

## О современных решениях машинно-электронных генерирующих систем для малой энергетики и подвижных объектов

МЫЦЫК Г.С.

*Нередко считают, что ветроэнергетика сегодня, не всегда (в плане бизнеса) выгодная технология производства электроэнергии. Несомненно, однако, что эта экологически чистая технология с неисчерпаемым ресурсом предполагает ее широкое использование не только в ближайшем будущем, но при соответствующих условиях и сегодня. В конечном счёте, определяющими здесь являются интересы национальной безопасности, а значит, приоритет в решении проблемы энергообеспеченности и безопасности страны путём развития малой энергетики (включая прежде всего ветро- и гидроэнергетическую индустриализацию) остаётся за государством. Факторами, определяющими принципиальное отличие автономного электроснабжения географически рассредоточенных потребителей, удалённых от централизованных линий электропередачи, являются его более высокая его надёжность и возобновляемость энергетического ресурса. Первая задача проектно-организационного плана должна решаться в конкретной стране, она заключается в составлении карты распределения ветро- и гидроэнергетических потенциалов целесообразного использования этой технологии. Вторая задача состоит в использовании наиболее рациональных технических решений ветро- и гидроэлектрических установок. В данной работе рассматриваются структуры альтернативных вариантов таких установок, которые представлены только электротехническим комплексом в виде машинно-электронной генерирующей системы типа «переменная скорость – постоянная частота». В качестве преобразователя механической энергии в электрическую рассматриваются синхронная и асинхронная машины, причём во втором варианте машины с короткозамкнутым ротором и с фазным ротором. Преобразователи механической энергии работают совместно с электронным преобразователем частоты, который может выполняться в виде двух последовательно включённых четырехквadrантных преобразователей. В работе приводится краткий сопоставительный анализ пяти структур ветроэнергетических установок, работающих автономно и параллельно с сетью. Приводятся результаты имитационного компьютерного моделирования наиболее рациональных вариантов. Цель работы – дать разработчикам представление о современных решениях построения электрических комплексов для ветроэнергетических установок и облегчить процесс выбора наиболее рационального решения.*

*К л ю ч е в ы е с л о в а: ветроэлектрическая установка, синхронные и асинхронные машины, переменная частота вращения вала привода, генераторный режим, средства стабилизации напряжения и частоты, результаты имитационного компьютерного моделирования, сопоставительная оценка вариантов*

Одна из задач электромеханики, не получившая ещё наиболее эффективного решения, – преобразование механической энергии приводного вала с изменяющейся частотой вращения в электрическую энергию с заданными показателями качества – со стабилизированными напряжением переменного тока и частотой или со стабилизированным напряжением постоянного тока. Оба варианта накладывают ограничения на допустимый уровень искажений преобразованного напряжения. Области применения этих электротехнических комплексов (ЭТК) – ветроэнергетика, гидроэнергетика и различного вида подвижной транспорт, включая летательные, надводные и подводные аппараты [1–22, 24–26].

Независимо от типа электрической машины (ЭМ) с целью обобщения информации целесообразно различать рассматриваемые здесь два основных класса ЭТК – машинно-электронные генерирующие системы МЭГС-1 (ранее известные как «вентильные генераторы») и МЭГС-2 (известные как системы «переменная скорость – постоянная частота» – ПСПЧ) [1–4]. Первый класс характеризуется выходным напряжением постоянного тока, второй – выходным напряжением переменного тока. Система МЭГС-1 используется как самостоятельно, так и совместно с инверторным звеном, образуя МЭГС-2.

В качестве преобразователей механической энергии в электрическую в таких ЭТК чаще всего

применяют синхронные (СМ) [1–6, 18, 26] и асинхронные машины (АМ) [7, 8, 13–17, 19, 20, 25]. По сравнению с СМ и АМ с фазным ротором (ФР) [9–12, 24] технологически наиболее простыми и более дешёвыми являются АМ с короткозамкнутой роторной (АМКЗР) [7, 13, 15, 19, 25]. При этом необходимо эффективно решить следующую задачу: для самовозбуждения АМ требуются конденсаторы, ёмкость которых должна изменяться при изменении как тока нагрузки, так и частоты вращения приводного вала. В принципе задача синтеза ЭТК на базе АМКЗР уже давно имеет известные решения, которые основаны или на дискретном изменении ёмкости конденсаторов, или на использовании (дополнительно к нерегулируемым конденсаторам) плавно регулируемых индуктивных компенсаторов реактивной мощности (по сути, регулируемых индуктивностей).

Не останавливаясь на анализе недостатков этих решений, отметим лишь одно негативное функциональное свойство АМКЗР: при возмущающих воздействиях по частоте вращения вала и по нагрузке будет изменяться не только её напряжение, но и, что принципиально важно (и нежелательно), его частота. Это означает, что область применения такого ЭТК ограничивается лишь чисто активными нагрузками типа нагревательных приборов, включая и сварку. Однако этот ЭТК может эффективно использоваться также и для получения стабилизированного напряжения постоянного тока путём подключения к выходу АМКЗР выпрямительного блока (ВБ) [7, 8, 12, 14, 25]. При этом АМКЗР превращается в разновидность вентильного генератора (ВАМКЗР), относящегося к общему классу МЭГС-1. Заметим, что факт нестабильности частоты напряжения АМ здесь уже не имеет принципиального значения.

С целью систематизации в числе известных вариантов ЭТК рассматриваются новые решения обоих классов, в частности класса МЭГС-1 на базе АМКЗР [25] и на базе СМ [26] с возбуждением от постоянных магнитов, обозначаемые как магнитоэлектрические генераторы (МЭГ).

**Укрупнённая классификация МЭГС. МЭГС-1 на базе синхронных машин (СМ).** Возможны следующие основные варианты:

*СМ с электромагнитным возбуждением (ЭМВ), работающая на выпрямительную нагрузку (через выпрямительный блок – ВБ).* Стабилизация выходного напряжения при возмущающих воздействиях по частоте вращения приводного вала и по току нагрузки осуществляется регулированием тока возбуждения СМ. Возможно как контактное, так и

бесконтактное исполнение системы возбуждения [1].

*СМ с возбуждением от постоянных магнитов, обозначаемые как магнитоэлектрические генераторы (МЭГ).* Для стабилизации их напряжения (при выше заданных возмущающих воздействиях) ВБ должен выполняться управляемым. В рамках известной информации возможны два альтернативных варианта решения этой задачи: на основе тиристорного или транзисторного исполнения. Вторым вариантом [4] с выполнением ВБ на основе малоискажающего (активного или четырёхквadrантного преобразователя) [9, 10] можно считать (на сегодня) более перспективным, поскольку позволяет обеспечить работу МЭГ с входным коэффициентом мощности ВБ  $\chi = (I_{1(1)} / I_1) \cos \varphi_{1(1)} \approx 1$  или даже с ёмкостным  $\chi < 1$ , что обеспечивает снижение мощности возбуждения ЭМ и улучшение её массогабаритных показателей. К недостаткам варианта можно отнести относительную сложность системы управления и полное преобразование мощности, что отражается на некотором ухудшении массогабаритных показателей ВБ и на КПД МЭГС-1 в целом.

Этот недостаток в значительной степени может быть ослаблен за счёт не полного, а частичного преобразования мощности МЭГ путём использования дополнительно к ВБ реверсивного вольтодобавочного канала (РВДК) (рис. 1). Такое решение разработано в НИУ «МЭИ» [26].

*МЭГ с комбинированным возбуждением (КМЭГ).* Конструктивно этот вариант выполняется с дополнительным индуктором с ЭМВ. Возможны контактное и несколько вариантов бесконтактного исполнения ЭМВ [1].

