САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ФИЛИАЛ ИНСТИТУТА ИСТОРИИ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ И ТЕХНИКИ ИМ. С.И. ВАВИЛОВА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

Академическая кафедра истории и философии науки

Реферат к кандидатскому экзамену

«История и философия науки»

на тему:

«ЗАРОЖДЕНИЕ И РАЗВИТИЕ НАУЧНОГО ЗНАНИЯ О БЕСЩЕТОЧНЫХ ВОЗБУДИТЕЛЯХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН»

Реферат аспиранта ФГБУН «ИЭЭ РАН»

Кукушкина Дениса Валерьевича

Научный руководитель

Д.т.н., Чубраева Л.И.

Руководитель аспирантской группы

Д.ф.н., Мангасарян В.Н.

Санкт-Петербург
2019 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение 3
Глава 1 История развития теории электрических машин 6
Глава 2 История развития систем возбуждения 8
2.1 Развитие систем возбуждение в XIX и в начале XX веков 8
2.2 Развитие статических систем возбуждение с управляемыми ионными преобразователями 10
2.3 Развитие статических систем возбуждение с кремниевыми преобразователями 11
Глава 3 Бесщёточные возбудители синхронных машин 13
Заключение 16
Список литературы 17

ВВЕДЕНИЕ

На протяжении всего XX и начала XXI веков 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 такая ситуация сохранится до 2040 г. [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 бесщеточного возбудителя, который позволяет отказаться от дорогостоящего в обслуживании щеточного контакта, предназначенного для передачи тока возбуждения поля ротора от статической системы возбуждения [3], [4], [5].

Бесщеточный возбудитель представляет собой обращённую электрическую машину, якорь которой закреплен на вале генератора и питает обмотку возбуждения генератора через вращающийся полупроводниковый выпрямитель. Вращающийся выпрямитель проставляет собой управляемый или неуправляемый шестипульсный выпрямитель с несколькими параллельными полупроводниковыми приборами в плече, каждый из которых защищаются 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, т.к. щеточный контакт на такие токи крайне сложен в изготовлении и в обслуживании. В последние годы наметилась тенденция на установку 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 стороны обеспечивает высокое быстродействие за счет применения управляемых полупроводниковых приборов во вращающемся выпрямителе [5].

Вместе с распространением бесщеточных возбудителей встал вопрос об его диагностике, затрудненной отсутствием возможности прямого измерения электрических параметров вращающегося выпрямителя. В СССР и РФ был произведен ряд работ, посвященных на диагностике проводимости ветви [3], [10] и обнаружению коротких замыканий [11], [12], [13] вращающегося преобразователя. Однако эти подходы не позволяют определить короткое замыкание с требуемой точностью и быстродействием во вращающихся возбудителях крупных генераторов. Для разработки новых защит и средств диагностики требуется подготовить теоретическое обоснование возникновения высших гармоник в токе бесщеточного возбудителя во время аварийных ситуаций и переходных процессов.

Помимо разработки защит в последние годы актуальным стал вопрос о превентивной диагностике [14], [15] и оптимизации режимов работы [16] всего основного и вспомогательного оборудования электростанций, что требует мультидисциплинарного моделирования методом конечных элементов каждой из подсистем энергоблока. Применение данного подхода позволит с требуемой точностью диагностировать фактическое состояние оборудования и выдавать рекомендации по продлению его ресурса.

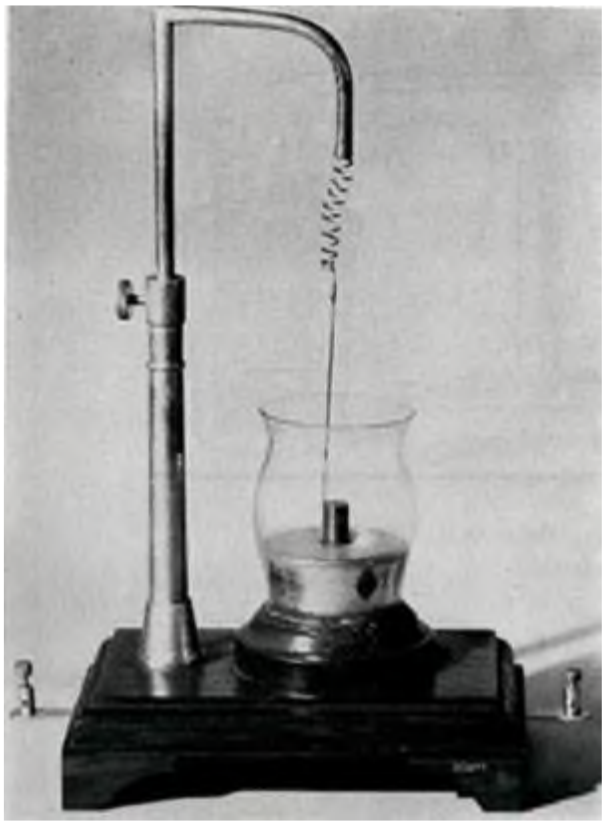
Все эти вопросы невозможно рассматривать, не принимая во внимание историю развития научных знаний о бесщеточных возбудителях, статических системах возбуждения и электрических машин в целом.

