Библиотека СОК

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

ВЫПОЛНИЛ: Воропаев А.А.

Мариуполь 2012 г.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Анализ режимов работы, схем включения ветроэлектростанций и их влияние на работу систем электроснабжения.
1.1 Использование ветроэлектростанций в электроэнергетических системах
1.2 Анализ струтур и применяемости главных схем электрических соединений современных сетевых ветропарков
1.3 Обоснование использования асинхронного генератора в системе генерирования энергии для ВЭУ
1.4 Основные требования к преобразователям электроэнергии
1.5 Особенности работы статических преобразователей в ВЭУ
ЛИТЕРАТУРА

1.1 Использование ветроэлектростанций в электроэнергетических системах

Широкомасштабному использованию ветроэлектростанций в электроэнергетических системах препятствуют проблемы обеспечения приемлемого качества генерируемой электроэнергии, несовпадение режима выработки энергии ветроэлектростанцией с графиком электропотребления и необходимость резервирования мощности ветроэлектростанций в энергосистеме.

Для сглаживания колебаний генерируемой ветроэлектростанцией мощности и ее согласования с режимом работы энергосистемы часто предлагается использовать аккумуляторы энергии: электрические батареи, воздухо и гидроаккумулирующие электростанции (ВАЭС и ГАЭС) и другие. Так, существует предложение подавать электроэнергию от ветроэлектростанций на ГАЭС с помощью специальных электрических линий, а запасенную за счет вырабатываемой ветроэлектростанцией энергии потенциальную энергию воды использовать затем в гидрогенераторе, выдавая электроэнергию в энергосистему по мере надобности. В этом случае достаточно обеспечить условия работы электродвигателей насосов ГАЭС по качеству электроэнергии (синусоидальности напряжения, частоте и мощности), а энергосистема получит уже стабилизированную электроэнергию от гидрогенератора.

Однако при этом не решается проблема гарантированного покрытия графика нагрузки энергосистемы: сглаживаются лишь минутные, часовые, суточные, в лучшем случае — недельные колебания потока вырабатываемой ветроэлектростанцией энергии. В годовом же разрезе комплексы «ветроэлектростанция + аккумулятор энергии» приходится резервировать специальными электростанциями, работающими в сезон недостаточной интенсивности ветра, что, по сути, является дублированием мощности и значительно удорожает отпускаемую электроэнергию за счет не только дополнительных затрат на топливо, но и капиталовложений на дублирующую мощность.

Впрочем, можно предложить решение, позволяющее исключить резервирование мощности ветроэлектростанций мощностью специально сооружаемых для этого станций. С этой целью при работе ветроэлектростанций в энергосистеме путем аккумулирования ее электроэнергии и последующей выдачи ее в сеть аккумулятор энергии дозаряжают в период провала графика электрических нагрузок (ночью) от полупиковых тепловых электростанций с таким расчетом, чтобы к моменту утреннего подъема электрической нагрузки он был заряжен полностью. При этом привлекаемые станции постепенно переключаются на покрытие возрастающей нагрузки потребителей. Тогда аккумулятор энергии будет способен покрыть расчетную нагрузку в течение дня. Поскольку в любое время года в энергосистеме в период низких электрических нагрузок существует свободная мощность, предлагаемый способ обеспечивает круглогодичное резервирование мощности ветроэлектростанций, имеющей аккумулятор энергии суточного регулирования. Дублирование

мощности ветроэлектростанций мощностью специальных станций исключается путем двойного использования как аккумулятора энергии, так и полупиковых ТЭС энергосистемы.

Для реализации данного способа необходимо обеспечить техническими средствами (линией электропередачи, переключателем тока и т.д.) возможность подключения аккумулятора энергии к электрической сети для дозарядки, а также покрытие прироста нагрузки в энергосистеме ее наиболее экономичными полупиковым и ТЭС, имеющими в это время свободную мощность. Энергия из аккумулятора может использоваться в любой части графика электрических нагрузок: пиковой, полупиковой, базисной. Однако с точки зрения стоимости замещаемой электроэнергии, первое предпочтительнее.

Следовательно, максимальная доля ветроэлектростанций в энергосистеме определяется наличием полупиковых ТЭС на органическом топливе. Их мощности должно быть достаточно для полной зарядки аккумуляторов ветроэлектростанций за период провала графика электрической нагрузки. Тогда ветроэлектростанция с аккумулятором энергии суточного регулирования будет гарантированно покрывать определенную часть графика электрических нагрузок. При этом повышается коэффициент использования установленной мощности уже существующих высокоэкономичных полупиковых тепловых станций, оборудование которых ночью обычно простаивает либо используется неэффективно. Для этой цели идеально подходят маневренные теплоэлектроцентрали, поскольку они имеют низкий удельный расход топлива на выработку электроэнергии и у них наблюдается наиболее резкое падение энергетических показателей при снижении электрической нагрузки станции, поэтому желательно увеличение числа часов использования их мощности. В конечном счете повышается экономичность электроснабжения, так как затраты на резервирование выработки энергии ветроэлектростанцией связаны лишь с затратами на топливо (при этом одновременно возрастает эффективность использования полупиковых ТЭС и маневренных ТЭЦ), в то время как в известных решениях присутствуют и затраты на строительство высокоманевренных дублирующих электростанций (в основном дизельных), работающих параллельно с ветроэлектростанциями в базисной части графика электрических нагрузок, либо вероятностный характер производства электроэнергии на ветроэлектростанциях демпфируется за счет резерва энергосистемы. В последнем случае, во-первых, существует жесткое ограничение доли ветроэлектростанций в энергосистеме и, во-вторых, снижается резерв энергосистемы, что чревато значительными экономическими потерями в аварийных ситуациях.

