МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

# ЗАВАЛИШИНСКИЕ ЧТЕНИЯ'19

Сборник докладов

17–20 апреля 2019 г.

ГУАП
Санкт-Петербург
2019

УДК 001
ББК 72
З-13

З-13 Завалишинские чтения'19: сб. докл. / СПб.: ГУАП, 2019. 345 с.

ISBN 978-5-8088-1355-7

Помещенные в сборник доклады отражают весь спектр направлений научных работ, проводимых факультетом: от проектирования отдельных элементов и устройств, технологий их создания, решения вопросов диагностики и разработки прикладного программного обеспечения до построения сложных систем и комплексов, различных по своему функциональному назначению.

Оргкомитет конференции

Ю. А. Антохина – доктор экономических наук, ректор ГУАП
А. А. Оводенко – доктор технических наук, профессор, президент ГУАП
В. Ф. Шишлаков – доктор технических наук, профессор, директор Института инновационных технологий в электромеханике и робототехнике
А. Л. Ронжин – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электромеханики и робототехники

РОССИЙСКИЙ ФОНД ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
РФФИ

XIV международная конференция по электромеханике и робототехнике «Завалишинские чтения-2019» проведена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 19-08-20021.

УДК 001
ББК 72

ISBN 978-5-8088-1355-7

© Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2019

УДК 621.313.126

***Д. В. Кукушкин****
*ведущий инженер-конструктор, аспирант*
**Институт электрофизики и электроэнергетики РАН ПАО «Силовые машины»*

# РАЗВИТИЕ БЕСЩЕТОЧНЫХ ВОЗБУДИТЕЛЕЙ СИНХРОННЫХ МАШИН

*В статье рассмотрены основные этапы развития статических и бесщеточных возбудителей начиная с появления в 60-х годах XX века до современного уровня.*

***Ключевые слова:*** *система возбуждения, вращающийся возбудитель.*

***D. V. Kukushkin****
*Lead Engineer Designer, PhD Student*
**Institute of Electrophysics and electric power of RAS PJSC "Power machines"*

# EVOLUTION OF BRUSHLESS EXCITERS OF SYNCHRONOUS MACHINES

*The article presents the main evolution stages of static and brushless exciters since the appearance in the 60th years of the XX century to the modern level.*

***Keywords:*** *excitation system, rotating exciter.*

## Введение

На протяжении всего XX и начала XXI века развитие мировой промышленности связано с возрастающими потребностями в электроэнергии, главным потребителем которой являются асинхронные и синхронные электромашинные преобразователи энергии, влекущее за собой ввод в эксплуатацию новых электростанций различных типов, в том числе работающих на возобновляемых источниках энергии. Однако основными источниками электроэнергии переменного тока по-прежнему являются электрические машины – синхронные генераторы тепло-, гидро- и атомных электростанций – и согласно прогнозам Международного энергетического агентства, показанным на рис. 1, такая ситуация сохранится до 2040 года [1].

Развитие генераторостроения характеризуется значительным замедлением роста единичной мощности турбо- и гидрогенераторов в конце XX века и увеличением числа работ, посвященных анализу причин отказов и их последствий [2], что коррелируется с требованиями электрогенерирующих организаций по сокращению времени вынужденных простоев, обусловленных профилактическими и ремонтными работами. Одним из способов повышения надежности генераторов является применение вращающегося

