

УДК 621.3

## РАЗРАБОТКА И ИСПЫТАНИЕ ВОЗБУДИТЕЛЯ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО РЕГУЛЯТОРА ТОКА

## DEVELOPMENT AND TESTING THE EXCITER OF SYNCHRONOUS MACHINE BASED ON HIGH FREQUENCY REGULATOR OF CURRENT

**Антипин Александр Сергеевич**, магистрант каф. «Электротехника и электротехнологические системы», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: a.s\_antipin@mail.ru. Тел.: +7(982)702-44-52

**Фризен Василий Эдуардович**, д-р. техн. наук, заведующий каф. «Электротехника и электротехнологические системы», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: vfrizen@yandex.ru

**Удинцев Владимир Николаевич**, канд. техн. наук, доцент каф. «Электротехника и электротехнологические системы», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: uvn21@ya.ru

**Назаров Сергей Леонардович**, канд. техн. наук, доцент каф. «Электротехника и электротехнологические системы», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19.

**Alexander S. Antipin**, Master student, Department «Electrical engineering and electrotechnological systems», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: a.s\_antipin@mail.ru. Ph.: +7(982)702-44-52

**Vasily E. Frizen**, Doctor Sc., Department Chairman «Electrical engineering and electrotechnological systems», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: vfrizen@yandex.ru

**Vladimir N. Udintcev**, Cand. of Sc., Associate Professor at the Department of «Electrical engineering and electrotechnological systems», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: uvn21@ya.ru

**Sergei L. Nazarov**, Cand. of Sc., Associate Professor at the Department of «Electrical engineering and electrotechnological systems», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia.

**Аннотация:** В статье обосновывается целесообразность применения возбудителей синхронных машин малой мощности на основе источника тока. Показаны особенности характеристик синхронных машин малой мощности. Описана блочная функциональная схема системы возбуждения, позволяющая регулировать величину тока. Описаны технологические особенности схемы, представлены преимущества такой схемы относительно традиционных систем.

**Abstract:** The article explains the usefulness of agents of low-power synchronous machines based on the current source. The features of low power characteristics of synchronous machines. Be described a functional block diagram of the excitation system, which allows to regulate the amount of current. Described technological features of the scheme, presented the benefits of such a scheme with respect to traditional systems.

**Ключевые слова:** синхронная машина; система возбуждения; регулятор тока; высокочастотный источник.

**Key words:** synchronous machine; excitation system; current regulator; high frequency source.

### ОСОБЕННОСТИ СИНХРОННЫХ МАШИН МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Для профессиональной подготовки бакалавров и магистров по направлению «Электромеханика» большое значение имеет лабораторный практикум. В частности, желательны лабораторные работы, посвященные исследованию характеристик синхронных машин. Однако, постановка таких лабораторных работ осложняется тем, что синхронные машины малой мощности серийно выпускаются только с возбуждением от постоянных магнитов.

По этой причине на кафедре «ЭЭТС» УрФУ была спроектирована и изготовлена синхронная машина малой мощности с электромагнитным возбуждением. Такая машина была изготовлена на основе серийного асинхронного двигателя типа АДМ 63А4У2, путем замены ротора. Ротор синхронной машины выполнялся явнополюсным с  $2p=2$ .

Испытания этой синхронной машины показали неустойчивость ее работы в режиме перевозбуждения, что плохо согласуется с классической теорией синхронных машин. Эта особенность связана с тем, что в машинах малой мощности величина активного сопротивления якоря сопоставима с величиной индуктивного сопротивления. Как известно [1], классическая теория синхронных машин строится на допущении о чисто индуктивном сопротивлении якоря синхронной машины.

Для выявления особенностей характеристик синхронных машин со значительным активным сопротивлением якоря, были получены выражения для угловых характеристик активной и реактивной мощности таких машин. Вывод производился для неявнополюсной машины, векторная диаграмма которой представлена на рис. 1.