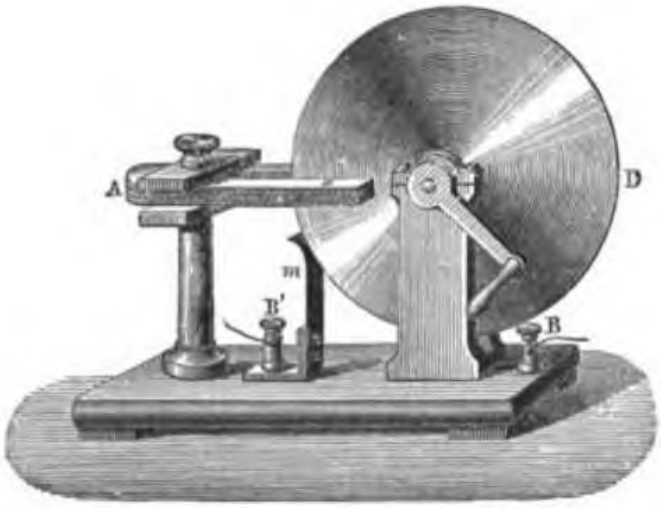
Данная работа состоит из введения, трех глав и заключения:

- В первой главе будет приведена история развития электродинамики и теории электрических машин;
- Во второй главе будет дан обзор истории развития статических систем возбуждения;
- В третьей главе приведена история развития бесщёточных возбудителей синхронных машин.

ГЛАВА 1 ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Впервые электромагнитное преобразование было произведено в 1822 года, когда Майкл Фарадей обнаружил, что на проводник с током, помещенный в магнитное поле, действует электромагнитная сила, приводящая его в движение (Рисунок 1-1, а). Обратное преобразование механической энергии в электрическую, так же произвел М. Фарадей в своем опыте с диском (Рисунок **1-1**, б). Эксперименты в области электродинамики принесли Фарадею широкую известность, но его теоретические работы не производили большого впечатления на современников, но были отмечены Максвеллом, который развил их в теорию электромагнитного поля [17].





а) «Вращяющийся провод Фарадея» б) «Диск Фарадея»

Рисунок 1-1 Опыты М. Фарадея

Максвелл использовал экспериментальные данные Фарадея и Томпсона и нашел для них математические доказательства [18]. Написан несколько трудов по электромагнетизму, теории электрического поля он создал фундамент теории электрических машин.

В России в 1838 году Б. С. Якоби продемонстрировал первый в мире электротранспорт на реке Неве.

Потенциал электромеханического преобразования раньше всех оценил В. Сименс – один из изобретателей генератора постоянного тока в своем докладе, который был зачитан в 1867 года в берлинской Академии наук.

Наиболее бурное развитие электромеханики связано с изобретениями М.О. Доливо-Добровольским - трехфазной системы, асинхронного двигателя, конструкция которого не претерпела значительных изменений до сих пор. Им же был изобретен трансформатор и конструкция статора с распределенной обмоткой.

ГЛАВА 2 ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ ВОЗБУЖДЕНИЯ

2.1 Развитие систем возбуждение в XIX и в начале XX веков

Развитие систем возбуждения непосредственно связано с самим развитием синхронных машин [3]. Обе схемы статических систем возбуждения – независимая и самовозбуждения, применяемые в возбуждении синхронных генераторов и теперь [18], известны с изобретения самих синхронных генераторов переменного тока.