**МЭГС-1 на базе асинхронных машин с короткозамкнутым ротором.** Генераторный режим обеспечивается конденсаторами самовозбуждения (КСВ). Стабилизация выходного напряжения ВБ осуществляется изменением ёмкости КСВ. Наиболее простое из известных новых решений представлено на рис. 2.

*В качестве ВБ использован четырёхквadrантный преобразователь (ЧКП), который выполняет: имманентную функцию выпрямления переменного напряжения и функцию регулируемого компенсатора реактивной мощности [8–12].*

**МЭГС-2. Варианты выполнения.** На базе электрической машины переменного тока синхронного типа (в контактном или бесконтактном вариантах): совместно с непосредственным преобразователем частоты (НПЧ); совместно с преобразователем частоты со звеном постоянного тока (ПЧЗПТ) [2, 4],

т.е. МЭГС-1 дополняется звеном инвертирования напряжения (ЗИН).

На базе асинхронной машины с КЗР, используемой в варианте МЭГС-1 и дополненной ЗИН [20].

На базе АМ с фазным ротором (ФР) и преобразователем частоты (ПЧ) в роторной цепи [15, 19, 24, 27].

**О необходимости создания информационно-методического обеспечения (ИМО) для системного проектирования ЭТК.** Целесообразной представляется формулировка некоторых соображений, определяющих вектор поисковых работ в направлении совершенствования ЭТК. Вероятность выбора наилучшего технического решения ЭТК напрямую зависит прежде всего: от числа альтернативных вариантов, из которых оно выбирается; соответствия этих вариантов современному уровню развития данной области электротехники; степени готовности ЭТК к параметрической его оптимизации; от той совокупности критериев для реализации этой процедуры, которая определяет конкретное его применение. С учётом этих факторов, а также всё возрастающего практического интереса к малой энергетике (и подвижным объектам), несомненно, всё больше должны будут востребованы работы, систематизирующие, обобщающие информацию в этом направлении и создающие информационно-методическое обеспечение (ИМО) для сопоставительной их оценки и реализации идеального системного проектирования (ИСП) электротехнических комплексов.

Под ИСП будем понимать такую концепцию проектирования, которая характеризуется единством проектного замысла, распространяемого на каждое звено многозвенной структуры и на ЭТК в целом. Это означает, что все звенья структуры должны быть функционально согласованы между собой при одновременном выполнении заданного критерия (или совокупности критериев) глобальной оптимизации. При этом понимается, что локальные экстремумы (звеньев) вовсе не обязательно будут (или должны) совпадать с глобальным экстремумом — только их суммарные зависимости по оптимизируемому критерию должны давать искомое значение глобального экстремума. При этом в случае нескольких критериев, по крайней мере на первом этапе, выбирается главный, а остальные вводятся в разряд ограничений. В принципе это известный из теории принятия оптимальных решений подход. Наконец, следует заметить, что даже альтернативные варианты ЭТК, но характеризующиеся различным числом звеньев и различной физической их природой, требуют решения задач по созданию для каждого из них своего ИМО.

Таким образом, концепция ИСП в итоге ставит перед собой задачу синтеза лучших решений по заданным критериям проектирования. Она, в частности, напрямую может соответствовать требованиям конкурентно ориентированного развития техники. Решение такой многомерной задачи представляется тем более актуальным, поскольку в последние десятилетия в классах МЭГС-1 и МЭГС-2 начали появляться новые решения. Их использование может оказаться полезным для движения в этом направлении (причём как для организаций и предприятий, заинтересованных в разработке новой техники, так и для отдельных её творческих разработчиков со своими научными целями). Однако при этом необходимо обратить внимание на должное понимание того, что создание ИМО в необходимом для ИСП объёме требует решения большого комплекса различных по физической природе и взаимосвязанных между собой задач. Как правило, для этого требуется потенциал разнопрофильного творческого коллектива специалистов.

В порядке информации можно заметить, что работы в направлении совершенствования ЭТК двух классов МЭГС-1 и МЭГС-2 интенсифицировались в НИУ «МЭИ» на кафедре «Электротехнические комплексы автономных объектов и электрический транспорт» в последнее два десятилетия.

Цель настоящей работы — систематизация, классификация и освещение некоторых результатов сопоставительных вариантных исследований структурно-алгоритмической организации (САОр) МЭГС-1 и МЭГС-2 на базе асинхронных машин (АМ) с фазным (ФР) и короткозамкнутым (КЗР) роторами, а также на базе синхронных машин (СМ) с магнитоэлектрическим возбуждением (МЭГ) и комбинированным возбуждением (КМЭГ). Полученные результаты представлены в ряде публикаций, включая пять кандидатских диссертаций [13–15], [17, 18], которые подготовлены на кафедре ЭКАО и ЭТ и защищены в период с 2012 по 2018 г., и одну докторскую диссертацию [21] (2017 г.). В настоящее время работы по созданию и расширению ИМО для системного проектирования ЭТК рассмотренных классов МЭГС на кафедре продолжаются. Ряд новых технических решений защищён патентами и прорабатывается в учебном процессе на различных уровнях подготовки специалистов: в рамках аспирантских, магистерских диссертаций, выпускных работ бакалавров и курсовых проектов.

**Примеры современных решений. МЭГС-1 на базе асинхронной машины с короткозамкнутым ротором.** Для примера здесь на рис. 1 представлено простое и вместе с этим эффективное решение задачи са-



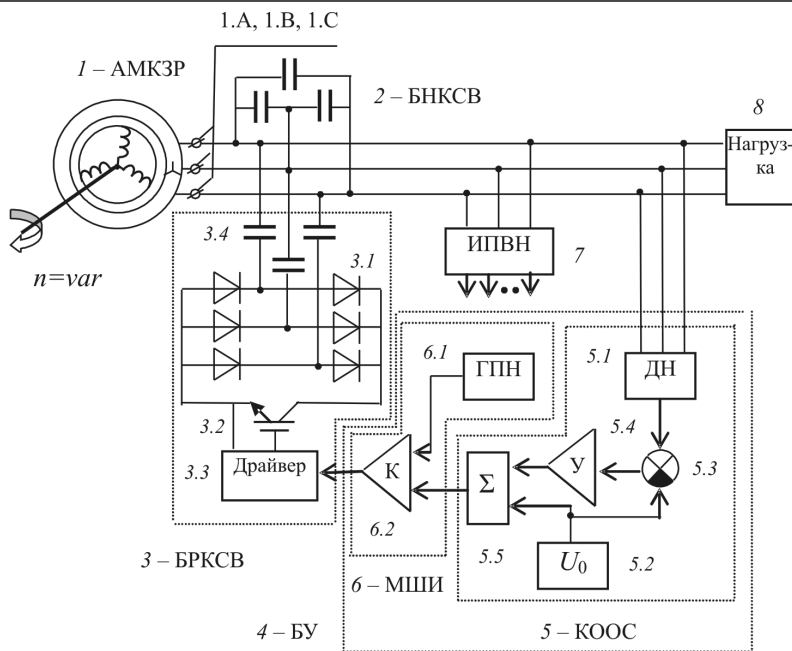


Рис. 1. Структурно-функциональная схема МЭГС-1 на базе асинхронной машины с короткозамкнутой роторной обмоткой

