

# ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА И ЭЛЕКТРОПРИВОД

УДК 62-83.01

## ГЕНЕРАТОРНАЯ УСТАНОВКА С СИНХРОННОЙ РЕАКТИВНОЙ МАШИНОЙ НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

**Ю.С. Усынин, К.М. Виноградов**  
г. Челябинск, ЮУрГУ

**Приводятся принцип работы, сравнение с другими типами генераторов, экспериментальные характеристики, функциональные схемы электрогенераторной установки на базе синхронной реактивной машины независимого возбуждения. Обращается внимание на высокие удельные показатели и благоприятные эксплуатационные характеристики этих электрогенераторных установок.**

**Введение.** Автономные установки для производства электроэнергии, как правило, эксплуатируются в тяжелых условиях, поэтому бесконтактное исполнение генератора является часто не только желательным, но обязательным условием конструирования. Высокие удельные энергосиловые показатели имеют бесконтактные двигатели, выполненные на базе синхронной реактивной машины независимого возбуждения (СРМНВ) [6, 7, 8]. Между тем работа этой машины в генераторном режиме имеет свои особенности и достоинства, которые ниже и рассмотрены.

**Обзор литературы.** Известны разные варианты конструкции электрических генераторов для автономной сети. Обычно питание бортовой сети транспортных средств осуществляется от параллельно включенных аккумуляторной батареи и генератора постоянного тока, который приводится во вращение от двигателя внутреннего сгорания. В качестве основного источника электроэнергии применяются коллекторные генераторы постоянного тока, а также вентильные генераторы, имеющие ротор с постоянными магнитами [4]. Наличие щеточно-коллекторного узла является главным недостатком коллекторных генераторов и приводит к снижению срока службы генератора, меньшей надежности, неблагоприятным массогабаритным характеристикам. Генераторы с постоянными магнитами характеризуются сложной технологией изготовления, нестабильностью параметров, повышенной мощностью устройств стабилизации выходного напряжения, большой стоимостью.

Надежный ротор имеют индукторные генераторы [1]. Однако для них характерно неудовлетворительное использование электрической машины по стали из-за однонаправленного (пульсирующего) магнитного потока и плохих массогабаритных показателей.

Асинхронные характеризуются простотой [2], однако практически не поддаются регулированию.

Находят также применение бесконтактные синхронные генераторы с возбудителем и вращающимся выпрямителем, с многофазной обмоткой якоря (статора) и силовым многофазным выпрямителем на выходе генератора [3]. Однако размещение на роторе вращающейся обмотки возбуждения и диодов выпрямителя снижает механическую надежность генератора и не позволяет получить высокие угловые скорости вращения ротора.

**Принцип работы и особенности конструкции.** Как известно [6, 7, 8], в СРМНВ роль обмотки возбуждения выполняют витки тех обмоток, которые располагаются напротив межполюсных промежутков и имеют полный шаг. В электродвигателе одни и те же обмотки поочередно выполняют роль то рабочих обмоток, то обмоток возбуждения в зависимости от того, где в данный момент времени они располагаются: напротив полюса или межполюсного промежутка. Между тем, когда электрическая машина работает в генераторном режиме, то вентили коммутатора, подключенного к рабочим обмоткам, работают в режиме естественной коммутации. Поэтому целесообразно конструктивно разделить цепи обмоток рабочих, которые не требуют искусственной коммутации вентилей и, следовательно, могут быть подключены к неуправляемому выпрямителю, и обмоток возбуждения, которые подключаются на выход управляемого преобразователя. Выбирая длину полюсной дуги соответствующей времени проводимости вентилей (обычно 120 градусов), удается рационально согласовать параметры генератора и преобразователя.

На рис. 1 представлен в разрезе пример трехфазного генератора, когда в пазах статора, расположенных в плоскостях А-а, В-в, С-с, сдвинутых пространственно на 120 градусов, размещены основные (силовые) обмотки, соединенные в звезду.

Кроме силовых обмоток, на статоре аналогичным образом в плоскостях X-x, Y-y, Z-z размещены дополнительные обмотки возбуждения, выполненные с полным шагом.

На рис. 1 они выполнены по однополупериодной схеме, поэтому в каждом из пазов уложено по две встречно включенных полуобмотки.

