

МАГНИТНЫЕ СИСТЕМЫ БЕСКОНТАКТНЫХ РЕГУЛИРУЕМЫХ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ С ОСНОВНЫМ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Б.Н. Гомберг¹, А.И. Согрин², Т.А. Казанцева¹

¹ АО «НПО «Электромашина», г. Челябинск, Россия,

² Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

Статья посвящена поиску и исследованию направлений оптимизации магнитных систем бесконтактных синхронных генераторов мощностью 30–50 кВА, используемых в автономных системах электроснабжения наземных подвижных объектов. Основное внимание уделено электрическим генераторам с комбинированной системой возбуждения, поток воздушного зазора которых создается совместным действием постоянных магнитов основного индуктора и электромагнитным регулировочным звеном, необходимым для поддержания постоянства выходного напряжения при изменении частоты вращения ротора и нагрузки генератора. По убеждению авторов, при увеличении мощности источника свыше 30–35 кВА на смену машинам постоянного тока придут генераторы именно такого типа. В статье также описана машина с принципиально новой магнитной системой, которая содержит элементы конструкции электрических машин цилиндрической и торцовой формы. Предлагаемая магнитная система, по мнению авторов, позволяет наиболее полно использовать потенциальные возможности, заложенные в машинах обеих форм, улучшить удельные характеристики и, что весьма важно, сохранить наивысшую техническую надежность, присущую бесконтактным электромеханическим преобразователям.

Ключевые слова: синхронный генератор, магнитная система, комбинированное возбуждение, внутризамкнутый поток, постоянный магнит, регулирование напряжения, машинный агрегат.

Введение

Мощность автономных источников электрической энергии, установленных на движущихся по земле транспортных средствах (далее по тексту – объектах) и в особенности на объектах специального назначения, например, военных гусеничных машинах (ВГМ), непрерывно возрастает. Так, мощность генераторов постоянного тока ВГМ за вторую половину прошлого века увеличилась более чем в 6 раз и достигла 18–20 кВт. Причиной этого роста является тот факт, что улучшение эксплуатационных параметров гражданской техники и повышение тактико-технических характеристик военных машин достигают в основном путем установки на борт транспортного средства все новых систем и изделий, для функционирования которых необходима электрическая энергия. Эта тенденция сохраняется и в настоящее время. По имеющимся прогнозам, суммарная мощность потребителей электроэнергии на ВГМ к 2030 году составит уже 30–35 кВт.

Объем пространства внутри объекта, где может быть размещено вышеуказанное оборудование, весьма ограничен. Поэтому к вновь разрабатываемым и модернизируемым электрическим устройствам, и к источникам электроэнергии в частности, предъявляются жесткие требования по удельным мощностным и массогабаритным параметрам. Для электрических машин, работающих на объектах авиационной и космической техники, такое требование становится определяющим. В этой связи весьма перспективными для данного

применения выглядят электрические машины с возбуждением от постоянных магнитов, обладающие на сегодняшний день наилучшими массогабаритными показателями.

Проблема регулирования и стабилизации выходного напряжения таких машин имеет несколько известных технических решений. Первый способ связан с введением во внешнюю электрическую цепь генератора регулировочных звеньев: управляемого полупроводникового преобразователя [1–7], емкостных элементов или дросселей насыщения [8–10]. Отметим, что по мере увеличения мощности генератора этот путь становится все более энергозатратным и существенно затрудняет обеспечение электромагнитной совместимости потребителей внутри и даже вне объекта, а также резко ухудшает эксплуатационные и удельные характеристики источника электроэнергии.

Другой путь связан с введением специальных регулировочных звеньев в магнитную систему генератора [9–15]. Данный способ регулирования напряжения отличается большим разнообразием возможных вариантов реализации, при этом поиск наилучшего решения нельзя считать завершенным.

Настоящая статья посвящена дальнейшему поиску и исследованию некоторых направлений оптимизации магнитных систем бесконтактных автономных синхронных генераторов мощностью 30–50 кВА, имеющих основное магнитоэлектрическое возбуждение и регулировочное звено, необходимое для поддержания постоянства выходного напряжения (электромагнитное возбуждение).

В качестве одного из перспективных направлений в статье рассматривается магнитная система, являющаяся дальнейшим развитием идей, изложенных в [14]. В статье также описана машина с принципиально новой магнитной системой, которая содержит элементы конструкции электрических машин с радиальным и аксиальным возбуждением. Предлагаемая магнитная система, по мнению авторов, позволяет наиболее полно использовать потенциальные возможности, заложенные в машинах обеих форм, улучшить удельные характеристики и, что весьма важно, сохранить наивысшую техническую надежность, присущую бесконтактным электромеханическим преобразователям.

В [9, 11] установлено, что при указанном диапазоне мощности звено электромагнитного возбуждения наиболее эффективно при двухстороннем расположении обмоток, образующих эту систему, поэтому далее речь пойдет только о магнитных системах, учитывающих данную рекомендацию.

Формат статьи исключает возможность подробного описания конструкции рассматриваемых магнитных систем. Кроме того, конструкция изделия отражает специфику конкретного предприятия-изготовителя, его проектную школу, имеющиеся именно у данного предприятия производственные и технологические возможности. В определенной степени эти важнейшие для практики сведения можно почерпнуть в [16]. По этим же причинам иллюстрации, содержащиеся в статье, выполнены в виде эскизов рассматриваемых магнитных систем. При этом в целях повышения наглядности и упрощения графики рисунков эти эскизы являются продольным или поперечным сечением магнитной системы, а масштабы изображения некоторых элементов могут быть несколько увеличены.

Статья излагает результаты опытно-конструкторских работ по указанной тематике, которые на протяжении ряда лет проводились в АО «НПО «Электромашин» совместно с Южно-Уральским государственным университетом.

Постановка задачи

По совокупности характеристик в качестве автономного источника электроэнергии на движущихся по земле объектах наиболее часто применяют синхронный генератор с электромагнитным или комбинированным (магнитоэлектрическим (от постоянных магнитов) и электромагнитным) возбуждением. Генератор с помощью механической передачи приводится во вращение основным двигателем объекта. Частота вращения и нагрузка генератора при эксплуатации движущегося объекта не постоянны, они независимо друг от друга изменяются в определенном диапазоне значений. Таким образом, термин «автономный» становится в нашем случае синонимом слова «регулируемый», причем под «регулированием» под-

разумевают поддержание в заданных пределах напряжения источника.

К сожалению, ожидание прогресса в улучшении магнитных характеристик магнитомягких материалов (листовых электротехнических сталей) затянулось на десятилетия. В то же время происходит непрерывное существенное повышение удельной магнитной энергии магнитотвердых материалов (постоянных магнитов). Выше уже было указано, что на реальных объектах весьма проблематично «выкроить» дополнительные объемы для генераторов при необходимости повышения их мощности. Добавим к этому, что для наземных объектов большие препятствия возникают при попытках применения интенсивных систем охлаждения – столбовой дороги, принятой для решения этой задачи на летательных аппаратах. Так, например, для электрооборудования ВГМ применяется в настоящее время только один способ охлаждения – воздушный. В этих условиях одним из наиболее доступных направлений для повышения удельной мощности автономных бесконтактных синхронных генераторов становится переход от электромагнитного возбуждения к комбинированному с основным возбуждением от постоянных магнитов и регулировочным звеном с электромагнитным управлением. Однако широкому внедрению этого логичного и прогрессивного предложения препятствует наличие ряда сопутствующих ему технических проблем, в первую очередь вызванных отсутствием простых технических решений, обеспечивающих регулирование в широких пределах потока постоянного магнита в рабочем воздушном зазоре машины.