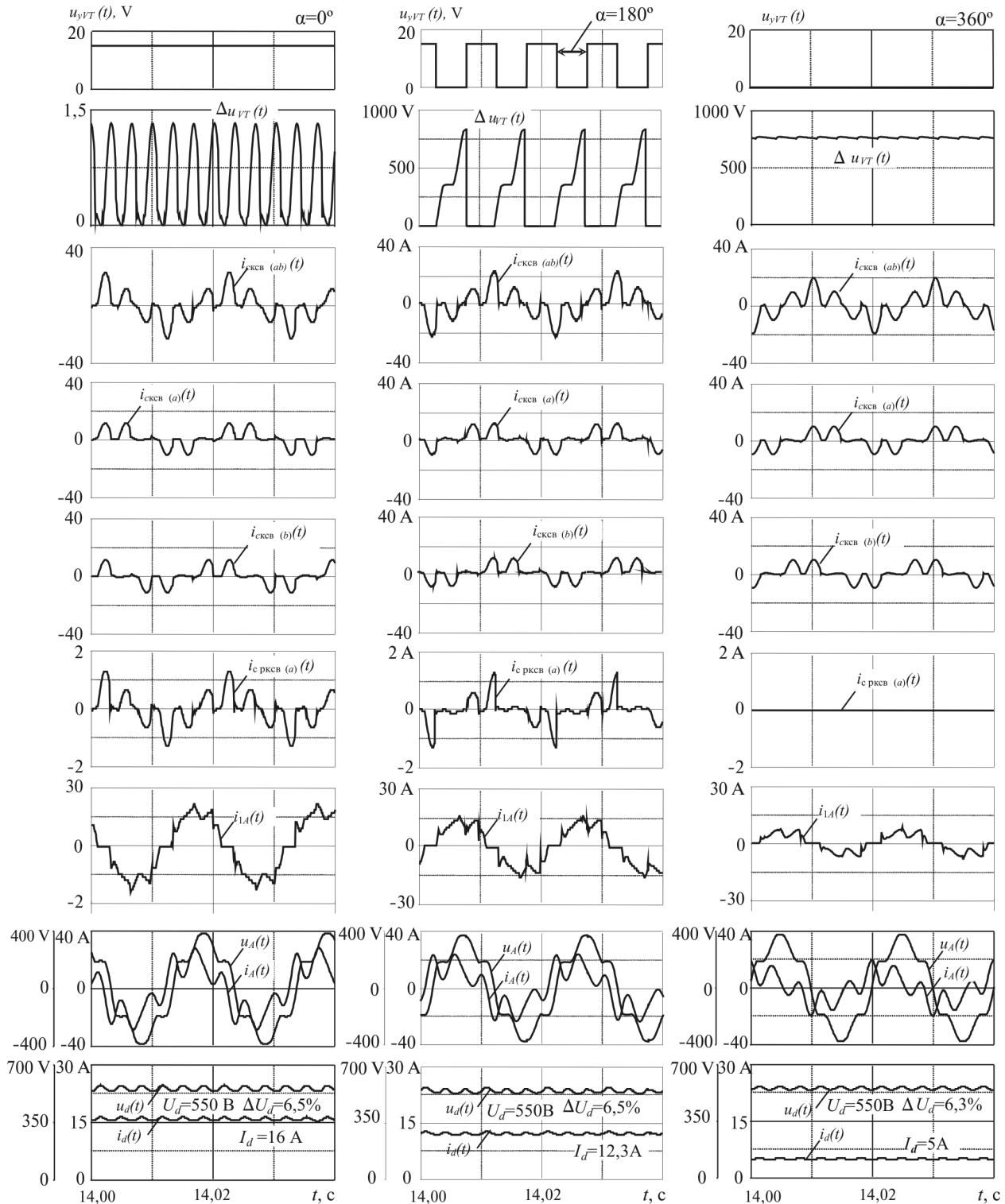
мовозбуждения АМКЗР, которое обеспечивает стабилизацию её напряжения при возмущающих воздействиях по частоте вращения вала и по току нагрузки. Принятые на рис. 1 обозначения: 2 (БНКСВ), 3 (БРКСВ) – блоки нерегулируемых и регулируемых конденсаторов самовозбуждения; 4 (БУ) – блок управления, включающий 5 – контур отрицательной обратной связи (КООС) и 6 – модулятор ширины импульсов (МШИ); 7 (ИПВН) – источник питания внутренних нужд; 8 – нагрузка или переменного тока, или выпрямительная. Плавное регулирование ёмкостей 3.4 в блоке 3 осуществляется соответствующим изменением скважности работы транзистора 3.2 (за счет угла  $\alpha$ ). Работоспособность ЭТК подтверждена имитационным компьютерным моделированием (ИКМ). В качестве АМКЗР, как и в [14], использовалась машина типа 4AK160S4Y3 мощностью 11 кВт. Её параметры были введены в модельное описание (МО) машины из 8 уравнений, взятых из [28]: 6 уравнений, описывающих электрические процессы в статоре и роторе АМКЗР; уравнение электромагнитного момента и уравнение движения. Отличительной особенностью МО является принципиально необходимый учёт нелинейности магнитопровода, модель которой взята из [29]. Адекватность используемого описания АМКЗР подтверждена ранее в [14], а также в последующих публикациях [12, 20]. Результаты моделирования представлены на рис. 2.

**МЭГС-1 на базе магнитоэлектрического генератора.** Применение МЭГ в системах МЭГС-1 (и МЭГС-2 при переменной частоте вращения вала) без преобразования его в конструкцию КМЭГ [1]

возможно, если ВБ дополнить реверсивным вольтодобавочным каналом (РВДК). По сравнению с решением, опубликованным в [26], здесь приводится более энергетически эффективный вариант. Он выполнен на основе прежнего выпрямительного моста (ВТМ) и дополнен трёхфазным «полумостовым выпрямителем» (ГПМВ), т.е. проведено раздвоение катодных групп ВТМ при общей анодной группе. Между катодами двух катодных групп включены два последовательно соединённых управляемых плеча, каждое из которых состоит из последовательно включённых одного из транзисторов  $VT3$ ,  $VT4$  и одной из обмоток  $W2$ ,  $W3$  трансформатора  $TV1$ . Другая часть РВДК образована высокочастотным инвертором (ВЧИН), выполненным по полумостовой схеме на транзисторах  $VT1$  и  $VT2$  и на конденсаторном делителе напряжения  $C1$ ,  $C2$ , который подключён к выходу ВБ.

На выходе ВЧИН включена обмотка  $W1$  трансформатора  $TV$ . В зависимости от частоты вращения вала РВДК работает или в режиме вольтодобавки (ВД) – при частоте ниже синхронной (1-й частотный режим), или в режиме вольтовывчитания (ВВ) – при частоте выше синхронной (2-й частотный режим). При этом в 1-м режиме (ВД) ВЧИН (1-я его часть) работает как инвертор, а 2-я, выходная, – как выпрямитель (транзисторы  $VT3$  и  $VT4$  открыты постоянно). Во 2-м частотном режиме ВЧИН работает как выпрямитель (транзисторы  $VT1$  и  $VT2$  выключены, а транзисторы  $VT3$  и  $VT4$  работают попеременно в режиме инвертирования напряжения. При синхронной частоте вращения вала РВДК «не работает» (транзисторы  $VT1$  и  $VT2$  выключены, а  $VT3$  и  $VT4$  включены). Заметим, что в реальном МЭГ его якорные обмотки обладают индуктивностью рассеяния, поэтому индуктивность  $L$  на выходе ВБ не требуется.