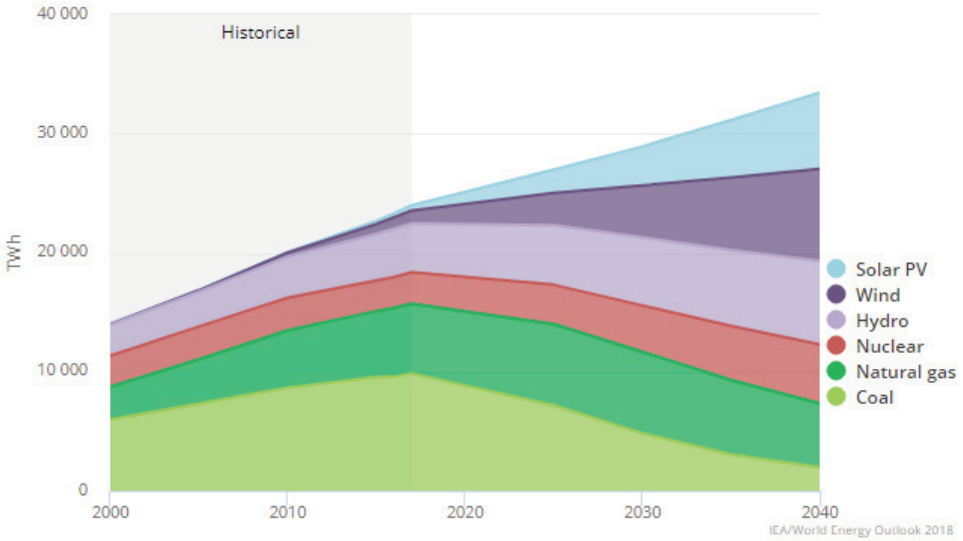


*Рис. 1. Прогноз выработки электроэнергии различными технологиями*

бесщеточного возбудителя, который позволяет отказаться от дорогостоящего в обслуживании щеточного контакта, предназначенного для передачи тока возбуждения поля ротора от статической системы возбуждения [3–5].

Бесщеточный возбудитель представляет собой обращенную электрическую машину, якорь которой закреплен на вале генератора и питает обмотку возбуждения генератора через вращающийся полупроводниковый выпрямитель. Вращающийся выпрямитель представляет собой управляемый или неуправляемый шестипульсный выпрямитель с несколькими параллельными полупроводниковыми приборами в плече, каждый из которых защищается быстродействующими предохранителями [4].

В настоящее время бесщеточные возбудители в основном устанавливаются на турбогенераторах высокой мощности [4, 6, 7], где ток возбуждения в номинальном режиме достигает нескольких килоампер, а при форсировке может превышать десять килоампер, так как щеточный контакт на такие токи крайне сложен в изготовлении и обслуживании. В последние годы наметилась тенденция установки управляемых и неуправляемых бесщеточных возбудителей на низкооборотные гидрогенераторы [8, 9], что, с одной стороны, повышает надежность генератора за счет исключения щеточного контакта, а с другой – обеспечивает высокое быстродействие за счет применения управляемых полупроводниковых приборов во вращающемся выпрямителе [5].

### Развитие статических систем возбуждения с управляемыми ионными преобразователями

Системы возбуждения с управляемыми полупроводниковыми преобразователями разрабатывались и применялись еще в 30-х годах XX века, но широкое распространение получили уже начиная с 50-х годов. В СССР работы по исследованию систем возбуждения с управляемыми преобразователями велись во Всесоюзном электротехническом институте им. В. И. Ленина, Киевском индустриальном институте, Московском энергетическом институте и др. [3].

В СССР и за рубежом был опубликован ряд работ об исследованиях синхронных машин разной мощности с управляемыми ртутными выпрямителями [10–12], которые повлекли за собой массовое внедрение систем ионного возбуждения в Советском Союзе, занявшего лидерские позиции в этой тематике [3]. Это позволило впоследствии накопить необходимый опыт для создания тиристорных систем возбуждения.

С развитием энергосистемы и ростом единичной мощности турбо- и гидроагрегатов в конце 50-х – начале 60-х годов в СССР возникла необходимость в переходе с электромашинных возбудителей постоянного тока на ионные системы возбуждения, которые обладали высоким быстродействием и сильным регулированием. Эти преимущества повышали статическую и динамическую устойчивость [13] и позволяли интенсивно демпфировать качания роторов синхронных машин в послеаварийных режимах, а также форсировать возбуждение при просадках напряжения во время аварийных режимов в течение нескольких десятков секунд, позволяющие оперативному персоналу принять необходимые меры для ликвидации аварии. В СССР системы ионного возбуждения были разработаны для ряда турбо- и гидрогенераторов мощностью до 500 МВт, а в США, ФРГ и Швейцарии системы ионного возбуждения разработаны для турбогенераторов мощностью от 50 до 220 МВА.