Уже в 1848 году Брэтт применил электромагниты питаемые по схеме самовозбуждения с обмотки якоря выпрямленный через механический коммутатор без применения регулятора, что приводило к значительным колебаниям напряжения при изменении нагрузки [3].

Следующие шаги на пути стабилизации напряжения систем самовозбуждения были сделаны Цицерновским и Дери в 1882 году в Будапеште, которые разработали однофазный генератор с последовательным компаундированием вольтодобавочным трансформатором [3].

В этот период машины постоянного тока по своим технико-экономическим показателям и надёжности превосходили переменные. В том числе благодаря коллекторам машин постоянного тока, которые превосходили механические коммутаторы систем возбуждения машин переменного тока. Это позволило П.Н. Яблочкову применить в его генераторе переменного тока машину постоянного тока в качестве независимого возбудителя, что в последствие получило широкое развитие в цепях возбуждения синхронных машин всех типов [19].

До создания в конце XIX века трехфазной системы М.О. Доливо-Добровольским работы в области машин переменного тока и их возбуждения были не так популярны. Однако, интерес к генераторам переменного тока, следовательно, и к их возбуждению значительно возрос с популяризацией трехфазной системы. Работы были направлены на совершенствование независимых возбудителей – генераторов постоянного тока и развитие теории систем самовозбуждении в установившихся режимах [3].

С появлением трехфазных машин были представлены и трехфазные механические выпрямители, которые были основаны на работе Цицерновского и Дери. Было применено фазное компаундирование с последовательным соединением двух обмоток. ЭДС в цепи питания механического выпрямителя имела две составляющие – первая была пропорциональна току и создавалась последовательным вольтодобавочным трансформатором, вторая была пропорциональна напряжению генератора и получалось либо с трансформаторов установленных на выводах генераторах, либо с отпаек с обмотки статора. Данный тип систем не нашел широкого применения из-за искрения механического выпрямителя, но позднее при усовершенствовании выпрямителей [20], [21] нашли применение для синхронных машин небольшой мощностей.

М.О. Доливо-Добровольский применил в системах самовозбуждения алюминиевые выпрямители [22]. Однако из-за малой мощности таких выпрямителей фирма AEG использовала этот способ для возбуждения возбудителей, с компаундированием по полному току якоря синхронного генератора.

В 1909-1913 гг. А.Г. Белявский [23] возбудил генератор переменного тока по схеме самовозбуждения с помощью ртутных выпрямителей. Напряжение понижалось с помощью трансформатора, а компаундирование достигалось с помощью трехфазного последовательного трансформатора с воздушным зазором.

Достоинством схем с компаундированием, при которых обеспечивалась прямое воздействие тока генератора на напряжение его возбуждения, являлось высокое быстродействие и эффективное поддержание напряжение на вывозах генератора при изменении нагрузки. Такие схемы нашил широкое применение в автономных системах промышленный предприятий и судовых установок с достаточно мощными короткозамкнутыми асинхронными двигателями [24].

С развитием преобразовательной техники выпрямители систем возбуждения, по своим технико-экономическим показателям и надежности

находили все более широкое применение. Большой вклад в развитие полупроводниковой техники систем возбуждения сделал С. Б. Юдицкий [24]. Его работы завершились созданием серии генераторов небольшой мощности с селеновыми выпрямителями.

2.2 Развитие статических систем возбуждение с управляемыми ионными преобразователями

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

В СССР и за рубежом были опубликованы ряд работ о исследованиях синхронных машин разной мощности с управляемыми ртутными выпрямителями [26], [27], [28], которые повлекли за собой массовое внедрение систем ионного возбуждения в Советском Союзе, который занял лидерские позиции в этой тематике [3] и позволило накопить опыт в разработке, создании, наладке и эксплуатации для создания, в последствии, 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, что было обусловлено их значительными преимуществами, которые заключались в высоком быстродействии и сильном регулировании, которое повышало статическую и динамическую устойчивость [29] и позволяло интенсивно демпфировать качания роторов синхронных машин в послеаварийных режимах, а также форсировать возбуждение при просадках напряжения во время аварийных режимов в течении нескольких десятков секунд, позволяющие оперативному персоналу принять необходимые

меры для ликвидации аварии. В СССР системами ионного возбуждения были разработаны для ряда турбо- и гидрогенераторов мощность до 500 МВт, а в США, ФРГ и Швейцарии системами 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.