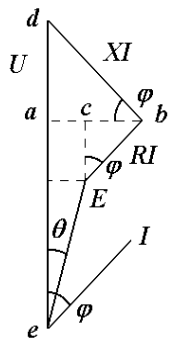


Рис. 1. Векторная диаграмма синхронной машины в режиме двигателя

Опуская промежуточные выкладки, приведем окончательные выражения для активной:

$$P = \frac{X}{Z^2} UE \left[ \sin \vartheta - \frac{R}{X} \cos \vartheta \right] + \frac{R}{Z^2} U^2, \quad (1)$$

и реактивной мощности

$$Q = -\frac{X}{Z^2} UE \left[ \cos \vartheta + \frac{R}{X} \sin \vartheta \right] + \frac{X}{Z^2} U^2. \quad (2)$$

Не сложно убедиться, что при  $R=0$ , ( $X=Z$ ), выражения для мощностей (1), (2) преобразуются в известные формулы:

$$P = \frac{UE}{X} \sin \vartheta, \quad (3)$$

$$Q = -\left[ \frac{UE}{X} \cos \vartheta - \frac{U^2}{X} \right]. \quad (4)$$

### УГЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНХРОННЫХ МАШИН МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Видно, что выражения (1) и (2) имеют более сложную структуру по сравнению с (3) и (4). Так, на рис. 2 представлены угловые характеристики, рассчитанные по выражениям (3), (4) и (1), (2). Эти характеристики строились при соотношениях  $U/E$  равных 0.6, 1.4. Сопоставление угловых характеристик для мощной машины ( $R=0$ ) и для машины малой мощности при  $R/X = 0.5$  показывает следующее:

- во-первых, активное сопротивление якоря приводит к смещению областей двигательного и генераторного режима;
- во-вторых, величины амплитуд угловых характеристик в двигательных и генераторных режимах становятся различными.

Указанные особенности приводят к уменьшению области генерации реактивной мощности в двигательном режиме при перевозбуждении. Кроме того, синхронные машины малой мощности склонны к самораскачиванию [1]. Это усложняет снятие  $U$ -образных характеристик в процессе проведения лабораторных работ. При проведении испытаний также обнаружена модуляция тока возбуждения при питании от источника напряжения. Такая модуляция снижает устойчивость работы синхронной машины, т.е. способность сохранять синхронное вращение при параллельной работе с сетью при изменениях внешнего вращающего или тормозного момента, приложенного к ее валу.

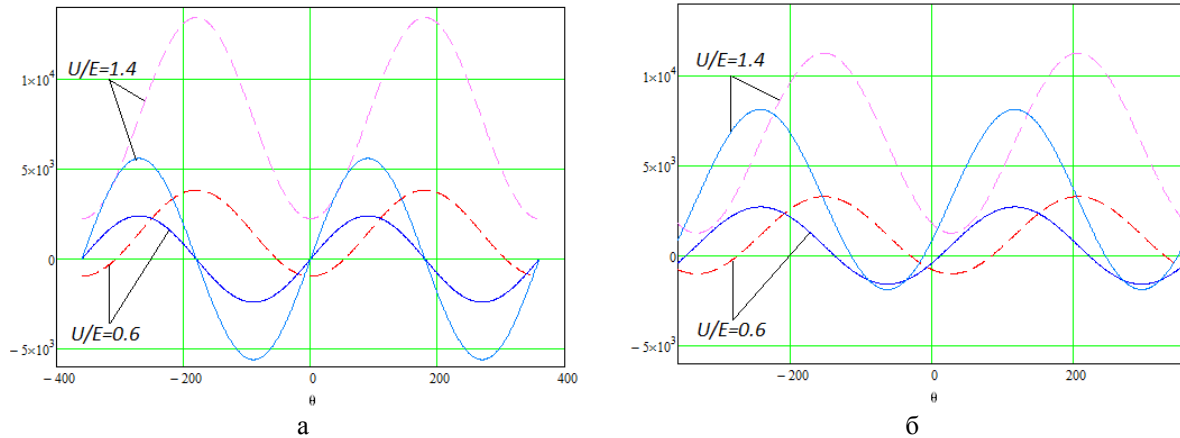


Рис. 2. Угловые характеристики синхронных машин:  
 а –  $R=0$ ; б –  $R/X=0.5$   
 сплошные линии  $P(\vartheta)$ , пунктирные  $Q(\vartheta)$ .

