронно-гистерезисных. Показана возможность построения самовозбуждающихся систем генерирования с полупроводниковыми преобразователями. Библиограф. 8, рис. 2.

Работа выполнена по государственному контракту № 13.G36.31.0010 от 22.10.2010 г.

Ключевые слова: полупроводниковый преобразователь, генератор, самовозбуждение.

В подавляющем большинстве случаев генерация электроэнергии осуществляется с помощью электрических машин постоянного и переменного тока. Наиболее распространенными промышленными системами генерирования электроэнергии (СГЭЭ) являются системы на основе синхронных генераторов (СГ), диапазон мощностей которых достаточно широк.

Специфика автономных СГЭЭ, в частности, для летательных аппаратов (ЛА), заключается в условиях применения, характеризующихся широким диапазоном температур; разреженностью атмосферы; большими механическими перегрузками; соизмеримостью мощности генератора и потребителя; переменной частотой вращения авиадвигателя; работой при электрических перегрузках; безопасностью электрической машины при возникновении короткого замыкания нагрузки [5].

В настоящее время СГЭЭ на основе генераторов постоянного тока (ГПТ) уступают свое место системам на основе машин переменного тока, прежде всего, ввиду наличия ненадежного искрящего конструктивного элемента – щеточно-коллекторного узла, особенно плохо работающего в условиях разреженности атмосферы. СГЭЭ на основе СГ с постоянными магнитами (ПМ) на сегодняшний день являются наиболее востребованными и энергетически выгодными системами бортового электрооборудования. Исследованиям СГЭЭ на основе СГ с постоянными магнитами (СГПМ) при использовании в качестве преобразовательно-регулирующих устройств полупроводниковых преобразователей посвящен ряд работ [3, 4, 8]. Однако при всей своей привлекательности СГЭЭ на основе СГПМ имеют и ряд недостатков, основными из которых являются: низкая механическая прочность постоянных магнитов; их старение и возможность размагничивания при высоких температурах; высокая стоимость ПМ, а также сложность организации защит от короткого замыкания, прежде всего, ввиду большого запаса электромагнитной энергии во вращающемся роторе. В аварийных ситуациях ЛА «неисчезаемый» запас электромагнитной энергии ротора потенциально опасен.

Альтернативой СГЭЭ с СГПМ является применение систем генерации на основе электрических машин с самовозбуждением – асинхронных и синхронно-гистерезисных генераторов (АГ и СГГ). Если системы генерации с АГ известны [1], то системы с СГГ ранее никем не рассматривались, поэтому авторами данной статьи фактически предлагается новое техническое решение.

С точки зрения теории автоматического управления режим самогенерации в электрических машинах различной конструкции аналогичен.

На рис. 1 и 2 показаны структурные схемы ГПТ и АГ с самовозбуждением. Согласно схеме ГПТ наличие остаточного магнитного потока $\Phi_{ост}$ приводит при вращении якоря к возникновению ЭДС E_r на выходе генератора. В обмотке возбуждения с числом витков n_b , представленной апериодическим звеном $k_b/(1+T_bP)$, возникает ток возбуждения, который создает МДС F и соответствующий магнитный поток. Таким образом, образуется контур положительной обратной связи по магнитному потоку, способствующий

процессу самовозбуждения. Амплитуда потока и ЭДС ограничивается за счет нелинейности характеристики намагничивания $\Phi(F)$. Как и в схемах с самовозбуждением представленный процесс характеризуется балансом фаз и амплитуд. Что касается баланса амплитуд, то он выполняется при петлевом коэффициенте усиления, равном единице и может быть получен из выражений общей передаточной функции системы. Баланс фаз в ГПТ фактически отсутствует, так как коллектор, выполняющий функцию «модулятора-демодулятора», превращает переменный в якоре магнитный поток в постоянный.

В схеме АГ происходит фактически тот же процесс, что и в схеме ГПТ. Однако для выполнения баланса амплитуд в статорной цепи переменного тока необходимо получить емкостную составляющую тока I_C после блока дифференцирования, которая в цепи ротора «поддержит» развитие магнитного потока. Известно, что в АГ емкостную составляющую получают за счет батареи конденсаторов.