Однако, несмотря на десятилетия работ в области физики газового разряда, не удалось создать надежные, компактные и недорогие вентили как кремниевые полупроводниковые приборы, выпускаемые мировыми производителями и в настоящее время. В связи с этим с конца 60-х годов выпускаются статические системы возбуждения только с кремниевыми полупроводниковыми приборами.

### Развитие статических систем возбуждения с кремниевыми преобразователями

Структура статической системы возбуждения (рис. 2) с конца 60-х годов не претерпела значительных изменений. Силовой полупроводниковый преобразователь питается от трансформатора возбуждения TE или от вспомогательного генератора. Автоматический регулятор возбуждения AVR регулирует напряжение на выводах генератора и управляет полупроводниковым преобразователем. В случае нештатных ситуаций предусмотрен автомат гашения поля и разрядное сопротивление.

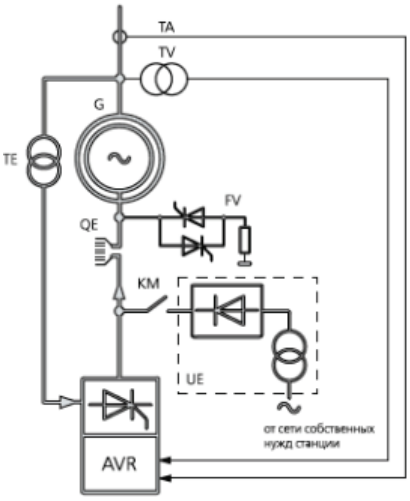


*Рис. 2. Структура системы возбуждения*

Дальнейшее развитие силовой части систем возбуждения следовало за развитием силовой электроники. Кремниевые тиристоры, которые на сегодняшний день остаются самыми надежными и полупроводниковыми вентилями и выделяют наименьшее количество потерь, позволяют отказаться от последовательного, а в последнее десятилетие и от параллельного соединения тиристоров, что позволило значительно уменьшить массогабаритные показатели систем возбуждения.

Следующей вехой в развитии систем возбуждения стала замена дорогих, громоздких и ненадежных аналоговых автоматических регуляторов цифровыми [14], которые позволяют быстро и точно производить наладку системы. Этот процесс стартовал в 80-е годы в Европе, Азии и Америке, но затянулся в СССР из-за отсутствия необходимых комплектующих и нашел широкое применение уже в конце 90-х годов XX века [15].

Применение микропроцессорной техники позволило реализовать в статических системах возбуждения дополнительные функции, такие как динамическое распределение токов среди параллельных тиристоров [16], систему контроля вращающихся диодов бесщеточных выпрямителей для мощных турбогенераторов, устройства защиты и автоматики генератора и системы возбуждения [17].

Важным недостатком статических систем возбуждения, как уже отмечалось ранее, является наличие щеток и контактных колец на роторе [18]. Для мощных турбогенераторов с номинальными токами возбуждения около 10 кА изготовление щеточного контакта и его обслуживание является сложной и дорогостоящей задачей. Современный бесщеточный возбудитель для гидрогенераторов и крупных турбогенераторов позволит значительно снизить эксплуатационные затраты и повысить надежность всего агрегата в целом.

**Бесщеточные возбудители синхронных машин**

Основное преимущество бесщеточных систем возбуждения – это отсутствие щеток и контактных колец, которые требуют постоянного обслуживания [3]. Применение вращающегося выпрямителя позволяет сделать наиболее компактную и экономически привлекательную систему возбуждения.

Идея создание бесщеточного возбудителя была впервые высказана О. Ирион в 1927 году [19]. Впоследствии многочисленные исследования проводились в СССР и за рубежом. В 60-х годах фирма Westinghouse разработала возбудитель для турбогенератора 50 МВА 3600 об./мин [20]. Обращенный трехфазный генератор подключен к вращающемуся выпрямительному блоку, собранному по мостовой схеме с двумя последовательными и тремя параллельными кремниевыми диодами в плече. Защита диодов осуществлялась быстродействующими предохранителями. Регулирование происходило с помощью изменения тока возбуждения неподвижного индуктора с помощью статической системы возбуждения.