В большинстве случаев при таких возмущениях возникают колебания скорости (качания) ротора с большой амплитудой – эффект самораскачивания. Ротор синхронной машины совершает самопроизвольные колебания, заканчивающиеся либо выпадением машины из синхронизма в случае, когда колебания, возникшие в результате каких-либо возмущений, не затухают, а возрастают по амплитуде, или установлением какого-то предельного цикла колебаний, препятствующих нормальной работе [2].

Устойчивость генератора при заданном значении активной мощности, отдаваемой в сеть, зависит от тока возбуждения. Чем больше ток возбуждения, тем меньше угол  $\theta$  при заданной нагрузке (см. рис. 1), а, следовательно, тем больше перегрузочная способность генератора. Однако, если сеть создает активно-емкостную нагрузку, то генератор для поддержания напряжения работает с недовозбуждением, с уменьшением тока возбуждения при заданной активной мощности возрастает угол  $\theta$  и снижается перегрузочная способность машины. При увеличении тока возбуждения возрастает ЭДС, следовательно, увеличивается устойчивость машины.

Необходимость автоматического регулирования напряжения генератора и обеспечения устойчивой работы синхронной машины предполагает ряд требований к возбудителю: обеспечивать питание обмотки возбуждения синхронного генератора как в нормальных, так и в аварийных режимах; обеспечивать быстродействующее автоматическое регулирование тока возбуждения с высокими кратностями форсирования в аварийных режимах; осуществлять быстрое развозбуждение и, в случае необходимости, производить гашение поля в аварийных режимах. Кроме того, всегда имеется требование обеспечения минимально возможных массогабаритных характеристик.

**ВОЗБУДИТЕЛЬ НА БАЗЕ РЕГУЛЯТОРА ТОКА**

С целью уменьшения модуляции тока возбуждения и выполнения вышеперечисленных требований возбудитель реализован в виде быстродействующего регулятора (стабилизатора) тока со звеном постоянного тока. За основу взят импульсный высокочастотный источник питания с системой управления и преобразования. Основное преимущество данной схемы – это ее быстродействие, время реакции на возмущение у

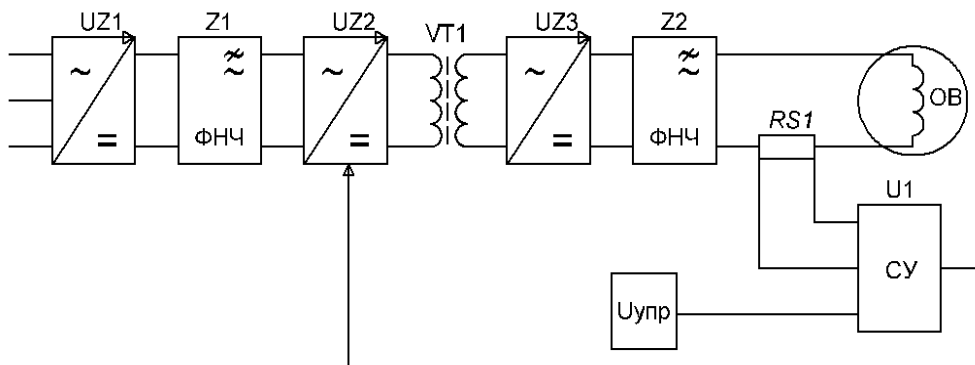


Рис. 3. Функциональная схема системы возбуждения синхронной машины малой мощности

нее много меньше, чем у тиристорных регуляторов. Также, она имеет высоколинейное изменение тока (напряжения) под действием сигнала управления, малый вес и габаритные размеры, в десятки раз меньшие тиристорных представителей своего класса по мощности.