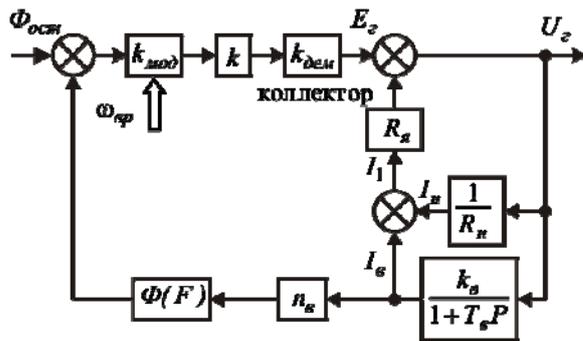


Рис. 1

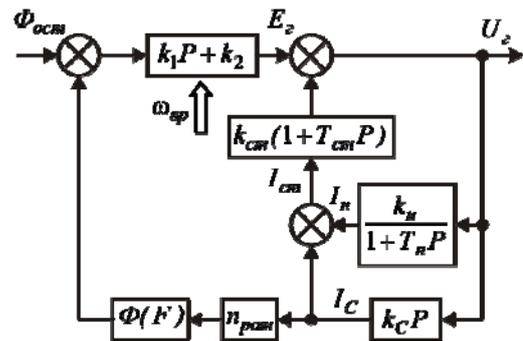


Рис. 2

Представленные схемы позволяют получить известные в теории электрических машин условия самовозбуждения, однако, с позиций теории автоматического управления.

Желание устранить в схеме ГПТ коллектор приводит к необходимости перейти к обращенной конструкции электрической машины, применив в неподвижной относительно наблюдателя цепи якоря полупроводниковый коммутатор (инвертор), как и в бесконтактном двигателе постоянного тока. Однако процесс самовозбуждения в этом случае может развиваться лишь в случае магнитной «податливости» материала ротора, а единственным типом электрических машин с таким материалом является гистерезисная машина с ротором, например, из викаллой [6]. В этом случае процесс самовозбуждения аналогичен процессу в АГ при фиктивном числе витков ротора $n_{рот}$.

Необходимость регулировки выходного напряжения АГ и СГГ при изменении нагрузки как по величине, так и по характеру приводит к идее применения в СГЭЭ в качестве поставщика и регулятора емкостного тока полупроводникового преобразователя (ПП), способного работать в режиме инвертора или активного выпрямителя.

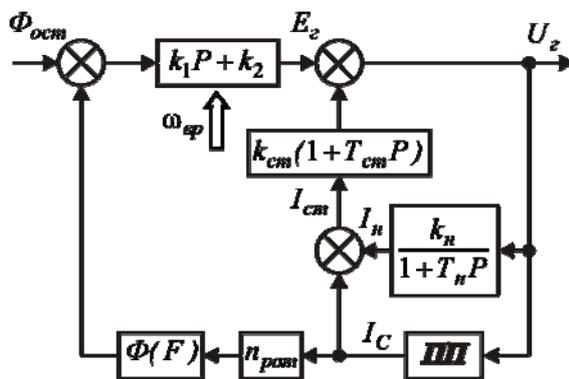


Рис. 3

На рис. 3 показана схема мехатронной СГЭЭ переменного тока. Согласно представленной схеме ПП образует необходимый уровень емкостного тока, поддерживающий процесс самовозбуждения в диапазоне регулирования. Для СГГ в ПП предусмотрено наличие устройства импульсного подмагничивания ротора, как это используется у синхронно-гистерезисных двигателей [2]. При возникновении аварийных ситуаций, приводящих к перегрузке СГЭЭ, процесс самогенерации автоматически прекращается («срыв генерации»), не приводя к катастрофическим последствиям.

Таким образом, изменение скорости приводного первичного двигателя, а также нагрузки по величине и характеру приводят к необходимости применения в автономных СГЭЭ полупроводниковых преобразователей, превращая СГЭЭ в мехатронную систему. Мехатронные СГЭЭ на основе АГ и СГГ могут составить альтернативу дорогостоящим системам с СГПМ. Представляется интересным и перспективным исследование и создание СГЭЭ с СГГ, поскольку гистерезисные машины занимают по энер-

гетическим показателям промежуточное место между асинхронными машинами и синхронными с постоянными магнитами, обладая свойствами самовозбуждения.

1. Вольдек А.И. Электрические машины. – Ленинград: Энергия, 1974. – 840 с.
2. Гарганеев А.Г., Брованов С.В., Харитонов С.А. Мехатронные системы с синхронно-гистерезисными двигателями. – Томск: Из-во Томского политехнического университета, 2012. – 227 с.
3. Гарганеев А.Г., Харитонов С.А. Коэффициент полезного действия мехатронной системы генерирования электрической энергии постоянного тока // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 319. – №4. – С. 139–143.
4. Гарганеев А.Г., Харитонов С.А. Перспективные системы электроснабжения самолета с полностью электрифицированным оборудованием // Доклады Томского университета систем управления и радиоэлектроники. – 2009. – № 2(20). – С. 185–192.
5. Грузков С.А. Электрооборудование летательных аппаратов: учебник для вузов. Том 1. Системы электроснабжения летательных аппаратов. – М.: Из-во Московского энергетического института, 2005. – 568 с.
6. Делекторский Б.А., Тарасов В.Н. Управляемый гистерезисный привод. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 128 с.
7. Харитонов С.А. Электромагнитные процессы в системах генерирования электрической энергии автономных объектов. – Новосибирск: из-во НГТУ, 2011. – 536 с.