2.3 Развитие статических систем возбуждение с кремниевыми преобразователями

Структура статические системы возбуждения (Рисунок 2-1) 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 или разрядное сопротивление.

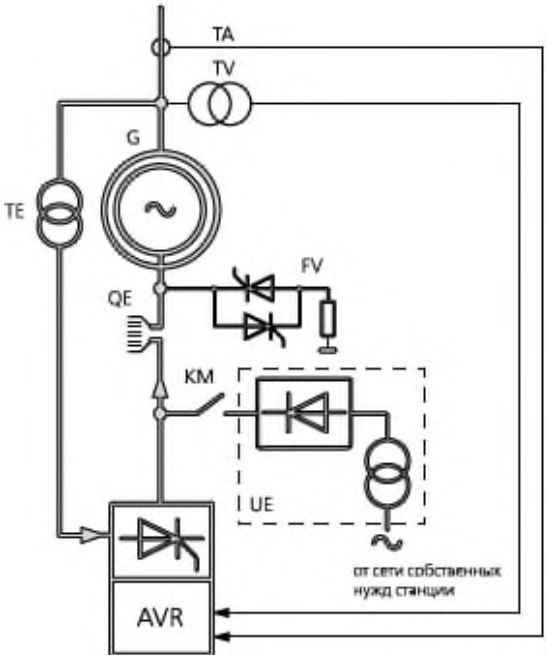


Рисунок 2-1 Структура системы самовозбуждения

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, производимые

ведущими фирмами в России и за рубежом 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 стало замена дорогих, громоздких и ненадежных аналоговых автоматических регуляторов цифровыми [30], которые позволяют быстро и точно производить наладку системы. Этот процесс стартовал в 80-ые 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 [31].

Применение микропроцессорной техники позволило реализовать в статических системах возбуждения дополнительные функции такие как динамическое распределение токов среди параллельных тиристоров [32], систему контроля вращающихся диодов бесщеточных выпрямителей для мощных турбогенераторов, устройства защиты и автоматики генератора и системы возбуждения [33].

Основным недостатком статических систем возбуждения, как уже отмечалось ранее – это наличие щеток и контактны колец на роторе [34]. Для мощных турбогенераторов с номинальными токами возбуждения около 10 кА изготовление щеточного контакта и его обслуживание является сложной и дорогостоящей задачей. Современный бесщеточный возбудитель особенно для гидрогенераторов и крупных турбогенераторов позволит значительно снизить эксплуатационные затраты и повысить надежность всего агрегата в целом.

ГЛАВА 3 БЕСЩЁТОЧНЫЕ ВОЗБУДИТЕЛИ СИНХРОННЫХ МАШИН

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

Идея создание бесщёточного возбудителя была впервые высказана О. Ирион в 1927 г. [32]. Впоследствии многочисленные исследования проводились в СССР и за рубежом. В 60-х годах фирма Westinghouse разработала возбудитель для турбогенератора 50 МВА 3600 об/мин [33]. Обращенный трехфазный генератор подключен к вращающемуся выпрямительному блоку собранный по мостовой схеме с двумя последовательными и тремя параллельными кремниевыми диодами в плече. Защита диодов осуществлялась быстродействующими предохранителями. Регулирование осуществлялось 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 бесщеточного возбудителя 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 мощность. 500, 1000 и 1200 МВТ. Были 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 установили защитные кольца, которые подключены к устройству защиты от перенапряжений и защищают обмотку возбуждения бесщеточного генератора от перенапряжений.

В системах бесщеточного возбуждения используется устройство контроля вращающегося выпрямителя УКВВ-М [33]. 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 [37]. Несмотря на все свои преимущества, вращающийся тиристорный возбудитель, не обеспечивал необходимый уровень надежности и в массовое производство такие машины не пошли.

Не менее важной проблемой является гашение поля генератора с бесщеточным возбудителем, т.к. в цепи ротора генератора нет коммутационной аппаратуры, которая могла бы быстро погасить поле в случае нештатной работы. Наиболее интересной работой, осуществленной в 2013 году группой Мадридских ученых, обладающей простотой реализации и надежностью представляет собой включение мощного IGBT транзистора, шунтирующего разрядный резистор в цепи обмотке возбуждения [38]. 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. Управляющее воздействие на тиристоры передается с помощью

Bluetooth [39] решение, предлагаемое Voith Hydro (Рисунок **3-1**) или Wireless CAN связи [39], предлагаемое ABB. Такие системы позволят в будущем строить гидроэлектростанции с минимальным количеством операционного персонала.