Функциональная схема системы возбуждения приведена на рис. 3. Напряжение генератора выпрямляется входным выпрямителем  $UZ1$ , сглаживается фильтром – накопителем энергии  $Z1$  и поступает на высокочастотный конвертор напряжения  $UZ2$ ,  $UZ3$ ,  $Z2$ , где преобразуется по уровню до необходимого для создания заданного тока значения. Система управления  $U1$  управляет инвертором  $UZ2$  путем изменения ширины его высокочастотных импульсов от нулевого до задаваемого внешней системой стабилизации напряжения генератора значения. При номинальном токе возбуждения средняя относительная длительность импульсов инвертора составляет около 0,5, что обеспечивает его высокий КПД.

При достижении током возбуждения заданного значения инвертор выключается, ток возбуждения уменьшается, далее вновь происходит включение инвертора и процесс повторяется. Постоянное напряжение на конденсаторе (выходе) фильтра  $Z2$  имеет пилообразную составляющую переменной, прямо зависящей от величины тока возбуждения, частоты с амплитудой в единицы милливольт. При номинальном токе возбуждения частота пульсаций 3 – 5 кГц.

Такое решение системы управления инвертором обеспечивает повышенную устойчивость системы стабилизации напряжения генератора к самовозбуждению, высокую кратность форсирования и хорошее демпфирование модуляций тока возбуждения. Проведенные, в процессе опытной эксплуатации системы возбуждения, испытания показали полное отсутствие модуляции тока и повышение устойчивости работы синхронной машины при резких изменениях внешнего вращающего или тормозного момента, приложенного к ее валу.

## ВЫВОД

В учебной литературе по электрическим машинам [1,2,3], вывод формул для активной и реактивной мощностей синхронной машины проводится при пренебрежении активным сопротивлением якоря.

Это допущение справедливо только для достаточно мощных машин. В случае машины мощностью в несколько сотен ватт, такой подход недопустим. Применение для стабилизации тока возбуждения и напряжения генератора серийных тиристорных преобразователей не обеспечивает устойчивой работы машины и не рационально из-за сложности их устройства, относительно больших габаритов и высокой стоимости.

Применение дополнительных обмоток в машинах малой мощности, позволяющие стабилизировать магнитный поток, не только усложняет их конструкцию, но и повышает риск выхода из строя машины при различных режимах работы.

Применение высокочастотного стабилизатора тока в синхронных электрических машинах является инновационной технологией в электромашиностроении. Такие разработки по стабилизации тока возбуждения в автономных генераторах относительно недавно начали применять иностранные (компания «Honda Motor») и отечественные производственные организации. В опубликованных ими патентах [4,5], с зарегистрированным приоритетом не ранее 2008 года, приводится описание применения данной технологии для бензогенераторов средней и большой мощности.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вольдек А. И. Электрические машины. Учебник для студентов высш. техн. заведений. - 3-е изд., перераб. - Л.: Энергия, 1978. - 832 с., ил.
2. Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины и микромашины. – М.: Высшая школа, 1990. 319 с.
3. Осин И.Л., Антонов М.В. Устройство и производство электрических машин малой мощности. – М.: Высшая школа, 1988. 212 с.
4. Патент РФ № 2009128334/07, 23.07.2009. Хашимото Сёдзи, Мурунои Кадзифуми. Инверторный генератор и способ управления таким генератором // Патент России № 2413353. 27.02.2011. Бюл. № 6.
5. Карпук Ю.А., Магдалев А.И. Стабилизатор тока (RU 2219574) // Патентный поиск, поиск патентов на изобретения, национальный реестр интеллектуальной собственности - FindPatent.RU 2012-2016. [Электронный ресурс]. Дата обновления: 06.04.2016. — URL: <http://www.findpatent.ru/patent/221/2219574.html>.