**Использование АМКЗР в МЭГС-2.** Идея эксперимента с МЭГС-1 по рис. 4 состояла в проверке реализуемости варианта вынужденного проектирования, когда используется уже промышленно выпускаемая АМКЗР с известными параметрами, т.е. когда ИСП невозможно. Известно, что для обеспечения параллельной работы ТИН с сетью (в режиме РПС) амплитудное значение основной гармоники её противоЭДС  $E_{2(1)m}$  должно быть больше напряжения сети  $U_{1(1)m}$  и вместе с углом нагрузки  $\theta_{2(1)}$  увеличиваться с ростом тока нагрузки  $I_{2(1)}$  [9].



**Рис. 2.** Осциллограммы процессов в АМКЗР при  $n=1500$  об/мин;  $C_{\text{ексв}} = 28$  мкФ;  $C_{\text{рксв}} = 5$  мкФ;  $f_T = 100$  Гц;  $C_d = 100$  мкФ;  $U_d = 550$  В: а – при  $R_d = 35$  Ом;  $\alpha = 0^\circ$ ; б – при  $R_d = 45$  Ом;  $\alpha = 180^\circ$ ; в – при  $R_d = 110$  Ом;  $\alpha = 360^\circ$ :  $u_A(t)$ ,  $i_A(t)$  – фазные напряжение и ток АМКЗР;  $u_d(t)$ ,  $i_d(t)$  – выходное напряжение и ток МЭГС-1;  $i_{1A}(t)$  – входной ток ВМ;  $i_{\text{ексв}(a)}(t)$ ,  $i_{\text{ексв}(b)}(t)$ ,  $i_{\text{ексв}(ab)}(t)$  – фазные и линейный токи блока НКСВ (по схеме треугольник);  $i_{\text{с рксв}(j)}(t)$  – ток блока РКСВ  $j$ -й фазы;  $\Delta U_d$  – уровень пульсации выходного напряжения ВМ;  $\Delta u_{VT}$  – падение напряжения на транзисторе;  $u_{yVT}(t)$  – сигналы управления транзистором

В рассматриваемом случае обеспечить требуемое значение  $E_{2(1)m}$  можно за счёт использования режима перемодуляции путём задания по системе управления ТИН глубины модуляции (значение параметра регулирования  $E_{2(1)m}$ )  $\mu_2 > 1$ . Оказалось,

что в данном случае требуемое согласование параметров  $E_{2(1)m}$  и  $U_{1(1)m}$  за счёт  $\mu_2 = 1,2$  возможно, однако при этом ухудшается качество отдаваемого в сеть тока (см. осциллограммы на рис. 5, где  $K_{\Gamma(i2)} = 4,5\%$ ). Эксперимент имел локальную цель,

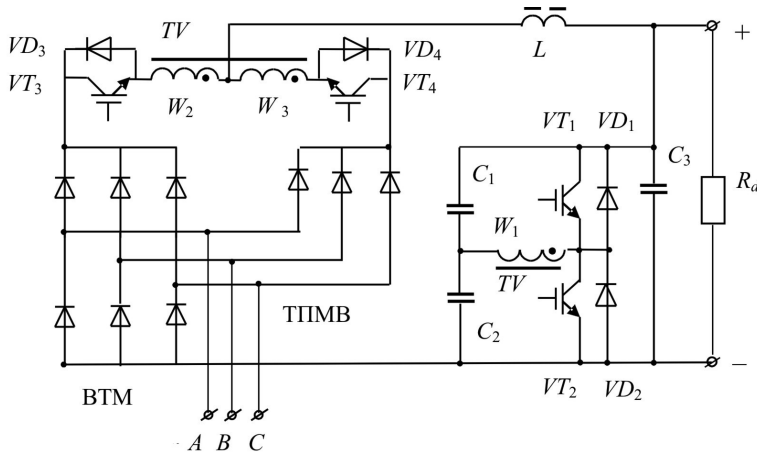


Рис. 3. Вариант стабилизированного по напряжению МЭГС-1 на базе МЭГ с ВТМ (и ТПМВ) реверсивным вольтдобавочным каналом (РВДК); А, В, С – входные выводы выпрямительного блока (ВБ) с РВДК для подключения к ним МЭГ

когда регулирование напряжения АМЗКР не требовалось. Здесь исследовался лишь один интересующий нас режим. Реально же, когда регулирование необходимо, может применяться новое решение, показанное на рис. 1.

**МЭГС-2 на основе синхронизированного асинхронного генератора (САГ).** САГ с независимым возбуждением (автономный САГ–АСАГ). Одной из первых работ по АМ с фазным ротором (ФР) в режиме её работы с переменной частотой вращения вала ( $n_B = var$ ) и с постоянной частотой вращения поля возбуждения ( $n_C = const$ ) относительно якорной обмотки АМ следует назвать работу [27]. В ней, а также в работах, например [7, 22], такая машина обозначается как асинхронизированный синхронный генератор (АСГ). Затем в [13] было справедливо замечено, что признак «синхронный генератор» в аббревиатуре АСГ не следует считать корректным, поскольку он не отражает корневой конструктивный признак АМФР. Было предложено обозначать её в этом режиме как синхронизированный

асинхронный генератор (САГ) – АМФР в генераторном режиме с постоянной частотой вращения поля возбуждения при переменной частоте вращения вала. Это более адекватное обозначение. На рис. 6 представлен вариант САГ с независимым возбуждением – автономный САГ (АСАГ). Такой ЭТК работает при значениях ниже и выше синхронной частоты вращения вала с напряжением стабильной частоты на выходе. Преобразователь частоты формирует напряжение возбуждения с частотой скольжения, зависящей от частоты вращения вала:

$$f_s = f_c - f_B = (n_c - n_B) \frac{p}{60},$$

где  $p$  – число пар полюсов машины.

В поисках лучшего решения в [13] исследовано несколько вариантов построения ПЧ в транзисторном исполнении:

ряд модификаций ПЧ непосредственного типа (НПЧ) на полностью управляемых ключах с двухсторонней проводимостью, которые обеспечивают реверсивность как по активной, так и по реактивной мощности при предельно простом алгоритме управления;

ПЧ со звеном постоянного тока (ПЧЗП) в виде и трёхфазного инвертора (ТИН) с формированием напряжения скольжения по алгоритму ШИМ; ТИН получает питание от вспомогательного источника напряжения.

По полученным в [13] результатам нельзя сделать окончательный вывод о большей перспективности какого-то из этих двух направлений решения задачи синтеза ПЧ – причина не в полной завершенности рассмотренных решений по некоторым критериям проектирования. Однако, если ста-