Как известно, задача может быть решена несколькими методами, наиболее проработанными из которых являются следующие.

1. Метод, который условно можно назвать «механическим регулированием». Метод состоит в том, что магнитная система индуктора составляется из нескольких (как минимум из двух) пакетов постоянных магнитов, имеющих возможность перемещения (поворота) друг относительно друга. Тем самым коллинеарность и направление векторов магнитодвижущих сил (МДС) магнитов можно изменить от согласованного до встречного. Такой индуктор, состоящий из трех когтеобразных пакетов с магнитами в виде «шайб», намагниченных аксиально, имел тракторный генератор Г-12, выпущенный заводом электромашин в 1960–1970 годах [14]. У этого генератора один пакет имел возможность под действием центробежного регулятора поворачиваться относительно двух других, неподвижно закрепленных на валу. Максимальное смещение подвижного пакета составляло одно полюсное деление. В этом положении суммарный магнитный поток индуктора составлял одну треть от максимального, когда все три пакета работают согласованно.

2. Метод уменьшения магнитной проводимости отдельных участков магнитной цепи машины, локализованных вдоль силовой линии рабочего магнитного потока. Уменьшение магнитной проводимости участка достигается путем его подмагничивания до насыщения, выполняемого с помощью специальной обмотки. При практическом применении в авиационных генераторах в середине прошлого века подмагничиванию подверглась «спинка» статора.

Разновидностью данного метода является метод подмагничивания участков торцовых потоков рассеяния магнитоэлектрического индуктора [10].

3. Метод «регулируемого шунта», состоящий в том, что параллельно постоянному магниту через вспомогательные воздушные зазоры подключен дополнительный неподвижный магнитопровод (шунт), по которому замыкается магнитный поток, значение и направление которого зависит от МДС обмотки возбуждения, размещенной на шунте [15, 17]. Для описания сути процесса регулирования в первом приближении, полагая, что насыщение участков магнитной цепи отсутствует, можно воспользоваться методом наложения. Тогда значение потока в рабочем воздушном зазоре машины с «регулируемым шунтом» определяется алгебраическим сложением двух потоков: полезного потока постоянного магнита (поток магнита за вычетом потока рассеяния и потока, отводимого в шунт) и потока, создаваемого обмоткой возбуждения. Первый из них – это основная составляющая суммарного потока в воздушном зазоре, она остается практически неизменной при всех режимах работы генератора, второй – определяется МДС обмотки возбуждения и характеризует регулировочные свойства машины. Так как индуктированная в обмотке якоря ЭДС создается совместным действием потоков постоянного магнита и обмотки возбуждения, в данном случае правомерно говорить о комбинированном возбуждении. Для этого класса машин далее будем применять обозначение БСГКВ – бесконтактный синхронный генератор с комбинированным возбуждением.

4. Метод агрегатирования машин, при котором два синхронных генератора, один (основной) с магнитоэлектрическим, а второй с электромагнитным возбуждением, соединяют между собой последовательно (общий статор с единой якорной обмоткой) и помещают в общий корпус, где два индуктора расположены на одном валу. Сюда же можно отнести машинные агрегаты, у которых каждый генератор имеет свой статор и свою якорную обмотку, причем обе якорные обмотки соединены между собой последовательно. Оба статора с обмотками помещены в общий корпус. Можно также выходное напряжение каждого генератора вывести на отдельные клеммы, позволяющие подключить внешних потребителей. Агрегатированные машины далее будем обозначать БРИ – бесконтактный регулируемый источник.

Наиболее широкое практическое применение в качестве автономных источников электроэнергии движущихся объектов получили бесконтактные синхронные генераторы с «регулируемым шунтом» (БСГКВ) и некоторые БРИ, в частности, с регулируемым звеном в виде индукторной машины [11]. Генераторы, в которых используют другие методы регулирования потока постоянного магнита, описанные выше, по разным причинам выпускались промышленностью только в ограниченных случаях. И наоборот, БСГКВ начиная с 70-х годов прошлого века активно изучаются, разрабатываются и изготавливаются [18–21]. При этом наряду с уточнением теории и методики проектирования таких машин, продолжается активный поиск путей оптимизации их конструктивного исполнения, в первую очередь, конфигурации магнитной системы, от которой в большой, можно сказать определяющей, степени зависят их удельные мощностные и массогабаритные характеристики.

Направления оптимизации конструкции бесконтактных автономных синхронных генераторов

1. Магнитные системы индукторов опорных и регулировочных звеньев БСГКВ

Индуктор опорного (магнитоэлектрического) генератора БСГКВ имеет обычную «классическую» конструкцию, которая может представлять собой одну из трех типовых (базовых) разновидностей магнитных систем ротора:

- ротор с постоянными магнитами типа «звездочка»;
- ротор с призматическими магнитами;
- когтеобразный ротор с постоянным магнитом типа «шайба» или «диск».

Достоинства и недостатки каждого из указанных типов роторов многократно описаны в научно-технической и учебно-методической литературе, и поэтому их можно считать общеизвестными, не нуждающимися в повторном изложении.

Отметим только, что ротор с призматическими магнитами, в свою очередь, тоже имеет два исполнения – с тангенциальным и радиальным намагничиванием. При этом первый из них обладает замечательным свойством: конструкция этого ротора позволяет получить в рабочем воздушном зазоре значение индукции, превышающее индукцию остаточного намагничивания постоянного магнита B_r . Кроме того, роторы такой конструкции лучше приспособлены для постоянных магнитов с высокими значениями коэрцитивной силы, например, редкоземельных, которые широко применяются в электрических машинах для спецтехники. Поэтому далее в данной статье предлагаемые конструкции магнитных систем иллюстрируются эскизами индукторов, в которых опорный генератор содержит ротор с призматическими магнитами с

Электромеханические системы

тангенциальным намагничиванием. Эскиз такого ротора приведен на рис. 1.

Практика проектирования [17] авиационных электрических машин с возбуждением от постоянных магнитов позволила сделать следующие рекомендации по максимально допустимой линейной скорости ротора и мощности этих машин (см. таблицу).

Приведенные выше соображения и данные служат, по нашему мнению, достаточным основанием для выбора магнитоэлектрического индуктора с призматическими магнитами в качестве первоначального варианта при разработке ротора основной (магнитоэлектрической) машины, входящей в состав бесконтактного регулируемого синхронного генератора с основным магнитоэлектрическим возбуждением. Окончательное решение о конструкции магнитной системы опорного звена БСГКВ можно принять только после анализа всех требований технического задания и расчета ряда проектных вариантов их реализации.

Магнитная система индуктора регулировочного звена БСГКВ и ее объединение с магнитной системой опорного генератора, собственно говоря, и определяет основные характерные особенности, можно сказать, облик магнитной системы всей машины. Регулировочное звено БСГКВ может быть построено на основе индукторной машины или электрической машины с когтеобразными полюсами.

Характерной особенностью индукторных машин является неизменность направления магнитной индукции в воздушном зазоре и связанное с этим обстоятельством недоиспользование объема магнитной системы.