В 70-х годах опыт Westinghouse был использован фирмой Siemens (Германия) для генераторов 1600 МВА с номинальных токов возбудителя 12 кА, Alstom (Франция) для генераторов 1000 МВт и другими ведущими мировыми производителями мощных генераторов.

В СССР работа над бесщеточным возбудителем началась несколько позднее с бесщеточного возбудителя для турбогенератора ТВВ-320-2 ЛПЭО «Электросила» и ВНИИэлектромаш, на котором были проверены технические решения для создания возбудителей для турбогенераторов мощностью 500, 1000 и 1200 МВТ. Созданы кремниевые диоды, рассчитанные на большие ускорения до значений 7000–8000g, а для упрощения конструкции возбудителя были изготовлены диоды с нормальным p-n переходом и обратным n-p.

С увеличением мощности генератора с бесщеточным возбудителем ужесточаются требования по его надежности. В турбогенераторах ТВВ-500-2, ТВВ-100-4 и ТВВ-1200-2 с бесщеточными возбудителями применили и установили защитные кольца, которые подключены к устройству защиты от перенапряжений, защищают обмотку возбуждения бесщеточного генератора от перенапряжений.

В системах бесщеточного возбуждения используется устройство контроля вращающегося выпрямителя УКВВ-М [17], позволяющее проводить постоянный контроль целостности быстродействующих предохранителей в ветвях вращающегося выпрямителя.

Важной проблемой является повышение быстродействия бесщеточных возбудителей, решение которой могло бы позволить применить АРВ сильного действия. Быстродействующая бесщеточная система возбуждения для мощных турбогенераторов с вращающимися тиристорными блоками впервые была создана в СССР [3] ВНИИэлектромаш и ЛПЭО «Электросила». Промышленный образце данного возбудителя для ТВВ-320-2 был разработан и испытан [21], но широкого распространения не получил.

Не менее важной проблемой является гашение поля генератора с бесщеточным возбудителем [22], так как в цепи ротора генератора нет коммутационной аппаратуры, которая могла бы быстро погасить поле в случае нештатной ситуации. В 2013 году в Мадридском Политехническом институте было произведено эксперимен-

а) б)