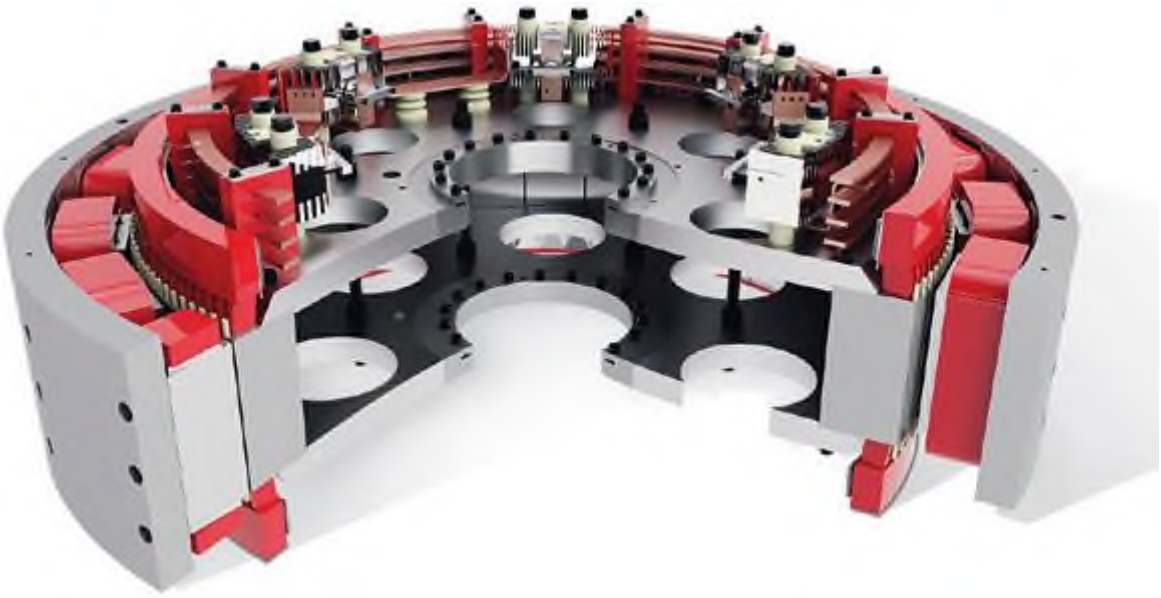


Рисунок 3-1 Разрез вращающегося возбудителя Voith

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие электромеханики привело к возникновению одним из самых важных для современной экономики изобретений – электрические двигатели и генераторы. Электрические машины – неотъемлемая часть любого промышленного предприятия, а в преддверии очередной транспортной революции – переходе на электротранспорт, потребность в новых надежных и экономичных источниках электроэнергии только возрастает несмотря на трудности в экономике России и мире.

Согласно прогнозу Международной энергетической ассоциации [1] выработка электроэнергии ГЭС и АЭС вырастет на 20%, что потребует от производителей электрогенерирующего оборудования решение задач по повышению надежности, удешевлению в эксплуатации турбо- и гидрогенераторов. Это задача может быть частично решена с применением новых быстродействующих бесщеточных систем возбуждения с новыми средствами защиты и диагностики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. World Energy Outlook 2018 [Электронный ресурс] // Веб-сайт Международного энергетического агентства: [сайт]. [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 pp.

3. Глебов И.А. Системы возбуждения мощных синхронных машин. Л.: Наука. Ленинград. отд-ние, 1979. 316 с.

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

5. Nøland J.K. A New Paradigm for Large Brushless Hydrogenerators, Acta Universitatis Upsaliensis, Uppsala, Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy 2017.

6. Alstom. GIGATOP 4-pole hydrogen and water-cooled turbogenerator for nuclear power 2013. URL: https://www.electricityconnect.com/upload_fichier/1439991723_alstom_gigatop-4-pole-hydrogen-and-water-cooled-turbogenerator.pdf (дата обращения: 26.12.2018).

7. BRUSH Turbogenerators. DAX 2-Pole Turbogenerators // Веб-сайт компании "Brush". 2012. URL: https://www.brush-sem.cz/soubory/DAX.pdf (дата обращения: 25.12.2018).

