

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ



Р.А. Раенко



Т.А. Рудницкая

В статье рассмотрена математическая модель системы регулирования напряжения (СРН) синхронного генератора с постоянными магнитами, описывающая динамику движения основных элементов СРН при использовании принципа подмагничивания спинки статора генератора. Представлены принципиальная и структурная схемы СРН, получена передаточная функция системы и проведена оценка устойчивости.

Ключевые слова: синхронный генератор с постоянными магнитами, система регулирования напряжения, объект регулирования

EDN: KXNHSL

В последние годы в различных областях техники находят применение постоянные магниты (ПМ). Это объясняется широким распространением устройств, в которых применяются ПМ, разработкой новых материалов ПМ с различными характеристиками, применением новых сталей с высокой механической прочностью. Двигатели с ПМ используются в различных приводах механизмов, робототехнике, электромобилях, насосах и компрессорах, а также в других областях, где требуются высокая скорость и точность управления. Особенностью является то, что при создании магнитного поля ПМ не требуется отдельного источника питания. Синхронные генера-

торы с ПМ (СГПМ), имеют следующие преимущества: высокую надежность возбуждения и работы, простоту конструкции, высокий КПД, улучшенные выходные характеристики, малую инерционность в переходных процессах. К недостаткам СГПМ можно отнести: отсутствие регулирования напряжения из-за невозможности изменения потока возбуждения от ПМ, характеристики магнитов со временем изменяются, относительно высокая стоимость [1].

По конструктивному исполнению ротора такие генераторы делятся [1]:

- с цилиндрическим магнитом в виде кольца, намагниченным в радиальном направлении;

Раенко Роман Александрович, кандидат технических наук, младший научный сотрудник научно-исследовательского центра ФГКВОО ВО «Военная академия РВСН имени Петра Великого». Область научных интересов: системы автономного электроснабжения ракетных комплексов, исследования развития и совершенствования системы эксплуатации и технического обеспечения ракетных комплексов. Автор 20 научных работ. Имеет два патента на изобретения.

Рудницкая Татьяна Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы управления транспортной инфраструктурой» Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: логистика, управление перевозочным процессом железнодорожного транспорта. Автор 38 научных работ, в том числе двух учебников. Имеет один патент на изобретение.

Рудницкий Сергей Леонидович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрификация и электроснабжение» Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)). Область научных интересов: электротехника, электрические машины, электрические аппараты. Автор 27 научных работ, в том числе одного учебного пособия. Имеет 10 патентов на изобретения и пять патентов на полезную модель.

- типа «звездочка» с явно выраженными полюсами без полюсных башмаков и с полюсными башмаками;
- типа «звездочка» с призматическими магнитами и полюсными башмаками;
- коллекторные с призматическими магнитами и тангенциальным намагничиванием;
- когтеобразные с цилиндрическими постоянными магнитами, намагниченными в аксиальном направлении.

Кроме конструктивного признака классификации используется признак классификации синхронных генераторов (СГ) по типу схемы регулирования напряжения:

- СГ с электромагнитным регулятором с подмагничиванием трансформатором;
- СГ с регулятором в виде импульсного полупроводникового регулятора;
- СГ с компаундируемым регулятором импульсного типа;
- СГ с регулятором, использующим спинку генератора с подмагничиванием.

Из всех перечисленных конструкций специалисты отдают предпочтение СГПМ с РКП (ротор с когтеобразными полюсами). Данная конструкция позволяет использовать ПМ с высокой удельной магнитной энергией. Намагничивание РКП производится в собранном виде. Наилучшая стабилизация поля в воздушном зазоре возможна при наличии когтеобразных полюсов. Размагничивающее действие поля осуществляется медленно, магнитная индукция в воздушном зазоре РКП выше, чем в других конструкциях. Объем магнита в роторе не зависит от частоты, числа полюсов, что позволяет уменьшить геометрию ротора.

Механическая прочность РКП выше прочности других конструкций, поэтому такие роторы могут быть применимы в скоростных СГПМ.