УДК 621.314:621.382:621.314.572

МЕХАТРОННІ СИСТЕМИ ГЕНЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ОСНОВІ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН ІЗ САМОЗБУДЖЕННЯМ

О.Г.Гарганеев¹, докт.техн.наук, С.О.Харитонов², докт.техн.наук

¹ – Національний дослідницький томський політехнічний університет,
пр. Леніна, 30, Томськ, 634050, Росія;

² – Новосибірський державний технічний університет,
пр. Карла Маркса, 20, Новосибірськ, 630064, Росія. E-mail: kharit@yandex.ru

Розглянуто принципи генерування електроенергії у автономних системах електропостачання на основі електричних машин із самозбудженням. Проведено аналіз умов функціонування систем електропостачання для літаючих апаратів. Виявлено переваги та недоліки синхронних генераторів з постійними магнітами. Показано спільність процесів самозбудження в електричних машинах постійного струму, асинхронних та синхронно-гістерезисних. Наведено структурні схеми, що ілюструють з позицій теорії автоматичного управління аналогічність процесів самозбудження в генераторі постійного струму, асинхронному та синхронно-гістерезисному генераторах. Показано можливість побудови систем генерування з напівпровідниковими перетворювачами, що самозбуджуються. Бібл. 8, рис. 2.

Роботу виконано згідно з Державним контрактом №13.G36.31.0010 від 22.10.2010 р.

Ключові слова: напівпровідниковий перетворювач, генератор, самозбудження.

AUTONOMOUS ELECTRIC POWER GENERATION SYSTEM BASED ON SELF-EXCITED ELECTRICAL MACHINE

A.G.Garganeev¹, S.A.Kharitonov²

¹ – National Research Tomsk Polytechnic University
Lenin av., 30, 634050, Tomsk, Russia,

² – Novosibirsk State Technical University,
Karla Marksa av., 20, Novosibirsk, 630092, Russia. E-mail: kharit@yandex.ru

Principles of electric power generation by power supply systems based on self-excited electrical machines are presented in this paper. Functioning conditions of aircraft power supply systems were analyzed. Advantages and disadvantages of permanent magnet synchronous generators were revealed. Similarity of self-exciting processes in DC electrical machines – induction and hysteresis synchronous ones – is revealed. Block diagrams that show similarity of self-exciting processes in DC generator – induction and hysteresis synchronous ones – from the automatic control theory point of view are provided. It is shown that the controlled generation systems contained semiconductor converters are possible to be constructed. References 8, figures 2.

Key words: electrical machine, generator, semiconductor converter, inverter, rectifier.

1. Voldek A.I. Electrical Machines. – Leningrad: Energiia, 1974. – 840 p. (Rus)
2. Garganeev A.G., Brovanov S.V., Kharitonov S.A. Hysteresis-Synchronous Motor Mechatronic Systems. – Tomsk: Izdatel'stvo Tomskogo Polytechnicheskogo Universiteta, 2012. – 227 p. (Rus)
3. Garganeev A.G., Kharitonov S.A. Efficiency of Mechatronic System for DC Electric Power Generation // Izvestiia Tomskogo Polytechnicheskogo Universiteta. – 2010. – Vol. 319. – No. 4. – Pp. 139–143. (Rus)
4. Garganeev A.G., Kharitonov S.A. Advanced Power Supply Systems of All-Electric Aircrafts // Doklady Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta Radioelektroniki i Sistem Upravleniia. – 2009. – No. 2 (20). – Pp. 185–192. (Rus)
5. Gruzkov S.A. Electrical Equipment of Aircrafts. Vol. 1. Aircraft Power Supply Systems. – Moskva: Izdatel'stvo Moskovskogo Energeticheskogo Instituta, 2005. – 568 p. (Rus)
6. Delektorskii B.A., Tarasov V.N. Controlled Hysteresis Drive. – Moskva: Energoatomizdat, 1983. – 128 p. (Rus)
7. Kharitonov S.A. Electromagnetic Processes in Power Generating Systems For Stand-Alone Unit. – Novosibirsk: Izdatel'stvo Novosibirskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta, 2011. – 536 p. (Rus)

Надійшла 25.09.2012

Received 25.09.2012