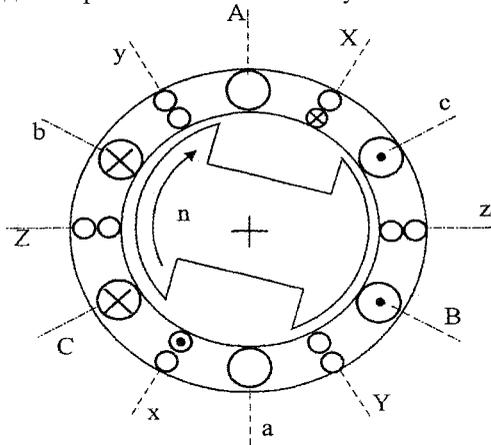


Рис. 1. Схематичный поперечный разрез синхронного генератора

Возможны и другие версии обмоток в генераторе, например, с другим числом фаз, с различным числом фаз обмоток силовых и возбуждения, размещаться не в разных, а в одних и тех же пазах статора.

Ротор имеет явнополюсную конструкцию и не несет на себе обмоток.

Силовые обмотки, соединенные в звезду, через неуправляемый выпрямитель, выполненный по трехфазной мостовой схеме, подключены параллельно с аккумуляторной батареей к бортовой сети постоянного тока. Обмотки возбуждения подключены к выходам возбудителя.

Направления токов во всех обмотках статора соответствуют указанному на рис. 1 мгновенному положению ротора генератора.

Осуществляя в функции положения ротора переключения токов в фазных обмотках возбуждения, обеспечивают пространственное круговое движение магнитодвижущей силы возбуждения вдоль окружности воздушного зазора машины так, что эта магнитодвижущая сила перемещается синхронно с вращающимся ротором генератора. Благодаря такому совместному вращательному движению ротора генератора и магнитодвижущей силы возбуждения достигается непрерывное возбуждение генератора в продольном направлении.

**Схемы силовых цепей.** Цепи рабочих обмоток могут быть выполнены как по общеизвестной трехфазной мостовой схеме, так и по схеме «звезда - обратная звезда» с уравнительным реактором. Хотя второй вариант и приводит к некоторому увеличению обмоточной меди, но при том же числе вентилях, что и в мостовой схеме, позволяет получить двойной выпрямленный ток при в два раза меньшем суммарном падении напряжения на

вентильях выпрямительной схемы, что актуально для электроэнергетических установок, имеющих малое напряжение бортовой сети, например, 12 или 28 В.

Цепи возбуждения могут быть выполнены так же, как типовые схемы силовых цепей вентиляльно-индукторных двигателей [5]. На рис. 2 обмотки включены по однополупериодной схеме: по обмоткам 1, 3 и 5 через ключи VT1, VT3 и VT5 проходят положительные полуволны фазных токов возбуждения, а по обмоткам 2, 4 и 6 через ключи VT2, VT4 и VT6 - отрицательные полуволны. Цепи обмоток идентичны, поэтому на схеме (рис. 2) изображены только цепи обмоток 1 и 6. В цепи обмоток возбуждения 1...6, расположенных равномерно вдоль расточки статора и имеющих полный шаг, включены транзисторы VT1...VT6, которые образуют коммутатор (переключатель) фазных токов возбуждения генератора. Чтобы ротор намагничивался вдоль продольной оси и всегда в одном направлении, в функции угла поворота ротора открываются транзисторы тех фаз цепи возбуждения, обмотки которых расположены в данный момент времени напротив межполюсного промежутка ротора. Последовательно с цепями обмоток возбуждения включен транзистор VT, который работает в режиме широтно-импульсной модуляции и выполняет функции регулируемого источника тока возбуждения. Диоды VD, VDI, VD6 снижают коммутационные перенапряжения на силовых переходах транзисторов в прямом направлении.

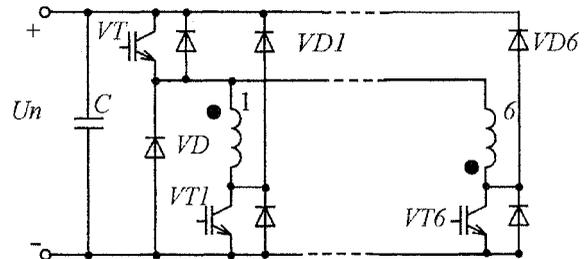


Рис. 2. Функциональная схема цепей возбуждения генератора

**Возмущения в системе регулирования напряжения.** Вал синхронного генератора механически связан с валом первичного двигателя внутреннего сгорания, угловая скорость которого может изменяться в диапазоне до 1:4 и более. Поддержание заданного значения напряжения осуществляется изменением тока возбуждения генератора. Наиболее трудно подавить обратные пульсации напряжения генератора.