Машина с когтеобразным ротором имеет важные отличия от других типов, о которых шла речь выше: индукция воздушного зазора является

функцией аксиальной координаты. Другими словами, если у других электрических машин силовые линии рабочего потока лежат только в плоскостях, перпендикулярных оси вращения, то у машин с когтеобразным ротором они проходят также по участкам магнитной цепи, ориентированным вдоль этой оси. Эти участки могут находиться на наружных диаметрах статора (корпус машины), в этом случае получается класс машин с внешнезамкнутым потоком, или в областях, примыкающих к валу, или даже в самом валу, тогда получается класс машин с внутризамкнутым потоком. Лучшими удельными характеристиками обладают машины с внутризамкнутым потоком, поскольку у них меньше длина силовых линий регулировочного потока, и некоторые крупногабаритные детали, например подшипниковые щиты, могут быть выполнены из легких металлических сплавов. Классическим представителем магнитной системы с внутризамкнутым потоком принято считать синхронную машину «сексин» (secsyn – stationary exciter-coil synchronous, синхронная машина с неподвижными обмотками возбуждения). Разработками такой магнитной цепи применительно к очень популярным в 1960–1970-х годах когтеобразным роторам занимались также отечественные инженеры [14, 22, 23].

Указанные выше достоинства магнитных систем с внутризамкнутым потоком объясняют, почему интерес к ним у разработчиков электрических машин сохранился до настоящего времени. Применительно к БСГКВ преимущества магнитного провода с внутризамкнутым потоком, о которых уже шла речь выше, наиболее логично, просто и эффективно реализуются в конструкции магнитной системы регулировочного звена. Такая магнитная система обладает рядом характерных конструктивных особенностей.

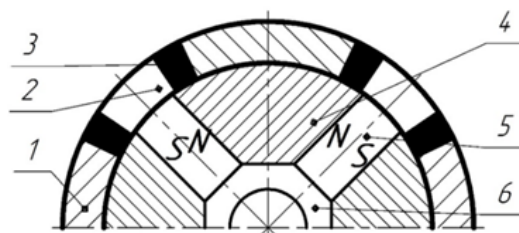


Рис. 1. Ротор с призматическими магнитами, имеющими тангенциальное намагничивание: 1 – полюсные наконечники; 2 – немагнитные участки обода; 3 – сварной шов; 4 – полюсы; 5 – магнит; 6 – немагнитная втулка

Таблица

Тип ротора	«Звездочка»	С призматическими магнитами	Когтеобразный
Максимальная окружная линейная скорость ротора, м/с	50	200 и более	100
Максимальная мощность машины, кВА	10	100 и более	20

1. Дополнительный магнитопровод (скоба), а также вся магнитная цепь индуктора располагается внутри расточки статора.

2. Полюсная система регулировочного звена (в случае когтеобразного ротора) состоит из двух групп аксиальных полюсных выступов, внешней и внутренней, соединенных одна с другой с помощью сварки немагнитной сталью. В наружной группе полюсные выступы переходят у основания в цилиндрическую часть. Полюсные выступы внутренней группы располагаются между полюсными выступами наружной группы. Полюсная система (регулирующего звена) консольно закреплена на индукторе опорного генератора и составляет с ним единую магнитную цепь.

3. Магнитный поток проходит частично по магнитомягкому валу (или втулке, одетой на вал), в этом случае вал называют «активным».

Подчеркнем, что речь идет о бесконтактных машинах, у которых на роторе нет обмоток, благодаря чему он имеет высокую прочность и допускает линейную скорость вращения до 140 м/с и более.

2. Магнитные системы БСГКВ с основным магнитоэлектрическим возбуждением

На рис. 2 представлен эскиз общеизвестной [9, 11], можно сказать, типовой магнитной системы БСГКВ с «регулируемым шунтом». Магнитная система регулировочного звена этого генера-

тора имеет магнитопровод с внутризамкнутым потоком.

Машина имеет объединенные полюсные выступы опорного и регулировочного звеньев, вследствие чего они принимают форму прямоугольных полюсных наконечников (поз. 3 и 4). У этой машины один пакет железа статора 2. Как мы условились, опорный (магнитоэлектрический) генератор имеет индуктор с призматическими тангенциально намагниченными магнитами. Магниты и полюсы 7 отделены от вала 6 немагнитной втулкой 8. Дополнительный магнитопровод (шунт) состоит из скобы 5 с обмоткой возбуждения 1 и униполярной пластины 9. Через воздушные зазоры δ_1 и δ_2 шунт подключен параллельно постоянному магниту. Если вал выполнен из магнитомягкого металла, то по нему также проходит часть потока шунта.

На рис. 2 показан вариант конструкции БСГКВ с двухсторонней системой электромагнитного возбуждения. МДС левой и правой обмоток возбуждения направлены встречно друг другу.

На рис. 3 показана развертка полюсной системы ротора БСГКВ по рис. 2. Для наглядности на этом рисунке индуктор представлен без немагнитной вставки обода (детали поз. 2 на рис. 1).

Совместная работа обеих систем возбуждения БСГКВ по рис. 2 происходит следующим образом. Когда МДС обмотки меньше МДС постоянного магнита, часть его потока отводится в шунт, не

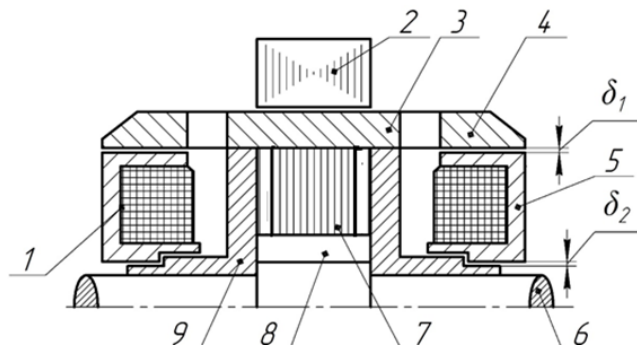


Рис. 2. Эскиз магнитной системы БСГКВ с «регулируемым шунтом»: 1 – обмотка возбуждения; 2 – пакет статора; 3, 4 – полюсные наконечники; 5 – скоба; 6 – вал; 7 – полюс; 8 – немагнитная втулка; 9 – униполярная пластина

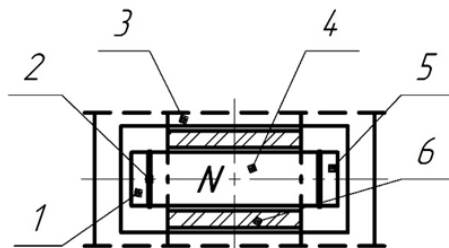


Рис. 3. Развертка полюсной системы ротора БСГКВ по рис. 2 по поверхности расточки в пределах двух полюсных делений: 1 – левая униполярная пластина; 2 – сварной шов; 3 – южный полюсный наконечник (цилиндр или обод); 4 – северный полюсный наконечник; 5 – правая униполярная пластина; 6 – магнит

попадает в статор и не участвует в наведении ЭДС в якорной обмотке. Если МДС обмотки возбуждения и постоянного магнита равны между собой, машина работает как магнитоэлектрический генератор. При дальнейшем увеличении МДС обмоток возбуждения потоки от обоих индукторов в статоре суммируются (комбинированное возбуждение).