8. Alstom. Brushless Exciter for Hydro Generators 2011. URL: https://docplayer.net/20868199-Brushless-excitation-for-hydro-generators.html (дата обращения: 26.12.2018).

9. GE Energy. Synchronous Hydro Generators // Hydro | Power Conversion. 2011. URL: https://www.gepowerconversion.com/sites/gepc/files/product/Hydro%20Generator%20Brochure.pdf (дата обращения: 25.12.2018).

10. Егоров Л.Г. Автономное устройство контроля бесщеточных возбудителей мощных турбогенераторов АЭС // Сборник "Электросила", № 43, 2004.

11. Бирюков Ю.А., Воробой В.К. Защита бесщеточных возбудителей мощных синхронных машин от коротких замыканий // В кн.: Сб.науч.тр. "Вопросы надежности и управления качеством изготовления мощных синхронных

генераторов". Л.: ВНИИэлектромаш, 1982. С. 145-152.

12. Танич Л.П. Исследование электромагнитных полей и гармонических составляющих токов бесщеточного возбудителя, ВНИИэлектромаш, Л., Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук 1977.

13. Круг А.Е. Функциональная диагностика неисправностей и защита вращяющегося возбудителя оборудования бесщеточного дизельного синхронного генератора // Сб. "Электросила", No. 40, 2001. pp. 92-102.

14. Голоднова О.С. Некоторые проблемы интеллектуализации эксплуатации турбогенераторов на электростанциях (предпосылки, препятствия, значимость, примеры) // Сб. научн.тр. «Инноватика и экспертиза», № 2, 2016. С. 149-161.

15. GE Power. Generator Health Monitoring // Веб-сайт компании GE. 2016. URL: https://www.ge.com/content/dam/gepower-pgdp/global/en_US/documents/service/generator%20services/generator-health-monitoring-brochure.pdf (дата обращения: 28.12.2018).

16. На Казанской ТЭЦ-1 успешно введены в эксплуатацию два новых энергоблока на основе газотурбинной технологии GE [Электронный ресурс] // Веб-сайт компании GE: [сайт]. [2018]. URL: https://www.genewsroom.com/press-releases/%D0%BD%D0%B0-%D0%BA%D0%B0%D0%B7%D0%B0%D0%BD%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%B9-%D1%82%D1%8D%D1%86-1-%D1%83%D1%81%D0%BF%D0%B5%D1%88%D0%BD%D0%BE-%D0%B2%D0%B2%D0%B5%D0%B4%D0%B5%D0%BD%D1%8B-%D0%B2-%D1%8D%D0%BA%D1%81%D0%BF%D0%BB% (дата обращения: 29.12.2018).

17. Спасский Б.И. История физики. Часть I. Учеб. пособие для вузов. 2-е изд. М.: Высшая школа, 1977. 320 с.

18. Спасский Б.И. История физики. Часть II. Учеб. пособие для вузов. 2-е изд. М.: Высшая школа, 1977. 309 с.

19. Системы возбуждения [Электронный ресурс] // Веб-сайт ПАО "Силовые машины": [сайт]. [2019]. URL: http://www.power-m.ru/customers/hydropower/excitation-system-and-a-trigger-device/ (дата обращения: 31.01.2019).

20. Шателен М... Русские электротехники XIX века. М.: Госэнергоиздвт, 1955. 160-161 с.

21. Каплянский А. Е. Самовозбуждающаяся синхронная машина, Авторское свидетельство на изобретение №31501, Apr 22, 1927.

22. Таманцев С. Г. Синхронный генератор с самовозбуждением механического возбудителя и автоматиечским регулированием напряжения // Электричество, № 3, 1952. С. 3-7.

23. Цукерник А. В. Роль М.О. Доливо-Добровольского в создании схем компаундирования синхронных машин // Электричество, № 11, 1952. С. 70-71.

24. Беявский А. Г. Прменение ртутного выпрямителя для регулирования напряжения альтернатора // Известия Донского политехнического института в Новочеркасске, Т. 8, 1923. С. 5-8.

25. Вилесов Д. В., Рябинин И. А. Судовые самовозбуждающиеся синхронные генераторы. М.: Воениздат, 1962. 180 с.

26. Юдицкий С. Б. Синхронные машины с полупроводниковыми выпрямителями. М. - Л.: Госэнергоиздат, 1954. 152 с.