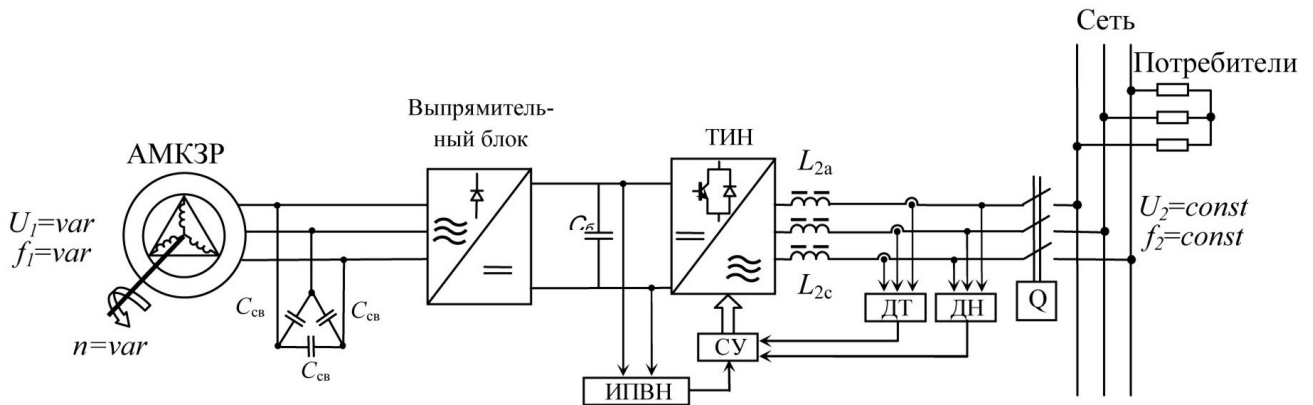
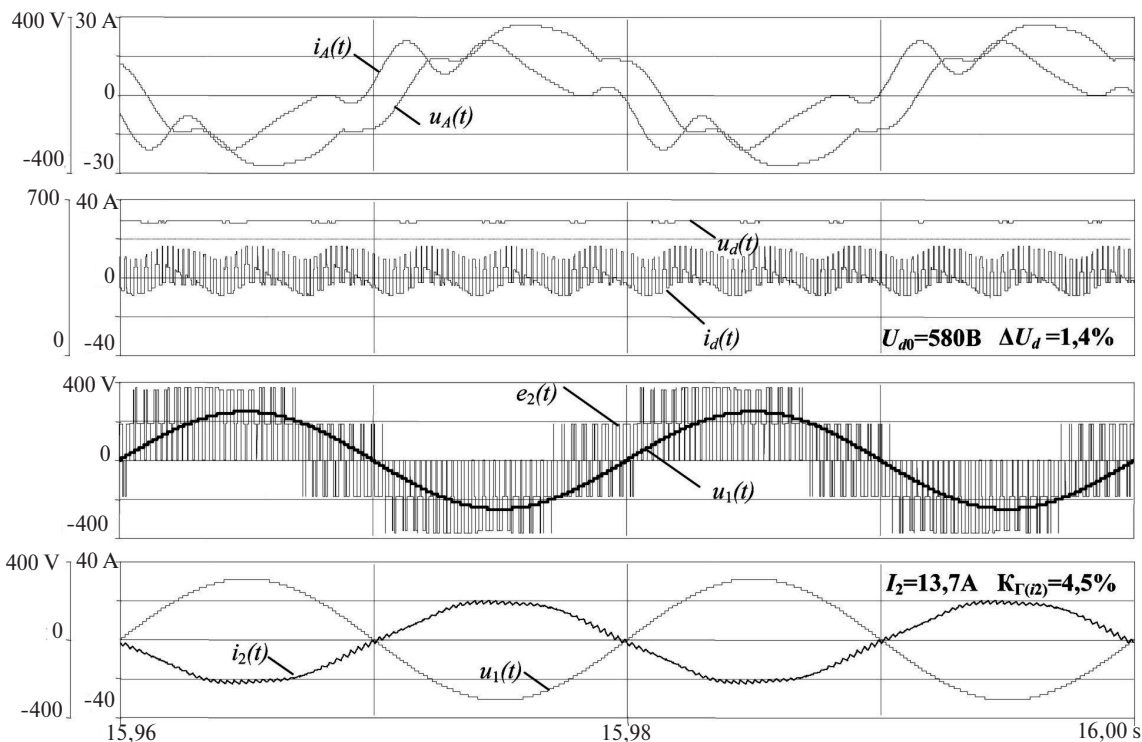


Рис. 4. Вариант МЭГС-2 в режиме параллельной работы с сетью (РПС) переменного тока: АМКЗР – асинхронная машина с короткозамкнутым ротором;  $C_{cb}$  – конденсаторы самовозбуждения, ВБ – выпрямительный блок; ТИН – трёхфазный инвертор напряжения;  $L_{2j}$  – сопрягающие дроссели; ИПВН – источник питания внутренних нужд; СУ – система управления; Q – контактор; ДТ – датчики тока; ДН – датчики напряжения



**Рис. 5.** Осциллограммы процессов в системе МЭГС-2 на базе МЭГС-1 (по рис. 4) и ТИН в режиме РПС при номинальной частоте вращения вала (при значениях параметров:  $C_{св} = 30\text{мкФ}$ ;  $C_6 = 1000\text{ мкФ}$ , тактовая частота ШИМ  $f_T = 3600\text{ Гц}$ ,  $L_{2j} = 10\text{ мГн}$ , угол управления, определяющий уровень нагрузки,  $\theta_{2(1)} = 10,96^\circ$ , глубина модуляции  $\mu_2 = 1,2$ );  $u_A(t)$ ,  $i_A(t)$  – фазные напряжение и ток АМЗКР;  $u_d(t)$ ,  $i_d(t)$  – выходные напряжение и ток МЭГС-1;  $u_1(t)$ ,  $e_2(t)$  – сетевое напряжение и противоЭДС ТИН;  $i_2(t)$  – отдаваемый в сеть ток;  $\Delta U_d$  – уровень пульсации напряжения на конденсаторе  $C_6$

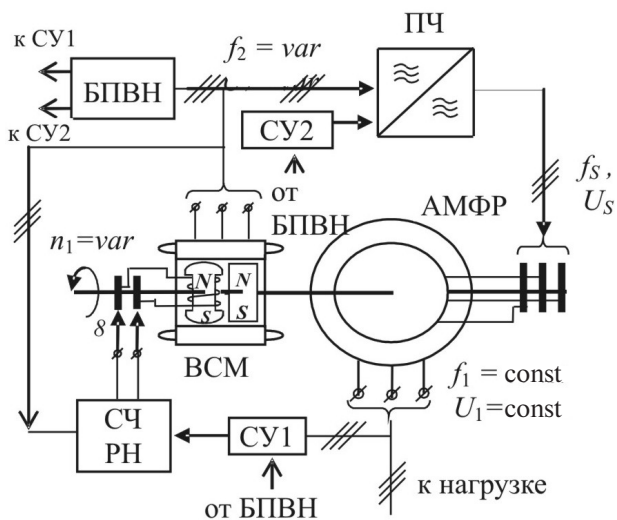
вится только задача получения наилучших массогабаритных показателей МЭГС-2, то можно показать, что лучшим вариантом является ПЧ при построении его по 2-й структуре (ПЧЗПТ) в виде двух последовательно включённых четырёхквadrантных преобразователей (ЧКП1 и ЧКП2) [4, 19]. Преимущество этого решения определяется луч-

шим использованием активных материалов АМФР (а значит, и меньшей его массой) и значительно лучшими массогабаритными показателями выходного фильтра на выходе, который здесь приходится всё же устанавливать. Решение ориентировано на применение его в качестве систем электроснабжения автономных подвижных объектов.

К недостаткам МЭГС-2 этого класса следует отнести наличие контактных колец. Однако уже имеются решения, позволяющие исключить и этот недостаток. Достигается это непросто – размещением ПЧ с системой управления на роторе.

*Синтезированный асинхронный генератор с зависимым возбуждением.* Этот вариант МЭГС-2 ориентирован на применение её в ветросиловых электроустановках (ВЭУ) повышенной мощности (более 1 МВт), работающих параллельно с промышленной сетью (рис. 7) [15, 19, 24]. В этом случае из сети потребляется только активная составляющая мощности возбуждения.