Для повышения наглядности процесса взаимодействия потоков при токе возбуждения, не равном нулю, примем, что насыщение в магнитной цепи машины отсутствует, следовательно, все магнитные сопротивления участков магнитной цепи будут величинами постоянными и можно воспользоваться методом наложения. В силу полной симметрии левой и правой половин магнитной системы машины при ее двухстороннем возбуждении все дальнейшие положения будем относить к одной половине.

При обесточенной обмотке возбуждения поток магнита Φ_M (за вычетом потока его рассеяния Φ_σ) разделяется на два потока: один – полезный поток магнита $\Phi_{МП}$, который входит в статор и индуцирует в якорной обмотке ЭДС, и второй, $\Phi_{Ш}$, который отвлекается в шунт и в создании ЭДС не участвует. Когда по обмотке возбуждения протекает ток, то на оба вышеуказанных потока, $\Phi_{МП}$ и $\Phi_{Ш}$, накладывается поток $\Phi_{ОВ}$, значение и направление которого определяется МДС обмотки возбуждения. Результирующий магнитный поток в рабочем воздушном зазоре (еще раз подчеркнем, что это зазор между статором 2 рис. 2 и полюсной системой опорного генератора) Φ_δ определится как алгебраическая сумма потоков $\Phi_{МП}$ и $\Phi_{ОВ}$.

Вышесказанное с учетом сделанных ранее допущений отражает следующая система уравнений:

$$\Phi_\delta = \Phi_{МП} \pm \Phi_{ОВ}; \quad (1)$$

$$\Phi_{МП} = \Phi_M - \Phi_\sigma - \Phi_{Ш}. \quad (2)$$

Добавим только, что значение потока Φ_M определяется положением рабочей точки постоянного магнита на диаграмме размагничивания. Кроме того, еще раз подчеркнем, что уравнения (1) и (2) относятся к машине, имеющей половинную длину от реальной, и это необходимо учитывать при определении выходных параметров БСГКВ по рис. 2.

Регулируемый шунт БСГКВ по рис. 2 можно назвать «пассивным» в том смысле, что проходящий по скобе 5 магнитный поток влияет на наведенную в якорной обмотке ЭДС только через магнитную систему другой машины, а именно через магнитную систему опорного генератора. Другими словами, регулировочное звено в данной конструкции БСГКВ не имеет «собственных» полюсных наконечников, пакета статора и части якорной обмотки, где наводилась бы ЭДС независимо от процессов, происходящих в опорном генераторе. Пользуясь терминологией, принятой для систем автоматического регулирования, можно сказать, что в БСГКВ по рис. 2 регулирование идет исклю-

чительно по цепи возбуждения и не воздействует на главную силовую цепь машины, она остается такой же, как у опорного магнитоэлектрического генератора. В то же время регулируемый шунт требует введения в конструкцию машины дополнительных деталей (скоба, униполярные пластины, концы полюсных наконечников, выступающие за индуктор, и пр.), которые утяжеляют машину ориентировочно на 20–25 %.

Повысить эффективность использования внутреннего объема генератора и существенно увеличить диапазон регулирования его ЭДС можно, если применить конструктивные решения, предложенные в [14, 22, 23]. Наиболее наглядно существо этих предложений можно пояснить на примере однопакетного БСГКВ с односторонним расположением обмотки возбуждения (половина БСГКВ по рис. 2). Предложения сводятся к трансформации указанного БСГКВ в двоярный синхронный генератор, состоящий, в свою очередь, из одного магнитоэлектрического (основного, опорного) генератора и одного генератора с электромагнитным возбуждением (регулируемого звена). На рис. 4 представлен эскиз продольного сечения такого генератора, а на рис. 5 – развертка цилиндрической поверхности его ротора.

Каждый генератор имеет «свой» пакет статора; опорный генератор содержит пакет 4, регулировочный – пакет 6 (см. рис. 4), между пакетами организована магнитная изоляция (например, с помощью немагнитной прокладки 5). В этот сборный пакет статора уложена общая единая якорная обмотка. Машина имеет объединенный индуктор, общая магнитная цепь которого имеет две аксиальные полюсные системы 6 и 7 (см. рис. 5) соответственно для каждого из пакетов статора.

Между указанными полюсными системами создается относительный сдвиг, равный 180 электрическим градусам (см. рис. 5). Это необходимо, чтобы полезный поток магнита $\Phi_{МП}$ (в пакете статора 4) и поток магнита, отвлекаемый в шунт при МДС обмотки возбуждения меньшей, чем МДС магнита (в пакете статора 6), наводили в якорной обмотке ЭДС противоположной полярности.

Магнитные цепи магнитоэлектрического и электромагнитного генераторов включены параллельно относительно МДС магнита и последовательно относительно МДС обмотки возбуждения.

То обстоятельство, что в данной магнитной системе поток, созданный МДС обмотки возбуждения, попадая в пакет статора 6, создает часть общей ЭДС машины, является основанием для того, чтобы назвать шунт «активным».

По рис. 5 видно, что полюсная система регулировочного звена состоит из двух групп 6 и 7 аксиальных выступов, имеющих противоположные полярности, подобно полюсной системе когтеобразного индуктора. Выступы могут быть прямоугольными и одной толщины, как на рис. 4 и 5,

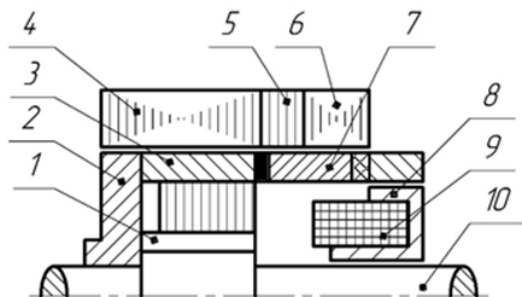


Рис. 4. Эскиз продольного сечения БСГКВ с «активным» шунтом при однопакетном исполнении: 1 – немагнитная втулка; 2 – униполярная пластина; 3 – полюсный наконечник; 4 – статор опорного генератора; 5 – немагнитная прокладка; 6 – статор регулировочного звена; 7 – полюсная система регулировочного звена; 8 – скоба; 9 – обмотка возбуждения; 10 – вал из магнитомягкого материала

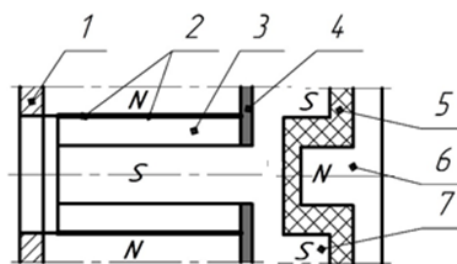


Рис. 5. Развертка полюсной системы ротора БСГКВ по рис. 4 по поверхности расточки в пределах двух полюсных делений: 1 – униполярная пластина; 2 – сварочные швы; 3 – немагнитная вставка обода (наружного цилиндра); 4 – немагнитная заливка; 5 – сварка немагнитной сталью; 6 – внешняя полюсная группа магнитной системы регулировочного звена; 7 – внутренняя полюсная группа магнитной системы регулировочного звена

или иметь другую форму, например, трапециевидную с утонением к концу выступа.

Основные магнитные потоки, характерные для этой магнитной системы, показаны на рис. 6, где так же, как в уравнениях (1) и (2), приняты следующие обозначения; $\Phi_{МП}$ – полезный поток постоянного магнита, входящий в пакет статора 3; $\Phi_{ОВ}$ – поток, определяемый МДС обмотки возбуждения. Потоки рассеяния постоянного магнита и регулировочного звена на рис. 6 не показаны.

