

## УСЛОВИЯ САМОВОЗБУЖДЕНИЯ АВТОНОМНЫХ СИСТЕМ ГЕНЕРИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ С ПОЗИЦИИ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Д.А. Падалко

Научный руководитель: Гарганеев А.Г., д.т.н., профессор  
Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
[padalko.da@gmail.com](mailto:padalko.da@gmail.com)

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 [1].

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 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 (автономных инверторов и выпрямителей) посвящен целый ряд работ [2 – 4]. Однако при всей своей привлекательности СГЭЭ на основе СГПМ имеют и ряд недостатков, основными из которых являются:

- низкая механическая прочность постоянных магнитов;
- старение постоянных магнитов;
- возможность размагничивания при высоких температурах;
- высокая стоимость постоянных магнитов;
- сложность организации защит от короткого замыкания, прежде всего, ввиду большого запаса электромагнитной энергии во вращающемся рото-

ре. 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 [5], то системы с СГГ ранее никем не рассматривались, поэтому авторами данной статьи фактически предлагается новое техническое решение.

### Электрическая машина с самовозбуждением с позиций теории автоматического управления

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

На рис. 1 приведены 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 аperiodическим звеном  $k_b/(1+T_b p)$ , 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 якоря 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  $I_C$ , которая в цепи ротора «поддержит» развитие магнитного потока.

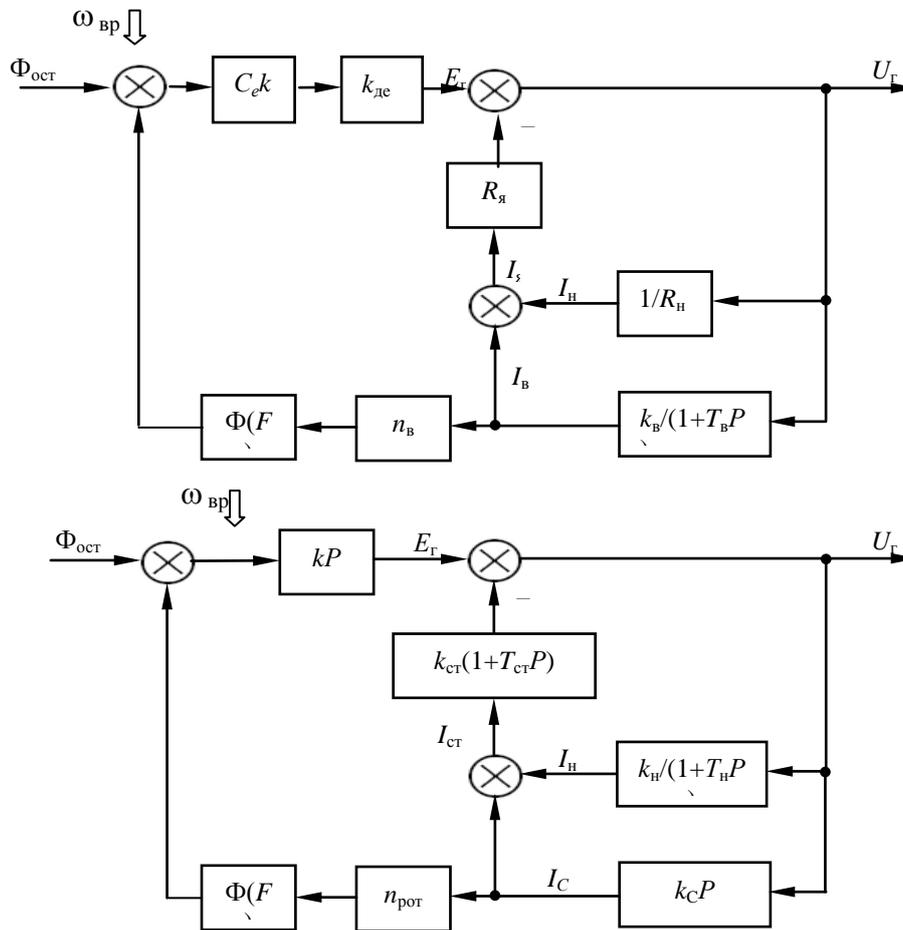


Рис. 1. Структурные схемы ГПТ и АГ, СГГ.

Представленные схемы позволят получить известные в теории электрических машин условия самовозбуждения, однако, с позиций теории автоматического управления. Вывод условий самовозбуждения возможен путем нахождения общей передаточной функции представленных схем. Ниже представлены условия полученные условия самовозбуждения для ГПТ и АГ:

$$\frac{X_{ГПТ} - R_я}{R_Б} \geq 1 + \frac{R_я}{R_н}$$

$$\frac{X_M - X_\delta}{X_C} \geq 1 + \frac{X_\delta}{Z_н}$$

Для подтверждения полученных результатов, был произведен вывод условия самовозбуждения ГПТ из уравнений равновесия напряжения обмотки возбуждения и уравнения равновесия напряжения цепи ротора.

#### Мехатронные системы с самовозбуждением электрических машин

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 регулировщика емкостного тока полупроводникового преобразователя (ПП), способного работать в режиме инвертора или активного выпрямителя.

Схему мехатронной СГЭЭ переменного тока, получим, заменив батарею конденсаторов (блок  $K_C P$ ), в структурной схеме АГ, на полупроводниковый преобразователь. Согласно этому, ПП образует необходимый уровень емкостного тока, поддерживающий процесс самовозбуждения в диапазоне регулирования. Для СГГ в ПП дополнительно предусмотрено наличие устройства импульсного подмагничивания ротора, как это используется у синхронно-гистерезисных двигателей. При возникновении аварийных ситуаций, приводящих к перегрузке СГЭЭ процесс самогенерации автоматически прекращается («срыв генерации»), не приводя к катастрофическим последствиям.

Изменение скорости первичного двигателя и нагрузки по величине приводит к необходимости применения в автономных СГЭЭ полупроводниковых преобразователей, превращая СГЭЭ в мехатронную систему. Мехатронные системы могут составить альтернативу дорогостоящим системам с постоянными магнитами. Представляется интересным исследование создания систем генерирования электроэнергии с СГГ, поскольку данные машины занимают промежуточное место между синхронными машинами с ПМ и асинхронными машинами, обладая свойством самовозбуждения