В этом состоит функциональная особенность используемой здесь структуры ПЧ (в виде двух ЧКП). Она позволяет повысить энергетическую эффективность за счёт потребления из сети (при  $n_B < n_C$ ) или отдачи в сеть (при  $n_B > n_C$ ) только активной мощности. Во всех режимах реактивная мощность роторной обмотки АМФР замыкается через ключи ЧКП1. При частоте вращения вала



**Рис. 6.** Структурно-функциональная блок-схема АСАГ (с независимым возбуждением) на основе использования вспомогательной синхронной машины (ВСМ) комбинированного возбуждения: АМФР – асинхронная машина с фазным ротором; ПЧ – преобразователь частоты; СЧРН – силовая часть регулятора напряжения; СУ1, СУ2 – системы управления РН и ПЧ; БПВН – блок питания внутренних нужд



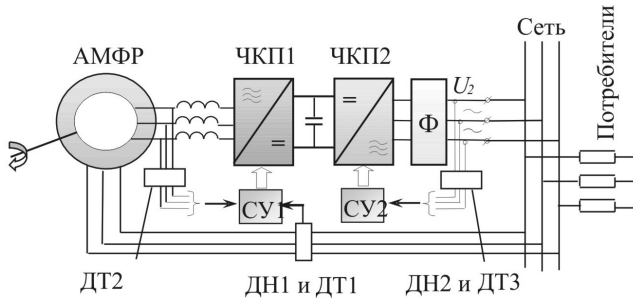


Рис. 7. Упрощённая структурно-функциональная блок-схема САГ с зависимым от сети возбуждением: ЧКП1, ЧКП2 – четырёхквadrанные преобразователи; ДН и ДТ – датчики напряжения и тока роторной и статорной цепей

ниже синхронной ЧКП1 работает в режиме инвертирования напряжения с выходной частотой  $f_s$  (вплоть до  $f_s=0$ ), а ЧКП2 – в режиме малоискажающего (активного) выпрямителя. При частоте вращения вала выше синхронной ЧКП1 работает в режиме малоискажающего (активного) выпрямления напряжения (роторной обмотки) с частотой скольжения  $f_s$ , а ЧКП2 – в режиме инвертирования напряжения с частотой  $f_c$ . Статорная обмотка АМФР во всех режимах отдаёт в сеть только активную мощность.

Таким образом, в режиме  $n_B > n_C$  АМФР отдаёт в сеть большую мощность, чем в режиме  $n_B < n_C$ . Для реализации всех режимов используется информация о напряжениях и токах якорной, роторной обмоток АМФР и отдаваемого в сеть тока [15, 19]. Аппаратная реализация алгоритмов управления ЧКП1 и ЧКП2 достаточно наукоёмкая. Это хорошая иллюстрация известной закономерности развития техники: более широкие функциональные возможности и показатели качества системы достигаются за счёт более высокого уровня интеллектуализации системы управления ею.

**Заключение.** В результате научно-исследовательских работ, выполненных в НИУ «МЭИ» на кафедре электротехнических комплексов автономных объектов и электрического транспорта в последние два десятилетия, накоплен научно-технический потенциал, обеспечивающий проведение ОКР с последующим промышленным освоением перспективных разработок. Информация ориентирована на организации, заинтересованные в разработке техники новых поколений для малой энергетики и автономных объектов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Электрооборудование** летательных аппаратов т. 1. Системы электроснабжения летательных аппаратов/Под ред. С.А.Грузкова. М.: Изд. МЭИ, 2005, 508 с.
2. **Харитонов С.А., Степников А.А.** Система генерирования электрической энергии типа «Синхронный генератор – инвертор напряжения – инвертор напряжения». – Труды II Межвузовской отраслевой научно-техн. конф. «Автоматизация и про-

грессивные технологии» (27 сентября – 1 октября 1999 г.). Новоуральск, 1999, с. 190–192.

3. **Мыщык Г.С.** О некоторых результатах и проблемах системного подхода к поисковому проектированию машинно-электронных генерирующих комплексов автономных объектов. – Труды научно-техн. конф. «Электрификация летательных аппаратов», посвященная 125-летию акад. В.С. Кулебакина, Москва, 1 ноября 2016 г., с. 283–291.

4. **Мыщык Г.С., Мьё Мин Танг.** К вопросу системного проектирования электротехнического комплекса «переменная скорость – постоянная частота». – *Электричество*, № 2, 2018, с. 34–42.

5. **Sikorski A., Kuuma A.** Cooperation of induction squirrel-cage generator with grid connected AC/DC/AC converter. – *Bulletin of the Polish Academy of sciences. Technical sciences.* 2009, vol. 57, No. 4, p. 317–322.

6. **Bhim Singh, S.S. Murthy, Sushma Gupta.** STATCOM-Based Voltage Regulator for Self-Excited Induction Generator Feeding Nonlinear Loads. – *IEEE Trans. on Ind. Electronics*, 2006, vol. 53, No. 5, pp. 1437–1451.

7. **Берилев А.В., Маслов С.И., Мыщык Г.С., Хлаинг Мин У.** Автономная система электроснабжения на базе асинхронизированного генератора с переменной частотой вращения вала. – *Электропитание*, 2011, № 2, с. 12–19.

8. **Горякин Д.В., Мыщык Г.С.** Машинно-электронная генерирующая система для малой энергетики и автономных объектов. – Труды X Международ. ежегодной конф. «Возобновляемая и малая энергетика 2013». М.: Комитет ВИЭ Рос-СНИО, с. 102–107.

9. **Горякин Д.В., Мыщык Г.С.** Исследование режимов работы трёхфазной мостовой инверторной схемы. – *Электричество*, 2012, № 5, с. 23–31.

10. **Горякин Д.В., Мыщык Г.С.** Трёхфазная мостовая инверторная схема в режиме компенсатора реактивной мощности. – *Практическая электроника*, 2012, № 45, с. 13–17.

11. **Perumal V. Venkatesa, Chatterjee J.K.** Analysis of a Self Excited Induction Generator with STATCOM/Battery Energy Storage System/Power India Conference. *IEEE*, 2006.

12. **Мыщык Г.С., Горякин Д.В.** Бесконтактная машинно-электронная генерирующая система на основе асинхронной машины и активного выпрямителя. – *Практическая силовая электроника*, 2018, № 69, с. 49–55.

13. **Кьо Зо Лин.** Исследование возможностей улучшения показателей качества автономной системы генерирования напряжения стабильной частоты на базе синхронизированного асинхронного генератора: Автореф. дисс.... канд. техн. наук. НИУ «МЭИ», 2012, 20 с.

14. **Горякин Д.В.** Исследование новых возможностей совершенствования машинно-электронных генерирующих систем для малой энергетики и автономных объектов: Автореф. дисс.... канд. техн. наук. НИУ МЭИ, 2013, 20 с.

15. **Нгуен Хьу Нам.** Создание информационно-методического обеспечения системного проектирования электротехнического комплекса для ветроэлектрической установки, работающей параллельно с сетью: Автореф. дисс.... канд. техн. наук. НИУ «МЭИ», 2018, 20 с.

16. **Han Peng, Cheng Ming, Wei Xinch, Li Ning.** Modeling and performance analysis of a dual-stator brushless doubly fed induction machine based on spiral vector theory. – *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2016, 52, № 2, pp. 1380–1389.

17. **Пью Мин Тхейн.** Создание информационно-методического обеспечения для системного проектирования статических преобразователей в составе машинно-электронных генерирующих систем для малой энергетики и автономных объектов: Автореф. дисс.... канд. техн. наук. НИУ «МЭИ», 2013, 20 с.