Дополнительно к уже отмеченным выше свойствам магнитной системы БСГКВ с «активным шунтом» рис. 6 позволяет сделать следующий вывод: поток $\Phi_{ОВ}$ последовательно проходит через оба пакета статора 3 (опорного генератора) и 4 (регулирующего звена), причем при определенном направлении тока возбуждения, например, таком, как на рис. 6, потоки $\Phi_{МП}$ и $\Phi_{ОВ}$ в статоре 3

совпадали, а потоки $\Phi_{МП}$ и $\Phi_{ОВ}$ в статоре 4 были направлены встречно.

В данной конструкции вал машины или в некоторых модификациях втулка, одетая на вал, является участком магнитной системы.

Таким образом, в магнитной системе БСГКВ с «активным шунтом» при обесточенной обмотке возбуждения регулирующий поток равен разности $\Phi_{МП} - \Phi_{ОВ}$ и может быть как угодно малым, а глубина регулирования, соответственно, достаточно большой. По этим причинам отпадает необходимость в двустороннем возбуждении, так как вполне достаточно одностороннего. Для повышения мощности машины в этом случае наиболее целесообразно добавить еще один магнитоэлектрический нерегулируемый индуктор, как это рекомендовано в [14], или увеличить (удлинить) существующий.

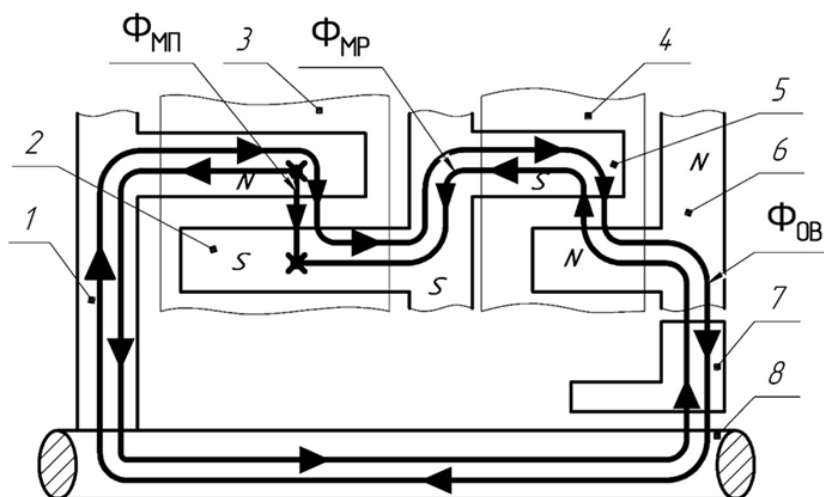


Рис. 6. Магнитная система и основные магнитные потоки в БСГКВ по рис. 5: 1 – униполярная пластина; 2 – южный полюсный наконечник индуктора опорного генератора; 3 – пакет статора опорного генератора; 4 – пакет статора регулировочного звена; 5 – полюсная система регулировочного звена; 6 – кольцевая часть внешней группы полюсных выступов регулировочного звена; 7 – скоба; 8 – вал

Еще одним достоинством данной машины является весьма высокая эффективность регулирования рабочего потока, поскольку регулирующий поток $\Phi_{ОВ}$ воздействует одновременно и на поток $\Phi_{МП}$ в пакете статора 3, и на поток $\Phi_{МР}$ в пакете статора 4.

Вышеизложенное можно описать следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} E_{\delta} &= E_{ОП} - E_{РЗ} = k(\Phi_{ОП} - \Phi_{РЗ}) = \\ &= k[(\Phi_{МП} \pm \Phi_{ОВ}) - (\Phi_{МР} \mp \Phi_{ОВ})] = \\ &= k(\Phi_{МП} - \Phi_{МР} \pm 2\Phi_{ОВ}). \end{aligned} \quad (3)$$

где $E_{ОП}$ и $E_{РЗ}$ – ЭДС, индуцированные в обмотке статора 3 (опорного звена) и обмотке статора 4 (регулирующего звена) соответственно; $\Phi_{МП}$, $\Phi_{МР}$, $\Phi_{ОВ}$ – магнитные потоки: полезный постоянный магнита (в пакете статора 3), регулирующего постоянного магнита (в пакете статора 4) и поток, создаваемый обмоткой возбуждения (в пакетах статора 3 и 4), соответственно; k – коэффициент, зависящий от обмоточных данных и частоты вращения машины (он имеет одинаковое значение для обеих частей статора). Уравнение (2) для определения потока $\Phi_{МП}$ сохраняет силу, при этом, как уже отмечалось выше, значение потоков $\Phi_{МП}$ и $\Phi_{МР}$ в уравнениях (3) указано для условия, когда ток в обмотке возбуждения равен нулю.

3. Магнитная система бесконтактного регулируемого источника

Варианты оптимизации магнитной системы бесконтактных регулируемых электрических машин с комбинированным возбуждением, рассмотренные в данной работе и многочисленной литературе по этому вопросу, пока что не позволяли устранили главные, наиболее существенные не-

достатки таких машин: 1) четыре дополнительных воздушных зазора (при двухстороннем возбуждении) и 2) утяжеление машины из-за появления дополнительных (конструктивных) участков магнитопровода. Одним из перспективных путей исследований, направленных если не на решение, то хотя бы на минимизацию указанных нежелательных свойств, является создание магнитных систем бесконтактных регулируемых источников (БРИ).

Термином «источник» подчеркивается, что в отличие от рассмотренного выше БСГКВ с регулируемым «пассивным» (см. рис. 2) или «активным» (см. рис. 4) шунтом, у которых между индукторами опорного и регулирующего звеньев машины существует управляемая обмоткой возбуждения магнитная связь, генераторы БРИ такой связи не имеют, то есть это электромашинный агрегат, состоящий из двух (или из большего числа) генераторов, имеющих общий вал и общий корпус. Агрегат, как правило, имеет единый статор с общей для обеих машин якорной обмоткой. Для рассматриваемого нами диапазона мощностей 30–50 кВА, как уже пояснялось ранее, рекомендуется двухпакетное исполнение электромагнитного генератора.

Конструкция магнитной системы такого агрегата чрезвычайно проста, описана в [9] и [11] и поэтому здесь не приводится.

На рис. 7 показан эскиз продольного сечения БРИ, разработанного авторами, который позволяет, по нашему мнению, в определенной степени продвинуться вперед в решении задачи повышения удельных характеристик бесконтактных регулируемых автономных источников электроэнергии движущихся объектов.