Синхронные генераторы как источники электроэнергии переменного тока нашли широкое распространение во многих системах гарантированного электроснабжения. В нашей стране значительный вклад в разработку таких систем внесли А.И. Бертинов, Д.И. Бут, А.И. Вольдек и Б.Н. Петухов.

Анализ работы СГПМ (ротор на ПМ) показал, что в нем затруднительно регулировать выходное напряжение. Кроме того, исследования показывают, что для уменьшения габаритов СГПМ необходимо выбирать регулятор напряжения с регулирующей спинкой статора [2].

Система регулирования напряжения для такого генератора описана ниже. Анализ научно-технической литературы показал, что наиболее целесообразной конструкцией СГПМ является конструкция генератора с регулятором напряжения, использующим принцип подмагничивания спинки статора (ППСС), принципиальная схема которого изображена на рис. 1.

Система регулирования напряжения СГПМ с помощью ППСС считается самой простейшей, однако считается, что такая СРН может применяться только в системах, где регулирование напряжения находится в диапазоне $(1-5\%)U_{ном}$.

Сущность работы, указанной СРН сводится к передвижению точки перегиба на кривой намагничивания, влево (ближе к зоне насыщения) или вправо к промежуточному участку кривой намагничивания. Поскольку ток подмагничивания возникает только при работе

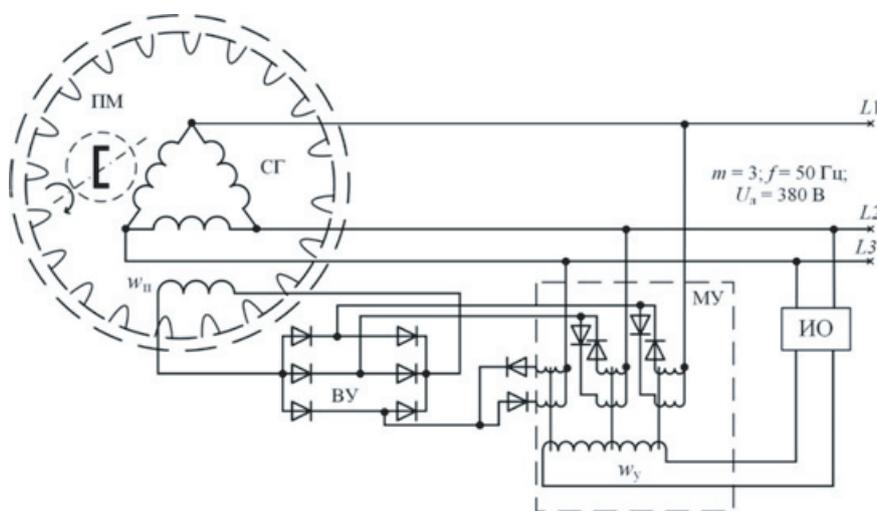


Рис. 1. Принципиальная схема регулирования напряжения СГ с подмагничиванием спинки статора

СГПМ, то и генератор часто называют самоуправляемым.

Весь регулятор содержит минимальное число элементов: ИО – измерительный орган; МУ – магнитный усилитель сигнала ИО с отрицательной и положительной обратной связями.

В выбранный СГПМ входят: ПМ ротора, статор с трехфазной обмоткой (ω_3), соединенный в треугольник, обмоткой подмагничивания (ω_n), измерительный орган ИО, промежуточный магнитный усилитель МУ с обмоткой управления ω_u , рабочими обмотками (ω_{py1} , ω_{py2} , ω_{py3}), выпрямитель ВУ, выполненный по схеме Ларионова и обмоткой постоянного тока $\omega_{пт}$.

Кроме того, в схеме МУ используются обмотки смещения ω_{c1} , ω_{c2} , ω_{c3} , выполняющие функции отрицательной обратной связи ОС, при этом цепь положительной обратной связи не показана. Измерительный орган может быть выполнен на кремниевых стабилизаторах или на дросселях (линейном или нелинейном), при этом ИО представлен отдельным усилительным звеном от которого получают питание обмотки ω_u трехфазного МУ.