18. **Ян Нанг Мьинг.** Исследование возможностей совершенствования электромашинных преобразователей для машинно-электронных генерирующих систем автономных объектов. Автореф. дисс... канд. техн. наук. НИУ «МЭИ», 2014, 20 с.
19. **Нгуен Хью Нам, Г.С.Мызык.** О структурно-алгоритмической организации силовой машинно-электронной части ветроэлектрической установки, работающей параллельно с сетью. – Новое в российской электроэнергетике, 2018, № 10, с. 6–22.
20. **Мызык Г.С., Мьё Мин Тант.** Об использовании асинхронной машины с короткозамкнутым ротором при синтезе генерирующих электротехнических комплексов. – Практическая силовая электроника, 2019, № 2(74), с. 46–54.
21. **Хланг Мин У.** Создание информационно-методического обеспечения для системного проектирования преобразующих электронных, трансформаторно-электронных и генерирующих машинно-электронных систем электротехнических комплексов автономных объектов: Автореф. дисс... доктора техн. наук. НИУ «МЭИ», 2017, 40 с.
22. **Бериллов А.В., Маслов С.И., Мызык Г.С.** Об улучшении технических характеристик системы генерирования напряжения постоянной частоты при переменной частоте вращения вала на базе асинхронизированного синхронного генератора. – Практическая силовая электроника, 2012, № 45, с. 6–12.
23. **Thant M. M., Mytsyk G. S., Oo H.M.** Research results of low-distorting three phase active rectifier in the structure of the fed-converted generator. – IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIcon Rus), Moscow, 2018, pp. 1761-1768. doi: 10.1109/EIconRus.2018.8317447.
24. **Nguyen Huu Nam, G.S Mytsyk (Prof.Dr.), A.V Berilov and Myo Min Thant.** Algorithmic Structure of Wind Turbines System based on an Induction Machine Directly Connected to the Grid. Iss. MATEC Web of Conf., vol. 220, 2018. The 2nd Intern. Conf. on Mechanical, System and Control Engineering (ICMSC 218), № 05004, 6 p., Published online 29.10.2018. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822005004>.
25. **Myo Min Thant, Mytsyk G.S., Berilov A.V.** Fed-Converted Generator Based on the Squirrel-Cage Rotor Asynchronous Machine, with Condensing Selfexcitation and Stabilization of the Output Voltage. – Proceedings of Academicsera 49th Intern. Conf., Osaka, Japan, 8–9 May, 2019, pp. 1–5.
26. **Maslov A.E., Mytsyk G.S.** Voltage-stabilized Brushless Permanent Magnets Generator with Reversible Voltage Booster Channel. – Intern. Conf. on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russia, 2019, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICIEAM.2019.8743079. Electronic ISBN: 978-1-5386-8119-0. Print on Demand (PoD) ISBN: 978-1-5386-8120-6.
27. **Ботвинник М.М.** Асинхронизированная синхронная машина. М.: Энергия, 1964.
28. **Копылов И.П.** Математическое моделирование электрических машин. М.: Высшая школа, 2001, 250 с.
29. **Постников И.М., Новиков А.В., Прокофьев Ю.А. и др.** Теория и методы расчета асинхронных турбогенераторов. Киев: Наукова думка, 1977.

[05.09.2019]

*А в т о р: Мызык Геннадий Сергеевич – доктор техн. наук, профессор кафедры «Электротехнические комплексы автономных объектов и электрический транспорт» НИУ «МЭИ», диссертацию защитил в 2001 г.*

*Electrichestvo, 2020, No. 7, pp. 22–32*

*DOI:10.24160/0013-5380-2020-7-22-32*

## On the Modern Solutions on Combined Machinery and Electronic Generating Systems for Small-Scale Power Facilities and Movable Objects

**MYTSYK Gennady S.** (National Research University «Moscow Power Engineering Institute» – NRU «MPEI», Moscow, Russia) – Professor of Electrical Complex of Self-Contained Objects and Electrical Transport Dept., Dr. Sci. (Eng.)

*It is often believed that wind energy today is not always a profitable (in business terms) electricity generating technology. There is no doubt, however, that this environmentally clean technology with an inexhaustible resource implies its widespread use not only in the near future, but also nowadays under the appropriate conditions. In the final analysis, the interests of national security play a decisive role here, and, hence, the priority in solving the problem of power supply availability and the country's security through the development of small-scale power generation (including, above all, the development of wind and hydropower industries) remains to be decided at the state level. Higher reliability of autonomous power supply (APS) and the renewable nature of energy resources used by it are the factors determining the fundamental difference between the APS for geographically dispersed consumers that are located far away from centralized power lines. The first design-and-organizational objective, which should be addressed in a particular country, is to compile a map of the distribution of wind and hydropower resources, based on which the advisability of using this technology should be analyzed. The second objective is to use the most rational technical solutions for wind (hydro) electrical installations. The article considers the structures of alternative versions of installations that are presented only by a comprehensive electrical package in the form of a combined machine-and-electronic generating system of the «variable speed-constant frequency»*

type. Synchronous and asynchronous machines are considered as converters of mechanical energy into electrical energy. The second version implies the use of induction machines with a squirrel-cage rotor and with a phase rotor. The mechanical energy converters operate jointly with an electronic frequency converter, which can be embodied as two series-connected four-quadrant converters. The article presents a brief comparative analysis of five wind turbine structures operating autonomously and in parallel with the grid. The results of computer simulation of the most rational options are presented. The aim of the study is to give an idea to the developers about the modern solutions for constructing comprehensive electrical packages for wind power systems and to simplify the procedure of selecting the most rational solution.

**Key words:** wind power plant, synchronous and asynchronous machines, variable drive shaft rotation frequency, generator mode, voltage and frequency stabilization means, results of computer simulation, comparative assessment of versions