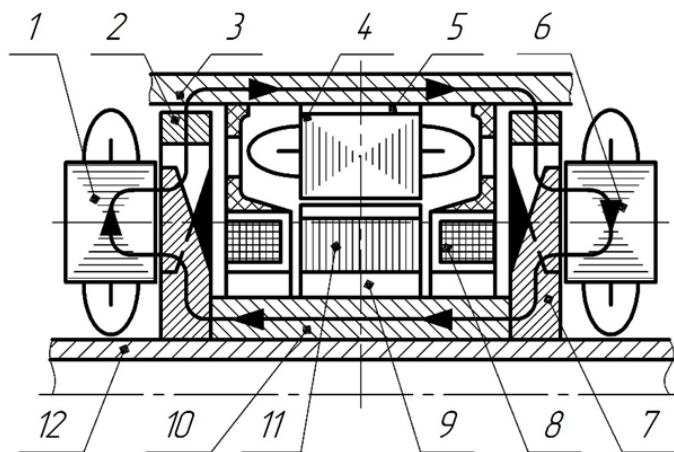


Рис. 7. Эскиз продольного сечения бесконтактного регулируемого источника с торцовым регулирующим звеном: 1 – левый торцовый статор; 2 – наружная «звездочка» левого торцового ротора; 3 – «активный» корпус (внешний магнитопровод); 4 – статор магнитоэлектрического генератора; 5 – немагнитная прокладка; 6 – правый торцовый статор; 7 – внутренняя «звездочка» правого торцового ротора; 8 – правая обмотка возбуждения; 9 – немагнитная втулка; 10 – «активный» вал; 11 – индуктор основного (магнитоэлектрического) генератора; 12 – внутренняя «звездочка» левого торцового ротора

Машина представляет собой агрегат, состоящий из трех синхронных генераторов: одного магнитоэлектрического (опорного), имеющего цилиндрическую форму, и двух торцовых генераторов с электромагнитным возбуждением, образующих двухпакетную конструкцию. Магнитоэлектрическая часть (поз. 4 и поз. 11) агрегата такая же, как у машин, рассмотренных нами ранее, это индуктор с призматическими, тангенциально намагниченными магнитами.

Особенностью предложенной конструкции является использование в качестве регулировочного звена двух торцовых машин (левой, поз. 1, 2, и правой, поз. 6, 7).

Направление тока возбуждения выбирают таким, чтобы обеспечивалось согласное действие МДС обмоток возбуждения (на рис. 7 пронумерована только правая обмотка возбуждения 8). Силовая линия магнитного потока регулировочного звена проходит по «активному» валу 10 и «активному» корпусу 3 (см. рис. 7) в осевом направлении и затем (уже в радиальном направлении) попадает в левый и правый торцовые роторы и наводит регулируемую ЭДС в обмотках, уложенных в статоры 1 и 6 торцовых генераторов. Для уменьшения «подмагничивания» статора 4 потоками рассеяния, возникающими от МДС обмотки возбуждения, между корпусом 3 и пакетом статора 4 введена немагнитная прокладка 5.

Каждая кольцевая обмотка возбуждения помещена в пластмассовую или металлическую (из легких сплавов) обойму.

При обесточенных обмотках возбуждения ЭДС развивает только опорный генератор. При токе возбуждения, отличном от нуля, машина становится бесконтактным регулируемым источником, трехмашинным агрегатом.

Важнейшим достоинством этой конструкции является отсутствие «пассивных», по принятой нами терминологии, деталей магнитопровода регулировочного звена, все они выполняют и конструктивные функции, и участвуют в электромагнитном преобразовании энергии, то есть являются «активными».

Весомым положительным параметром данной конструкции является также вдвое меньшее число дополнительных воздушных зазоров: вместо четырех зазоров в БСГКВ здесь их осталось только два.

Подшипниковые щиты здесь не включены в магнитную цепь и поэтому могут изготавливаться из легких, например алюминиевых, сплавов.

Совокупность указанных свойств позволяет получить у машин с предложенной магнитной системой хорошие удельные мощностные и массогабаритные характеристики при обеспечении широкого диапазона регулирования выходной ЭДС. По ориентировочным оценкам авторов, базирующимся на собственном опыте проектирования электрических машин и на сведениях, подчерпну-

тых из литературы [9–11], удельные характеристики машин предложенной конструкции в рассматриваемом диапазоне мощностей при воздушном охлаждении могут составлять 1,1–1,5 кг/кВт, что несколько ниже удельных масс машин с возбуждением только от постоянных магнитов, где достижимы показатели 0,35–1,0 кг/кВт, но выше, чем в случае применения магнитных систем с внешнезамкнутым потоком (2,0–2,5 кг/кВт). Таким образом, в данной конструкции может быть получен положительный эффект в решении ключевых вопросов оптимизации магнитной системы бесконтактных регулируемых машин с основным магнитоэлектрическим возбуждением мощностью 30–50 кВА. При этом удастся сохранить высокую механическую жесткость ротора и максимальную техническую надежность, присущую бесконтактным машинам.

Предложенная конструкция позволяет также легко организовать интенсивное охлаждение неподвижных якорных обмоток и обмоток возбуждения. Кроме того, торцовый статор предоставляет потенциальные возможности применения прессованных и имеющих малые магнитные потери электромагнитных материалов, например аморфных, для статоров, что может значительно упростить и удешевить технологический процесс изготовления таких машин.

Необходимо отметить, что, поскольку агрегат состоит из нескольких машин, должно быть обеспечено совпадение формы, то есть частоты и коллинеарности векторов их выходных ЭДС. Роторы всех трех машин сидят на одном валу, вращаются с одной скоростью, следовательно, для совпадения частоты выходных ЭДС достаточно, чтобы машины, входящие в агрегат, имели одинаковое число полюсов, что не вызывает технических затруднений. Второе условие выполняется с помощью технологических мероприятий, обеспечивающих привязку углового положения роторов торцовых машин к магнитоэлектрическому ротору.

Как уже указывалось ранее, на ближайшие десятилетия на многих подвижных объектах, в том числе на ВГМ, основными системы электроснабжения останутся системы постоянного тока. Для таких систем перспективным источником электроэнергии являются вентильные генераторы, то есть бесконтактные регулируемые синхронные машины с полным выпрямлением. Очевидно, что если БРИ с магнитной системой по рис. 7 образован из вентильных генераторов, то совместная работа этих машин обеспечивается автоматически.

Заключение

В статье рассмотрены наиболее рациональные для применения на автономных наземных подвижных объектах конструкции электрических генераторов с комбинированным возбуждением. Показано, что наиболее выгодно строить опорное

звено генератора на базе магнитоэлектрической машины с призматическими магнитами, в то время как регулировочное звено целесообразно выполнять на базе машины с внутризамкнутым магнитным потоком. Предложен вариант электромеханического агрегата, объединяющий основную магнитоэлектрическую машину с радиально намагни-

ченными магнитами и две торцевые машины с аксиальным магнитным потоком и когтеобразными полюсами, имеющие электромагнитное возбуждение, что позволяет при рациональном использовании объема электрической машины реализовать эффективное регулирование и стабилизацию ее выходного напряжения.