Они обусловлены, прежде всего, неравномерным вращением вала из-за импульсного характера работы двигателя внутреннего сгорания. Амплитуда пульсаций скорости может достигать до 5 % в рабочем режиме двигателя и даже до 20 % и более при малых нагрузках. Другой причиной обратных пульсаций является неоднородность

магнитного сопротивления железа статора вдоль его расточки. Это связано с тем, что пакет железа статора шихтуется из листов холоднокатанной стали, которая имеет разную величину магнитной проницаемости вдоль и поперек направления прокатки. Экспериментальные измерения, выполненные на электрических машинах переменного тока мощностью 0,5...5,0 кВт и числом пар полюсов 1...3, указывают на уровень пульсаций в пределах 10...30% от среднего значения напряжения. Наибольшие пульсации наблюдаются у электрических машин с малым числом пар полюсов.

**Показатели контура регулирования напряжения.** Подавление оборотных пульсаций традиционными  $L$ - $C$  фильтрами неэффективно, так как они рассчитаны на высокие (сотни Гц) частоты. Однако, как показывают экспериментальные данные, снятые на стенде, где в качестве генератора использовалась СРМНВ (0,25 кВт, 28 В, 6 А, 1500 об./мин) подавление оборотных пульсаций напряжения возможно осуществить средствами управления. Это подтверждают частотные характеристики контура регулирования напряжения (КРН), которые в разомкнутой системе (рис. 3, кривая 1) имеют полосу равномерного пропускания частот по сигналу задания не более 100 рад/с. В замкнутой же системе (рис. 3, кривая 2) удается расширить полосу пропускания частот до

800... 1000 рад/с. На рис. 3б приведена амплитудная частотная характеристика контура регулирования напряжения по возмущению. Она имеет две ветки: восходящую (в диапазоне частот до  $\omega$  300...400 рад/с), где ослабление периодического воздействия осуществляется контуром регулирования напряжения, и спадающую (при более высоких частотах), где действие обратной связи уже неэффективно, а ослабление периодических возмущений возможно лишь  $L$ - $C$  фильтром в силовой цепи. В области экстремума величина динамической ошибки максимальна. Здесь обратная связь по напряжению из-за инерционности контура регулирования напряжения уже малоэффективна, а усиление влияния  $L$ - $C$  фильтра требует увеличения габаритов его элементов. Между тем, даже эти частоты ослабляются совместной работой КРН и фильтра в 30...50 раз.

**Заключение.** Простота конструкции обеспечивает высокую технологичность изготовления электрической машины, бесконтактное исполнение в сочетании с «холодным» не содержащим обмоток ротором повышает надежность работы подшипников и всей машины, возможность выполнить ротор массивным (т.е. полюса ротора и вал из одной цельной заготовки) существенно повышают его прочность и поперечную жесткость, что позволяет получать высокие угловые скорости