#### REFERENCES

1. **Elektrooborudovaniye letatel'nykh apparatov T. 1. Sistemy elektrosnabzheniya letatel'nykh apparatov** (Electrical equipment of aircraft, vol. 1. Power supply systems for aircraft / Ed. S.A. Gruzkov). M.: Izd. MEI, 2005, 508 p.
2. **Kharitonov S.A., Stepnikov A.A. Sistema generirovaniya elektricheskoy energii tipa «Sinkhronnyy generator–invertor napryazheniya–invertor napryazheniya».** – *Trudy II Mezhdunarodskoy otraslevoy nauchno-tekhn. konf. «Avtomatizatsiya i progressivnyye tekhnologii»* (The system for generating electrical energy of the type «Synchronous generator–voltage inverter–voltage inverter». – Proc. of the II Interuniversity sectoral scientific and technical. conf. «Automation and advanced technologies», 27 September – 1 October 1999. Novoural'sk, 1999, pp. 190–192.
3. **Mytsyk G.S. O nekotorykh rezul'tatakh i problemakh sistemnogo podkhoda k poiskovomu proyektirovaniyu mashinno-elektronnykh generiruyushchikh kompleksov avtonomnykh ob'yektov.** – *Trudy nauchno-tekhn. konf. «Elektrifikatsiya letatel'nykh apparatov», posvyashchennaya 125-letiyu akad. V.S. Kulebakina* (About some results and problems of a systematic approach to prospecting design of machine-electronic generating complexes of autonomous objects. – Proc. of scientific and technical. conf. «Electrification of aircraft», dedicated to the 125th anniversary of academician V.S. Kulebakin, Moscow, 1 November 2016, pp. 283–291.
4. **Mytsyk G.S., M'yo Min Tant. Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)**, 2018, No. 2, pp. 34–42.
5. **Sikorski A., Kuuma A.** Cooperation of induction squirrel-cage generator with grid con-nected AC/DC/AC converter. – *Bulletin of the Polish Academy of sciences. Technical sciences.* 2009, vol. 57, No. 4, pp. 317–322.
6. **Bhim Singh, S.S. Murthy, Sushma Gupta.** STATCOM-Based Voltage Regulator for Self-Excited Induction Generator Feeding Nonlinear Loads. – *IEEE Trans. on Ind. Electronics* 2006, vol. 53, No. 5, pp. 1437–1451.
7. **Berilov A.V., Maslov S.I., Mytsyk G.S., Khlaing Min U.** *Elektropitanie – in Russ. (Power suppl)*, 2011, No. 2, pp. 12–19.
8. **Goryakin D.V., Mytsyk G.S. Mashinno-elektronnaya generiruyushchaya sistema dlya maloy energetiki i avtonomnykh ob'yektov.** – *Trudy X Mezhdunarod. yezhegodnoy konf. «Vozobnovlyayemaya i malaya energetika 2013»* (Machine-electronic generating system for small energy and autonomous facilities. – Proc. of X Intern. conf. «Renewable and Small Energy 2013»). M.: Komitet VIE Ros-SNIO, pp. 102–107.
9. **Goryakin D.V., Mytsyk G.S. Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)**, 2012, No. 5, pp. 23–31.
10. **Goryakin D.V., Mytsyk G.S. Prakticheskaya elektronika – in Russ. (Practical Electronics)**, 2012, No. 45, pp. 13–17.
11. **Perumal B. Venkatesa, Chatterjee J.K.** Analysis of a Self Excited Induction Gener-ator with STATCOM/Battery Energy Storage System/Power India Conference. IEEE 2006.
12. **Mytsyk G.S., Goryakin D.V. Prakticheskaya silovaya elektronika – in Russ. (Practical power electronics)**, 2018, pp. 49–55.
13. **K'o Zo Lin.** *Issledovaniye vozmozhnostey uluchsheniya pokazateley kachestva avtonomnoy sistemy generirovaniya napryazheniya stabil'noy chastoty na baze sinkhronizirovannogo asinkhronnogo generatora. Avtoref. dis... kand. tekhn. nauk* (Study of the possibilities of improving the quality indicators of an autonomous system for generating a voltage of a stable frequency based on a synchronized asynchronous generator. Abstract. diss.... Cand. Sci. (Eng.). NIU «MEI»), 2012, 20 p.
14. **Goryakin D.V.** *Issledovaniye novykh vozmozhnostey sovershenstvovaniya mashinno-elektronnykh generiruyushchikh sistem dlya maloy energetiki i avtonomnykh ob'yektov. Avtoref. dis... kand. tekhn. nauk* (The study of new opportunities for improving machine-electronic generating systems for small-scale energy and autonomous facilities. Abstract diss ... Cand. Sci. (Eng.). M.: NIU MEI, 2013, 20 p.
15. **Nguyen Khyu Nam.** *Sozdaniye informatsionno-metodicheskogo obespecheniya sistem-nogo proyektirovaniya elektrotekhnicheskogo kompleksa dlya vetroelektricheskoy ustanovki, rabotayushchey parallel'no s set'yu: Avtoref. dis... kand. tekhn. nauk* (Creation of information and methodological support for the system design of the electrical complex for a wind power installation operating in parallel with the network. Abstract. diss ... Cand. Sci.(Eng.). NIU «MEI», 2018, 20 p.
16. **Han Peng, Cheng Ming, Wei Xinchu, Li Ning.** Modeling and performance analysis of a dual-stator brushless doubly fed induction machine based on spiral vector theory. – *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 2016, 52, No. 2, pp. 1380–1389.
17. **P'yu Min Tkheyn.** *Sozdaniye informatsionno- metodicheskogo obespecheniya dlya sistemnogo proyektirovaniya staticheskikh preobrazovateley v sostave mashinno-elektronnykh generiruyushchikh sistem dlya maloy energetiki i avtonomnykh ob'yektov: Avtoref. dis... kand. tekhn. nauk* (Creation of information and methodological support for the system design of static converters as part of machine-electronic generating systems for small-scale power generation and autonomous objects. Abstract. diss.... Cand. Sci. (Eng.). NIU «MEI», 2013, 20 p.
18. **Yan Naing M'int.** *Issledovaniye vozmozhnostey sovershenstvovaniya elektroma-shinnykh preobrazovateley dlya mashinno-elektronnykh generiruyushchikh sistem avtonomnykh ob'yektov: Avtoref. dis... kand. tekhn. nauk* (The study of the possibilities of improving the electro-bus converters for machine-electronic generating systems of autonomous objects. Abstract. diss.... Cand. Sci. (Eng.). NIU «MEI», 2014, 20 p.
19. **Nguyen Khyu Nam, G.S. Mytsyk.** *Novoye v rossiyskoy elektroenergetike – in Russ. (News in Russian Electric Power Engineering)*, 2018, № 10, p. 6–22.
20. **Mytsyk G.S., M'yo Min Tant.** *Prakticheskaya silovaya elektronika – in Russ. (Practical Power Electronics)*, 2019, № 2(74), pp. 46–54.
21. **Khlaing Min U.** *Sozdaniye informatsionno-metodicheskogo obespecheniya dlya sistemnogo proyektirovaniya preobrazuyushchikh elektronnykh, transformatorno-elektronnykh i generiruyushchikh mashinno-elektronnykh sistem elektrotekhnicheskikh kompleksov*

*avtonomnykh ob'yektov: Avtoref. dis... doktora tekhn. nauk* (Creation of information and methodological support for system design of converting electronic, transformer-electronic and generating machine-electronic systems of electrical complexes of autonomous objects. Abstract. diss.... Dr. Sci. (Eng.). NIU «MEI», 2017, 40 p.

22. **Berilov A.V., Maslov S.I., Mytsyk G.S.** *Prakticheskaya silovaya elektronika – in Russ. (Practical Power Electronics)*, 2012, № 45, pp. 6–12.

23. **Thant M.M., Mytsyk G.S., Oo H.M.** Research results of low-distorting three phase active rectifier in the structure of the fed-converted generator. – IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), Moscow, 2018, pp. 1761-1768. doi: 10.1109/EIConRus.2018.8317447.

24. **Nguyen Huu Nam, G.S Mytsyk (Prof.Dr.), A.V Berilov and Myo Min Thant.** Algorithmic Structure of Wind Turbines System based on an Induction Machine Directly Connected to the Grid – 2nd Intern. Conf. on Mechanical, System and Control Engineering (ICMSC 218), № 05004, 6 p., Published online 29.10.2018 . DOI: <https://doi.org/10.1051 /mateconf / 201822005004>.

25. **Myo Min Thant, Mytsyk G.S., Berilov A.V.** Fed-Converted Generator Based on the Squirrel-Cage Rotor Asynchronous Machine, with Condensing Selfexcitation and Stabilization of the Output Voltage. – Proc. of Academicera 49th Intern. Conf., Osaka, Japan, 8–9 May, 2019, pp. 1–5.

26. **Maslov A.E., Mytsyk G.S.** Voltage-stabilized Brushless Permanent Magnets Generator with Reversible Voltage Booster Channel. – Intern. Conf. on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russia, 2019, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICIEAM.2019.8743079. Electronic ISBN: 978-1-5386-8119-0. Print on Demand (PoD) ISBN: 978-1-5386-8120-6.

27. **Botvinnik M.M.** *Asinkhronizirovannaya sinkhronnaya mashina* (Asynchronous synchronous machine). M.: Energiya, 1964.

28. **Kopylov I.P.** *Matematicheskoye modelirovaniye elektricheskikh mashin* (Mathematical modeling of electrical machines). M.: Vys-shaya shkola, 2001, 250 p.

29. **Postnikov I.M., Novikov A.V., Prokof'yev Yu.A. et. al.** *Teoriya i metody rascheta asinkhronnykh turbogeneratorov* (Theory and calculation methods of asynchronous turbogenerators). Kiyev: Naukova dumka, 1977.

[05.09.2019]