Литература

1. Макаров, Д.В. Исследование системы генерирования переменной частоты постоянной амплитуды на базе магнитоэлектрического генератора и полупроводникового преобразователя / Д.В. Макаров, С.А. Харитонов, М.М. Юхнин // *Технічна електродинаміка*. – 2012. – Т. 3. – С. 65–66.
2. Фаррахов, Д.Р. Стабилизация выходного напряжения системы генерирования переменного тока постоянной частоты на базе магнитоэлектрического генератора / Д.Р. Фаррахов, И.И. Ямалов, В.Е. Вавилов // *Мавлютовские чтения: Материалы Всероссийской молодежной научной конференции: в 3 т.* – 2015. – Т. 1 – С. 564–571.
3. *Proportional-resonant controlled NPC converter for more electric aircraft starter-generator* / T.H. Dehghani, A.I. Maswood, Z. Lim et al. // *2015 IEEE 11th International Conference on Power Electronics and Drive Systems*. – <http://hdl.handle.net/10220/38524> (дата обращения: 03.09.2016).
4. Muehlbauer, K. Two-Generator-Concepts for Electric Power Generation in More Electric Aircraft Engine / K. Muehlbauer, D. Gerling // *XIX International Conference on Electrical Machines. ICEM 2010*. – <https://www.unibw.de/rz/dokumente/getFILE?fid=5392287&fd=kein> (дата обращения: 03.09.2016). DOI: 10.1109/icelmach.2010.5607966
5. Система генерирования электрической энергии типа «переменная скорость – постоянная частота» на базе синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов и инверторов напряжения / С.А. Харитонов, Д.В. Коробков, М.А. Маслов и др. // *Электротехника*. – 2008. – № 6. – С. 27–32.
6. Kharitonova, S.A. Voltage Stabilization in Permanent-Magnet Synchronous Generator with Variable Rotation Frequency / S.A. Kharitonova, B.F. Simonov, D.V. Korobkova, D.V. Makarova // *Journal of Mining Science*. – 2012. – Vol. 48, no. 4. – P. 675–687. DOI: 10.1134/s1062739148040120
7. Simonov, B.F., Kharitonov, S.A., and Mashinskii, V.V., Mechatronic System «Synchronous Generator–Three-Phase Bridge Rectifier» for Self-Contained Power Facilities / B.F. Simonov, S.A. Kharitonov, V.V. Mashinskii // *Journal of Mining Science*. – 2012. – Vol. 48, no. 3. – P. 497–505. DOI: 10.1134/s1062739148030136
8. Балагуров, В.А. Проектирование специальных электрических машин переменного тока: учеб. пособие для студентов вузов / В.А. Балагуров. – М.: Высш. шк., 1982. – 272 с.
9. Бут, Д.А. Бесконтактные электрические машины: учеб. пособие для электромех. и электроэнерг. специал. вузов / Д.А. Бут. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1990. – 466 с.
10. Паластин, Л.М. Электрические машины автономных источников питания / Л.М. Паластин. – М.: Энергия, 1972. – 454 с.
11. Балагуров, В.А. Авиационные генераторы переменного тока комбинированного возбуждения / В.А. Балагуров, Ф.Ф. Галтеев. – М.: Машиностроение, 1977. – 96 с.
12. Пат. 115134 Российская Федерация. Система стабилизации напряжения переменного тока / Д.В. Макаров, С.А. Харитонов, Д.Л. Калужский, А.В. Сапсалева, Э.Я. Лившиц, М.М. Юхнин; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет», ФГУП ПО «Север». – № 2011128321/07; заявл. 08.07.2011; опубл. 20.04.2012, Бюл. № 11. – 2 с.
13. Patent EP 2290790 A2, МПК H02K21/046. Permanent Magnet Brushless Machine With Magnetic Flux Regulation / J.F. Gieras, A.C. Koenig, G.I. Rozman; Hamilton Sundstrand Corporation. – EP20100251078. 02.03.2011.
14. А. с. 152689 СССР, МПК H02K 11/00, H02K 21/14. Трехфазный тракторный генератор / А.И. Курило, В.К. Васильев, Т.Н. Плотников, Г.А. Санин, А.А. Еремин, Б.Н. Гомберг, П.Р. Биркин, В.И. Передков, Е.К. Сосунов. – №740321/24–7; заявл. 31.07.1961; опубл. в «Бюллетене изобретений» № 2 за 1963 г. – 3 с.
15. Генератор гибридной силовой установки бульдозера / С.Г. Воронин, В.И. Кислицин, А.И. Согрин, Е.С. Швалев // *Тракторы и сельхозмашины*. – 2012. – № 2. – С. 8–11.
16. Поспелов, Л.И. Конструкция авиационных электрических машин / Л.И. Поспелов. – М.: Энергоиздат, 1982. – 320 с.
17. Пат. 2439770 Российская Федерация. Генератор переменного тока с комбинированным возбуждением / С.Г. Воронин, А.И. Согрин, Б.А. Мурдасов, В.И. Кислицин; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет». – № 2010141252/07; заявл. 07.10.2010; опубл. 10.01.2012, Бюл. № 1. – 5 с.

18. Бертинов, А.И. *Авиационные электрические генераторы* / А.И. Бертинов. – М., Гос. изд-во оборонной промышленности, 1959. – 592 с.

19. *Бесконтактные электрические машины: сб. ст. / Ред. коллегия: проф. д-р техн. Г.И. Штурман (отв. ред.) [и др.] // Труды института энергетики Академии наук Латвийской ССР. – Рига: Изд-во АН Латвийской ССР, 1961–1963. – 3 т.; Сб. 1. – 1961. – 224 с.*

20. Балагуров, В.А. *Проектирование специальных электрических машин переменного тока: учеб. пособие для студентов вузов* / В.А. Балагуров. – М.: Высш. шк., 1982. – 272 с.

21. *Бесконтактные и униполярные электрические машины: сб. ст. / под ред. д-ра техн. наук проф. А.И. Бертинова. – М.: Машиностроение, 1966. – 184 с.*

22. А.с. 201515 СССР, МПК H02K 21/24, H02K 19/36. *Бесконтактная синхронная электрическая машина* / Б.Н. Гомберг. – № 1041602/24-7; заявл. 08.12.1965; опубл. 08.09.1967, Бюл. № 18. – 4 с.

23. А.с. 220341 СССР, МПК H02K 21/24, H02K 19/36. *Бесконтактный синхронный электрогенератор* / Б.Н. Гомберг, Л.М. Чумак, В.А. Стрижак. – № 1089894/24-7; заявл. 08.07.1967; опубл. 28.06.1968, Бюл. № 20. – 3 с.

Гомберг Борис Наумович, канд. техн. наук, ученый секретарь Научно-технического совета, АО «НПО «Электромашина», г. Челябинск.

Согрин Андрей Игоревич, канд. техн. наук, доцент кафедры «Летательные аппараты», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; sogrinai@susu.ru.

Казанцева Татьяна Алексеевна, инженер-конструктор 2-й категории, АО «НПО «Электромашина», г. Челябинск; TatAlKaz@inbox.ru.

Поступила в редакцию 14 мая 2020 г.

DOI: 10.14529/power200312

MAGNETIC SYSTEMS OF CONTACTLESS REGULATED SYNCHRONOUS GENERATORS WITH BASIC MAGNETOELECTRIC EXCITATION

B.N. Gomberg¹,

A.I. Sogrin², sogrinai@susu.ru,

T.A. Kazanceva¹, TatAlKaz@inbox.ru

¹ JSC NPO Electromashina, Chelyabinsk, Russian Federation,

² South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

The article is devoted to the search and research of ways to optimize magnetic systems of contactless synchronous generators with a capacity of 30–50 kVA used in Autonomous power supply systems for ground-based mobile objects. The main attention is paid to electric generators with a combined excitation system, the air gap magnetic flux of which is created by the combined action of permanent magnets of the main inductor and an electromagnetic adjustment link necessary to maintain the constancy of the output voltage when the rotor speed and generator load change. According to the authors, with an increase in the power of the source over 30–35 kVA, DC machines will be replaced by generators of this type. The article also describes a machine with a fundamentally new magnetic system, which contains elements of the design of electric machines with radial and axial flux. The proposed magnetic system, according to the authors, allows us to fully utilize the potential inherent in machines of both forms, improve the specific characteristics and, most importantly, maintain the highest technical reliability inherent in contactless Electrical Machines.