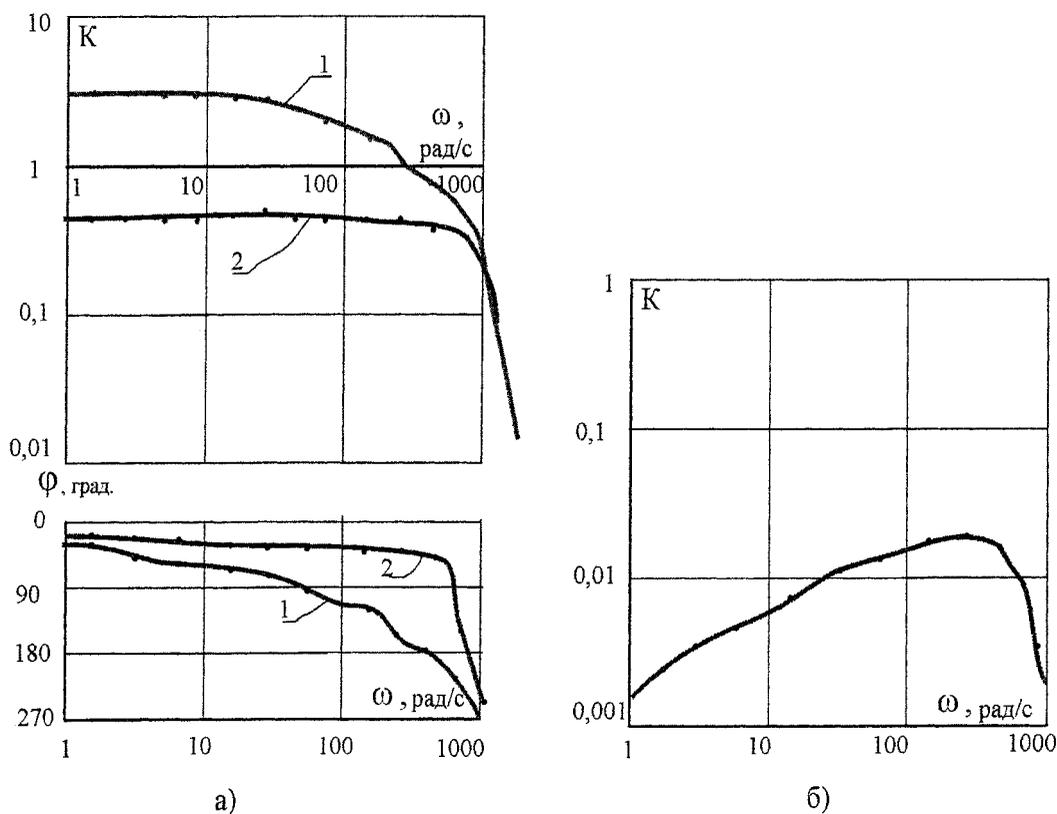


Рис. 3. Экспериментальные частотные характеристики контура регулирования напряжения: а) по сигналу задания; б) по возмущению

и большие перегрузки по моменту. Малые мощности управления по цепи возбуждения при достаточно высоком быстродействии этого канала способствуют достижению высокой точности поддержания заданного напряжения при благоприятных массо-габаритных показателях электроэнергетической установки.

### Литература

1. Альпер, Н.Я. Индукторные генераторы / Н.Я. Альпер, А.А. Терзян. - М.: Энергия, 1970. - 192 с.

2. Вольдек, А. И. Электрические машины / А.И. Вольдек: учебник для вузов. - Л.: Энергия, 1974. - 840 с.

3. Патент 4121148 США, МКИ Н 02 К 19/34; Н 02 Р 9/14. Бесконтактный синхронный генератор. *Brushless synchronous generator system*; Hubert Platzer, Dipl.-Ing. Hitzinger & Co., Linz, Austria. - № 790263; заявл. 25.04.1977; опублик. 17.10.1978.

4. Теория, конструкция и расчет автотракторного электрооборудования / под ред. М.Н. Фесенко. - М.: Машиностроение, 1992. - 381 с.

5. Усынин Ю.С. Системы управления электроприводов: учеб. пособие для вузов. - Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. - 328 с.

6. Электропривод с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, Н.Д. Монюшко, М.А. Григорьев, Г.В. Караваев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». - 2001. - Вып. 1.-№4 (04). - С. 70-76.

7. Toliyat H, Xu L., Lipo T. Five-Phase Reluctance Motor with High Specific Torque // IEEE Transactions on Industry Applications. — 1992. - Vol. 28.- №3.- P. 559-667.

8. Weh H. On the Development of Inverter Fed Reluctance Machines for High Power Densities and High Output // Electrical Machines Institute of the Technical University of Braunschweig. — 1984. — Bd. 6. -P. 135-144.

Усынин Юрий Семенович в 1959 г. окончил Челябинский политехнический институт, в 1964 г. - очную аспирантуру при кафедре электропривода Московского энергетического института. Профессиональные интересы: металлургический, общепромышленный, автономный, следящий электроприводы. Доктор технических наук, профессор. Работает на кафедре электропривода ЮУрГУ.

Виноградов Константин Михайлович окончил в 2002 г. Южно-Уральский государственный университет, в 2005 г. - очную аспирантуру при кафедре ЭПА ЮУрГУ. Кандидат технических наук. Доцент кафедры электропривода ЮУрГУ.