27. Шепфер К. И.., Юдицкий С. Б. Возбуждение синхронных машин от ионных выпрямителей // Изв. Ан СССР. ОТН, № 7, 1939. С. 3-16.

28. Эттингер Е. Л. Возбуждение синхронных машин от управлямых ртутных выпрямителей // Труды Всесоюзного электротехнического института, No. 46, 1941.

29. McClure J. B., Whittlesey S. I., Hartman M. E. Modern excitation systems for large synchronous machines // Electrical Engineering, T. 65, № 12, December 1946. С. 939-945.

30. Трофименко Д. Е. Об эффективности регулирования возбуждения в повышении динамической устойчивости // Тр. межвузовскй научно-техн. конференции по дальним электропередачам. Секция: пропускная способность и устойчивость дальнх электропередач. Ленинград. 1957. С. 16-29.

31. Schaefer R. C., K. K. Excitation control of the synchronous generator // IEEE Ind.

. Appl. Mag., Vol. 7, No. 2, March 2001. pp. 37-43.

32 Логинов А. Г., Фадеев А. В. Микропроцессорный автоматический регулятор
. типа АРВ-М для систем возбуждения АО «Электросила» // Электротехника, № 9, 2001.

33 Логинов А. Г. Разработка и исследование устройства автоматического
. управления нагрузками тиристоров параллельно соединенных выпрямителей систем возбуждения, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук 2006.

34 Балихин К. А., Бурмистров А. А., Егоров Л. Г., Логинов А. Г., Романов С. В.,
. Хлямков В. А., Фадеев А. В. Совершенствование микропроцессорных средств систем возбуждения генераторов // В кн.: Устойчивость и надежность электроэнергетических систем. Сб. докл НТК. Санкт-петербург: ПЭИПК, 2005.

35 NØland J. K., M. G., Alves E. F. Continuous Evolution and Modern Approaches
. of Excitation Systems for Synchronous Machines // 2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM). – IEEE. 2018. pp. 104-110.

36 Аспит В. В. Исторический обзор развития бесконтактных синхронных
. машин // В кн.: Бесконтактные электрические машины. Рига. 1970. С. 5-64.

37 Ferguson R. W. H.R..M.R.W. Analytical studies of the brushless excitation
. system // Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems., Vol. 78, No. 4, 1959. pp. 1815-1821.

38 Воробей В. К., Глебов И. А..К.В...и.д. Тиристорный бесщеточный
. возбудитель турбогенераторв мощностью 300 МВт // Электротехническая промышленость. Сер.: Электрические машины, No. 9 (55), 1975. pp. 8-10.

39 Platero C. A., et al. Enhancement of a high speed de-excitation system for
. brushless synchronous machines by large blocking voltage semiconductors // Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED), 2015 IEEE 10th International Symposium on. – IEEE. 2015. pp. 50-55.

40 VOITH. Maintenance Free Exciter // Веб-сайт корпорации Voith Hydro Holding
. GmbH & Co. 2015. URL: http://voith.com/corp-en/ t3383_Maintenance_Free_Exciter_screen.pdf (дата обращения: 01.02.2019).

41 Tremeling , Shrestha , Arshad W., Ouyang , Westerlund J. Systems and methods

. concerning exciterless synchronous machines, Заявка на патент 15726443, Jan 16, 2015.

42. Пластун А.Т., Денисенко В.И. Совмещенные возбудительные устройства с радиальной асимметрией магнитной системы: учебное пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. 440 с.

43. Фадеев А.В. Исследование и разработка систем автоматического регулирования возбуждения турбогенераторов мощностью 200-1200 МВт с бесщеточными возбудителями, ВЭИ им. В.И. Ленина, Москва, Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук 1979.

44. Федоров ВФ, редактор. Бесщеточные системы возбуждения мощных синхронных машин: Сб.науч.тр. Л.: ВНИИэлектромаш, 1986. 172 с.

45. Голоднова О.С. Нарушение в работе энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000 из-за отказов вращяющегося выпрямителей бесщеточных возбудителей генераторов, ОАО "ВНИИАЭС", М., Информационное сообщение №696-ЦАЭ/04, 2004.

46. Статистика | Министерство энергетики [Электронный ресурс] // Веб-сайт Министерства энергетики Российской Федерации: [сайт]. [2018]. URL: https://minenergo.gov.ru/activity/statistic (дата обращения: 27.12.2018).