Keywords: synchronous generator, magnetic system, combined excitation, internally closed flow, permanent magnet, voltage regulation, machine unit.

References

1. Makarov D.V., Kharitonov S.A., Yukhnin M.M. [Study of the Power Generating System With Variable Frequency and Amplitude Being Maintained Based on Permanent Magnets Synchronous Machine and Voltage Source Inverter]. *Technical Electrodynamics*, 2012, no. 3, pp. 65–66. (in Russ.)
2. Farrakhov D.R., Yamalov I.I., Vavilov V.E. [Stabilization of the Output Voltage of a Constant Frequency Alternating Current Generation System Based on a Magnetolectric Generator]. *Mavlyutovskie chteniya: Materialy Vserossiyskoy molodezhnoy nauchnoy konferentsii* [Mavlyutov Readings: Materials of the All-Russian Youth Scientific Conference], 2015, iss.1, pp. 564–571. (in Russ.)
3. Dehghani T.H., Maswood I., Lim Z., Ooi G., Raj P.H. et al. Proportional-resonant controlled NPC converter for more electric aircraft starter-generator. *2015 IEEE 11th International Conference on Power Electronics and Drive Systems*. Available at: <http://hdl.handle.net/10220/38524> (accessed 03.09.2016).
4. Muehlbauer K., Gerling D. Two-Generator-Concepts for Electric Power Generation in More Electric Aircraft Engine. *XIX International Conference on Electrical Machines. ICEM 2010*. Available at: <https://www.unibw.de/rz/dokumente/getFILE?fid=5392287&fid=kein> (accessed 03.09.2016). DOI: 10.1109/icelmach.2010.5607966
5. Kharitonov S.A., Korobkov D.V., Maslov M.A. [The System of Generating Electric Energy of the Type “Variable Speed – Constant Frequency” Based on a Synchronous Generator with Excitation from Permanent Magnets and Voltage Inverters]. *Elektrotekhnik* [Russian Electrical Engineering], 2008, no. 6, pp. 27–32. (in Russ.)
6. Kharitonova S.A., Simonov B.F., Korobkova D.V. and Makarova D.V. Voltage Stabilization in Permanent-Magnet Synchronous Generator with Variable Rotation Frequency. *Journal of Mining Science*, 2012, vol. 48, no. 4, pp. 675–687. DOI: 10.1134/s1062739148040120
7. Simonov B.F., Kharitonov S.A., Mashinskii V.V. Mechatronic System “Synchronous Generator – Three-Phase Bridge Rectifier” for Self-Contained Power Facilities. *Journal of Mining Science*, 2012, vol. 48, no. 3, pp. 497–505. DOI: 10.1134/s1062739148030136
8. Balagurov V.A. *Proektirovanie spetsial'nykh elektricheskikh mashin peremennogo toka: ucheb. posobie dlya studentov vuzov* [Designing Special AC Electric Machines: A Study Guide for University Students]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1982. 272 p.
9. But D.A. *Beskontaktnye elektricheskie mashiny: uchebnoe posobie dlya elektromekhanicheskikh i elektroenergeticheskikh spetsial'nostey vtuzov* [Contactless Electric Machines: a Manual for Electromechanical and Electric Power Specialties of Technical Universities]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1990. 466 p.
10. Palastin L.M. *Elektricheskie mashiny avtonomnykh istochnikov pitaniya* [Electric Machines Autonomous Power Supplies]. Moscow, Energiya Publ., 1972. 454 p.
11. Balagurov V.A., Galteev F.F. *Aviatsionnye generatory peremennogo toka kombinirovannogo vzbuzhdeniya* [Combined Excitation Aviation Aircraft Generators]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977. 96 p.
12. Makarov D.V., Kharitonov S.A., Kaluzhskiy D.L., Sapsalev A.V., Livshits E.Ya., Yukhnin M.M. *Sistema stabilizatsii napryazheniya peremennogo toka* [AC Voltage Stabilization System]. Patent RF, no. 115134, 2012.
13. Gieras J.F., Koenig A.C., Rozman G.I. Permanent Magnet Brushless Machine with Magnetic Flux Regulation. Patent EP 2290790 A2, Hamilton Sundstrand Corporation. EP20100251078, 02.03.2011.
14. Kurilo A.I., Vasil'ev V.K., Plotnikov T.N., Sanin G.A., Eremin A.A., Gomberg B.N., Birkin P.R., Peredkov V.I., Sosunov E.K. *Trehfaznyy traktorny generator* [Three Phase Tractor Generator]. Patent USSR, no. 152689, 1963.
15. Voronin S.G., Kislicin V.I., Sogrin A.I., Shvaley E.S. [A Bulldozer Hybrid Power Plant Generator]. *Tractors and agricultural machinery*, 2012, no. 2, pp. 8–11. (in Russ.)
16. Pospelov L.I. *Konstrukciya aviacionnykh elektricheskikh mashin* [The Design of Aircraft Electrical Machines]. Moscow, Energoizdat Publ., 1982. 320 p.
17. Voronin S.G., Sogrin A.I., Murdasov B.A., Kislicin V.I. *Generator peremennogo toka s kombinirovannym vzbuzhdeniem* [Combined Excitation Alternator]. Patent RF, no. 2439770, 2012.
18. Bertinov A.I. *Aviatsionnye elektricheskie generatory* [Aviation Electric Generators]. Moscow, Gosudarstvennoe izdatel'stvo oboronnoy promyshlennosti Publ., 1959. 592 p.
19. Shturman G.I. (Ed.) [Contactless Electric Machines: Collection of Articles]. *Trudy instituta energetiki Akademii nauk Latvyskoy SSR* [Proceedings of the Institute of Energy of the Academy of Sciences of the Latvian SSR]. Riga, Latvian Branch RAS Publ., 1961–1963; iss.1, 1961, 224 p. (in Russ.)
20. Balagurov V.A. *Proektirovanie special'nykh elektricheskikh mashin peremennogo toka: ucheb. posobie dlya studentov vuzov* [Design of Special Electric Machines of Alternating Current: Textbook Manual for University Students]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1982. 272 p.
21. Bertinov A.I. (Ed.) *Beskontaktnye i unipolyarnye elektricheskie mashiny: sbornik statey* [Contactless and Unipolar Electric Machines: Collection of Articles]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1966. 184 p.

22. Gomberg B.N. *Beskontaktnaya sinhronnaya elektricheskaya mashina* [Contactless Synchronous Electric Machine]. Patent USSR, no. 201515, 1967.

23. Gomberg B.N., Chumak L.M., Strizhak V.A. *Beskontaktnyy sinhronnyy elektrogenerator* [Contactless Synchronous Electric Generator]. Patent USSR, no. 220341, 1968.

Received 14 May 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Гомберг, Б.Н. Магнитные системы бесконтактных регулируемых синхронных генераторов с основным магнитоэлектрическим возбуждением / Б.Н. Гомберг, А.И. Согрин, Т.А. Казанцева // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2020. – Т. 20, № 3. – С. 119–131. DOI: 10.14529/power200312

FOR CITATION

Gomberg B.N., Sogrin A.I., Kazanceva T.A. Magnetic Systems of Contactless Regulated Synchronous Generators with Basic Magnetolectric Excitation. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2020, vol. 20, no. 3, pp. 119–131. (in Russ.) DOI: 10.14529/power200312