Среди всех возможных СРН данная система основана на рассогласовании двух напряжений: напряжения на нагрузке и напряжения эталонного источника и ее упрощенную структурную схему можно представить в виде, изображенном на рис. 2, где представлены исполнительный орган ИСО, объект регулирования ОР, измерительный орган ИО и связи между указанными элементами.

Одной из основных характеристик СРН является точность поддержания заданной величины напряжения СГПМ.

Анализ схемы показывает, что ИО содержит чувствительный элемент ЧЭ, в качестве которого может быть использован кремниевый стабилизатор, схема сравнения напряжений сети СС и эталонного источника ЭИ.

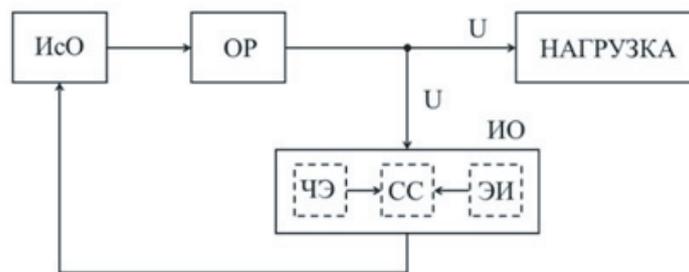


Рис. 2. Упрощенная структурная схема СРН

При отсутствии регулятора и включении нагрузки напряжение на нагрузке будет равно

$$U = U_{ном} - \Delta U_n = U_{ном} - (\Delta I_n R), \quad (1)$$

т.е. оно уменьшается на ΔU_n , поэтому задача регулятора заключается в возврате ΔU_n .

Работа регулятора по отклонению заключается в том, чтобы вернуть в схему напряжение, равное $\Delta U_{нр}$, т.е. если регулятор выполняет функцию ($\Delta U_n = \Delta U_{нр}$), то его можно назвать точным, однако если указанное правило не выполняется, то разность

$$\Delta U_0 = \Delta U_n - \Delta U_{нр}, \quad (2)$$

называют статической погрешностью регулятора.

Простейшие СРН имеют статическую погрешность в пределах $(3-5\%)U_{ном}$, что удовлетворяет требованиям большинства потребителей.

При построении математической модели системы регулирования напряжения примем, что нагрузкой МУ является исполнительный орган регулятора – обмотка подмагничивания ω_n , размещенная на спинке статора.

ИО должен иметь восходящую характеристику (с положительным коэффициентом усиления $k_{ио}$)

$$\Delta U_{ио} = k_{ио} \Delta U, \quad (3)$$

где ΔU – рассогласование по напряжению.

При увеличениях напряжения на зажимах СГПМ увеличивается подмагничивание МУ, вследствие чего возрастает ток подмагничивания обмотки ω_n спинки статора, при этом спинка статора насыщается, магнитная проницаемость ее уменьшается из-за чего уменьшается магнитный поток воздушного зазора и напряжение на зажимах СГПМ уменьшается, стремясь вернуться к заданной величине. Если под влиянием возмущений напряжение СГПМ уменьшится, то работа системы регулирования напряжения происходит в обратном направлении.

Уравнение СГПМ можно записать в следующем виде

$$(T_{\text{вм}}p+1)\Delta U = -\alpha(T_{\text{гф}}+1)\Delta I - k_{\text{ф}}\Delta I_{\text{п}}, \quad (4)$$

где α и $T_{\text{гф}}$ – расчетные параметры синхронного генератора:

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= x_d \sin \varphi + \cos \varphi; \\ T_{\text{гф}} &= x_d T_d' \sin \varphi + \frac{r_{\text{я}} T_{\text{вм}} \cos \varphi}{x_d \sin \varphi + r_{\text{я}} \cos \varphi} \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

где $T_{\text{вм}}$ – электромагнитная постоянная времени генератора; $k_{\text{ф}}$ – передаточный коэффициент преобразования тока подмагничивания в магнитный поток.

$$(T_{\text{п}}p+1)\Delta I_{\text{п}} = k_{\text{п}}\Delta U_{\text{мы}}, \quad (6)$$

где $T_{\text{п}}$ – постоянная времени подмагничивания обмотки $\omega_{\text{п}}$; $k_{\text{п}}$ – коэффициент усиления подмагничивающей обмотки.