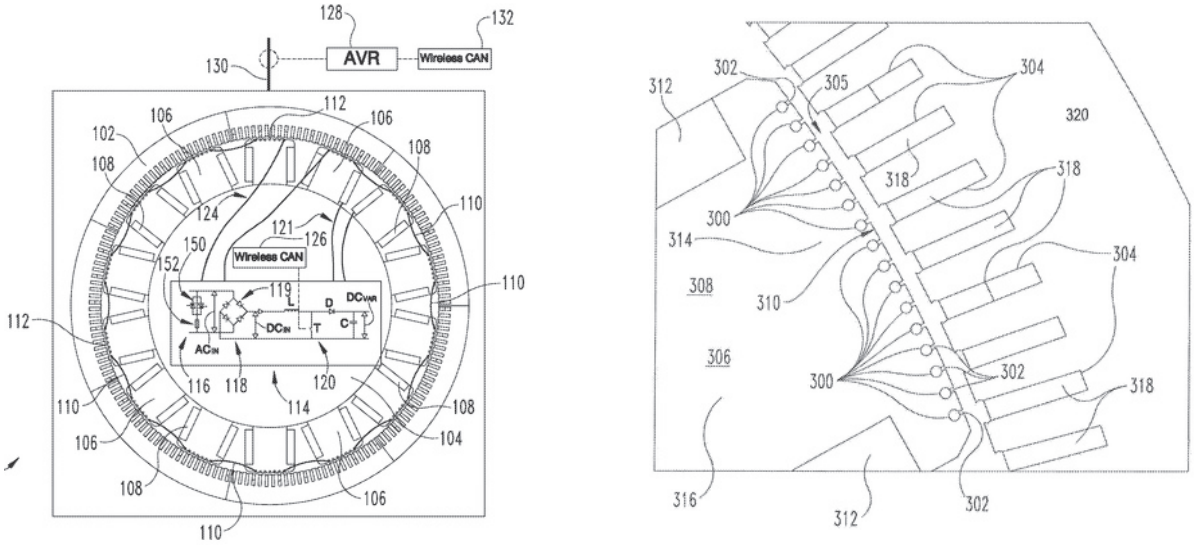


*Рис. 3. Безвозбудительная синхронная машина:*
*а – общий вид; б – полюс ротора*

тальное включение мощного IGBT транзистора, шунтирующего разрядный резистор в цепи обмотки возбуждения [23], благодаря которому при обнаружении аварии снимается напряжение с возбудителя, IGBT запирается и ток возбуждения генератора начинает протекать через разрядный резистор, что позволяет быстро погасить генератор.

Другим интересным направлением в последние годы занимается группа ученых из разных стран – это управляемые тиристорные бесщеточные возбудители для гидрогенераторов. Управляющее воздействие на тиристоры передается с помощью Bluetooth [24] (решение, предлагаемое Voith Hydro). Такие системы позволят в будущем строить гидроэлектростанции с минимальным количеством операционного персонала.

Наибольший интерес представляет собой так называемая безвозбудительная синхронная машина, предлагаемая в 2015 году ABB [25]. Это решение позволяет отказаться от отдельно стоящего возбудителя и расположить его в бочке ротора, что уменьшит массу машины на 2% , а длину вала на 20% . Помимо этого для возбуждения машины не требуется трансформатора, отдельно стоящего полупроводникового преобразователя и самого возбудителя на валу.

Обмотка возбудителя располагается на полюсах ротора (рис. 3, б, поз. 300), питается от индуцируемых в воздушном зазоре гармоник и питает обмотку возбуждения машины (рис. 3, б, поз. 312) через управляемый автоматическим регулятором полупроводниковый преобразователь по беспроводному протоколу Wireless CAN (рис. 3, а, поз. 128).

## Заключение

Несмотря на бурное развитие возобновляемой энергетики в мире и в Российской Федерации, основным источником электроэнергии остаются синхронные генераторы, к которым будут предъявляться все более жесткие требования по стоимости, эффективности и надежности. Те же требования предъявляются и к системам возбуждения, в развитие которых наблюдаются следующие тенденции:

– увеличение единичной мощности полупроводниковых приборов приводит к увеличению единичной мощности выпрямителей систем возбуждения и постепенному отказу от параллельного соединения тиристоров;

– в системах возбуждения появляются дополнительные функции, такие как защита генератора и его диагностика;

– применение управляемых бесщеточных возбудителей для возбуждения гидрогенераторов;

– отказ от машин с традиционным бесщеточным возбудителем в пользу безвозбудительных машин.

## Библиографический список

1. World Energy Outlook 2018. URL: https://www.iea.org/weo (дата обращения: 27.12.2018).

2. *Глебов И. А., Данилевич Я. Б.* Научные основы проектирования турбогенераторов. Л.: Наука, 1986. 184 с.

3. *Глебов И. А.* Системы возбуждения мощных синхронных машин. Л.: Наука, 1979. 316 с.

4. *Глебов И. А.* Научные основы проектирования систем возбуждения мощных синхронных машин. Л.: Наука, 1988. 332 с.

Научное издание

# ЗАВАЛИШИНСКИЕ ЧТЕНИЯ '19

## Сборник докладов

## 17–20 апреля 2019 г.

Ответственный за выпуск:
доктор технических наук, профессор *В. Ф. Шишлаков*

Редактор *Е. В. Торопова*
Компьютерная верстка *А. Н. Колешко*

---

Подписано к печати 12.04.19. Формат 60 × 84 1/8.
Усл. печ. л. 40,2. Уч.-изд. л. 39,2. Тираж 150 экз. Заказ № 137.

---

Редакционно-издательский центр ГУАП
190000, Санкт-Петербург, Б. Морская ул., 67