МУ отличается двумя обратными связями: внешней положительной жесткой обратной связью (не показана на схеме) и внутренней положительной обратной тоже жесткой связью (самоподмагничивание), поэтому уравнение МУ можно представить в следующем виде:

$$(T_{\text{мы}}p+1)\Delta U_{\text{мы}} = k_{\text{мы}}\Delta U_{\text{но}} + k_{\text{ос}}\Delta I_{\text{п}}, \quad (7)$$

где $T_{\text{мы}}$ – постоянная времени генератора; $k_{\text{мы}}$ – коэффициент усиления МУ; $k_{\text{ос}}$ – коэффициент жесткой положительной обратной связи.

Таким образом, переходный процесс системы регулирования напряжения СГПМ с подмагничивающей спинкой статора описывается уравнениями (2), (4), (6) и (7):

$$\left. \begin{aligned} (T_{\text{вм}}p+1)\Delta U &= -\alpha(T_{\text{гф}}+1)\Delta I - k_{\text{ф}}\Delta I_{\text{п}}; \\ (T_{\text{п}}p+1)\Delta I_{\text{п}} &= k_{\text{п}}\Delta U_{\text{мы}}; \\ (T_{\text{мы}}p+1)\Delta U_{\text{мы}} &= k_{\text{мы}}\Delta U_{\text{но}} + k_{\text{ос}}\Delta I_{\text{п}}; \\ \Delta U_{\text{но}} &= k_{\text{но}}\Delta U. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Решение системы (8) относительно ΔU дает уравнение замкнутой системы регулирования напряжения

$$\left[T_{\text{вм}} T_{\text{п}} T_{\text{мы}} p^3 + (T_{\text{вм}} T_{\text{п}} + T_{\text{вм}} T_{\text{мы}} + T_{\text{п}} T_{\text{мы}}) p^2 + (T_{\text{вм}} + T_{\text{п}} + T_{\text{мы}} - k_{\text{п}} k_{\text{ос}} T_{\text{вм}}) p + (1 + k - k_{\text{п}} k_{\text{ос}}) \right] \Delta U = -\alpha (T_{\text{гф}} p + 1) \left[(T_{\text{п}} p + 1) (T_{\text{мы}} p + 1) - k_{\text{п}} k_{\text{ос}} \right] \Delta I, \quad (9)$$

где $k = k_{\text{ф}} k_{\text{п}} k_{\text{мы}} k_{\text{но}}$.

Структурная схема СРН СГ с подмагничиванием стенки статора представлена на рис. 3. В ней указаны все связи системы уравнений (9).

Передаточная функция замкнутой системы имеет вид:

$$W(p) = \frac{-\alpha (T_{\text{гф}} p + 1) \left[(T_{\text{п}} p + 1) (T_{\text{мы}} p + 1) - k_{\text{п}} k_{\text{ос}} \right]}{a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0}, \quad (10)$$

где

$$\left. \begin{aligned} a_3 &= T_{\text{вм}} T_{\text{п}} T_{\text{мы}}; & a_1 &= T_{\text{вм}} (1 - k_{\text{п}} k_{\text{ос}}) + T_{\text{п}} + T_{\text{мы}}; \\ a_2 &= T_{\text{вм}} T_{\text{п}} + T_{\text{вм}} T_{\text{мы}} + T_{\text{п}} T_{\text{мы}}; & a_0 &= 1 + k - k_{\text{п}} k_{\text{ос}}. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Из уравнения (10) находим статическую погрешность СРН:

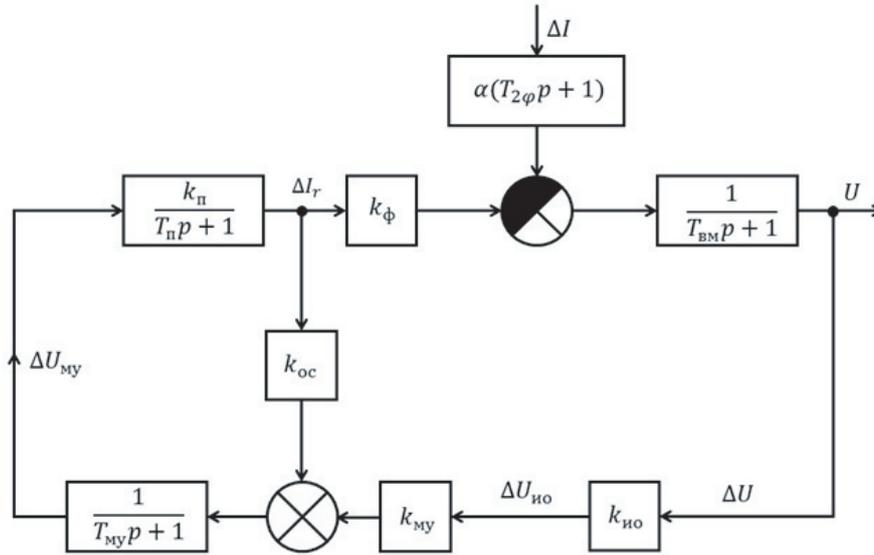


Рис. 3. Структурная схема СРН СГ с подмагничиванием спинки статора

$$|\Delta U| = \frac{a(1 - k_n k_{oc}) \Delta I}{1 + k - k_n k_{oc}}. \quad (12)$$

Уравнение (12) позволяет найти погрешность измерения напряжения, основываясь на параметрах СРН, однако полученная ошибка не сигнализирует об устойчивости системы регулирования.

Для исследования на устойчивость СРН принимается характеристическое уравнение, полученное из равенства (10) равным нулю, т.е.

$$a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3 = 0 \quad (13)$$

определитель Гурвица которого имеет вид

$$\Delta_3 \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & 0 \\ a_0 & a_2 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix} = a_3 \Delta_2, \quad (14)$$

тогда в соответствии с критерием Гурвица для устойчивой системы должны выполняться следующие неравенства

$$\left. \begin{aligned} \Delta_3 = a_3 \Delta_2 > 0; \quad \Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} = a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0; \\ \Delta_1 = a_1 > 0; \quad a_0 > 0, \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

т.е. для получения устойчивости необходимо, чтобы изменяемые параметры системы подчинялись условию [3]:

$$a_1 a_2 > a_0 a_3. \quad (16)$$

Таким образом, математическая модель СРН содержит совокупность аналитических соотношений, описывающих связи между элементами системы с оценкой погрешности работы системы и оценкой ее устойчивости. Предложенная модель может быть использована при исследовании СГПМ с улучшенными энергетическими и массогабаритными характеристиками как самого СГПМ, так и для системы бесперебойного питания различного назначения.

Литература

1. Балагуров, В. А. Электрические генераторы с постоянными магнитами / В. А. Балагуров, Ф. Ф. Галтеев. - Москва : Энергоатомиздат, 1988. - 280 с. - Текст : непосредственный .
2. Соловьев, И. И. Автоматические регуляторы синхронных генераторов / И. И. Соловьев ; под ред. Н. И. Овчаренко. - Москва : Энергоиздат, 1981. - 248 с. - Текст : непосредственный.
3. Юревич, Е. И. Теория автоматического управления : учебник для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки «Системный анализ и управление» / Е. И. Юревич. -3 - е изд. - Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2007. - 560 с. - Текст : непосредственный.