В случае, если возможно обеспечение достаточно высокого качества электроэнергии, генерируемой ветроэлектростанцией, с приемлемыми затратами, способ может применяться в модифицированном виде. Достаточно иметь один аккумулятор энергии — общий на энергосистему, накапливающий в течение суток «излишки» электроэнергии ветроэлектростанций, работающих в составе энергосистемы. В частности, это может быть актуально, если мощность ветроэлектростанций сравнима с мощностью местной

энергосистемы. Преимущества такого варианта связаны с укрупнением и возможностью выбора места расположения аккумулятора энергии. Его использование наиболее перспективно применительно к электростанциям на нетрадиционных возобновляемых источниках энергии (НВИЭ), не имеющим серьезных проблем с качеством генерируемой электроэнергии: приливным и волновым электростанциям, малым ГЭС. Тогда такие электростанции и полупиковые ТЭС выступают партнерами. В результате повышается эффективность использования как полупиковых ТЭС, так и электростанций на НВИЭ, то есть они взаимно повышают конкурентоспособность друг друга в энергосистеме. При этом допускается широкомасштабное применение станций на НВИЭ в энергосистеме, что возможно в перспективе при повышении технико-экономических показателей как самих электростанций на НВИЭ, так и полупиковых ТЭС за счет применения в их качестве маневренных теплоэлектроцентралей, парогазовых установок и электростанций на базе топливных элементов, а также аккумуляторов энерги, в том числе, опять же, на топливных элементах. Пока же способ может найти ограниченное применение в небольших ветродизельных системах, содержащих аккумулятор энергии (например, аккумуляторные батареи). Аккумулятор покрывает пиковую нагрузку, а дизельная установка — базисную и полупиковую, дозаряжая также, в случае необходимости, батарею в период низких электрических нагрузок.

Таким образом энергия ветра может использоваться для покрытия пиковых электрических нагрузок[24].

1.2 Анализ струтур и применяемости главных схем электрических соединений современных сетевых ветропарков

Развитие современной ветроэнергетики идёт в основном по двум крупным направлениям:

– ветроэлектрические установки (ВЭУ) малой мощности, предназначенные для обеспечения автономного электроснабжения изолированных объектов и объектов, удалённых от электрических сетей;

– крупные ветропарки (ВП) на базе ВЭУ мегаваттного класса, работающие в составе объединённых энергосистем.

Второе направление в настоящее время развивается ускоренными темпами в связи с рядом преимуществ ВП перед индивидуальными ВЭУ.

Однако в связи с большим многообразием конструкций современных мощных ВЭУ, представленных на мировом рынке, с одной стороны, и специфическими требованиями к размещению установок на местности, с другой стороны, главные электрические схемы ВП также отличаются многообразием, помимо технической стороны определяемым местными климатическими условиями и ландшафтом.

Многообразие конструкций ВЭУ проявляется прежде всего в использовании ведущими производителями нескольких типов генераторов электрической энергии, которые, в свою очередь, предъявляют различные требования как к системам управления и регулирования комплексов в целом, так и к наличию или отсутствию дополнительных ступеней преобразования электрической энергии до подключения к электрическим сетям.

В отличие от традиционных электростанций с достаточно компактным расположением первичных и вторичных преобразователей энергии, ВП в зависимости от установленной мощности могут занимать значительные площади с расположением отдельных ветроагрегатов на разном уровне по вертикали и протяжённостью от сотен метров до единиц километров. С учётом довольно внушительных единичных мощностей современных ВЭУ (от 1 до 5 МВт) такое положение обуславливает необходимость применения промежуточных ступеней трансформации электрической энергии для снижения уровня электрических потерь.

1.2.1 Краткий обзор особенностей конструкций современных ВЭУ мегаваттного класса

Первичное преобразование энергии ветра в механическую энергию в подавляющем большинстве современных мощных ВЭУ осуществляется при помощи трёхлопастных горизонтально-осевых ветродвигателей, обладающих относительно высоким коэффициентом использования энергии ветра и возможностью регулирования крутящего момента путём изменения углов атаки лопастей.

Характерной особенностью крупных ВЭУ является применение в подавляющем большинстве случаев механической трансмиссии, по-вышающей

до приемлемой величины частоту вращения вала, приводящего электрический генератор [35–42]. Это позволяет использовать в установках стандартные электрогенераторы, что в конечном итоге снижает затраты на выработку киловатт-часа электроэнергии. Специализированные низкооборотные генераторы для ВЭУ серийно производятся единственной компанией «Энеркон» [42].

Следующей характерной особенностью современного парка мощных ВЭУ является применение в большинстве конструкций (более 80 %) асинхронных генераторов с короткозамкнутым ротором. Несмотря на относительно скромные энергетические показатели, определяющими факторами выступают более высокая надёжность асинхронных машин и меньшие затраты на производство единицы электрической энергии в связи с их меньшей стоимостью. Синхронные генераторы, подключаемые к сети без промежуточных преобразователей, применяются редко.

Наряду с относительной простотой и высокой надёжностью ВП на базе ВЭУ с синхронными генераторами или асинхронными генераторами с КЗ ротором страдают большим недостатком – такие ВЭУ работают при неизменной частоте вращения главного вала, что приводит к недовыработке электроэнергии в переходных режимах от минимальной рабочей скорости ветра до номинальной. Именно это обстоятельство привело к появлению ВЭУ на базе:

– асинхронного генератора с переключаемым числом пар полюсов и двухскоростным мультипликатором [44, 45];

– асинхронного генератора с фазным ротором и регулируемым скольжением [35,42];

– асинхронизированного синхронного генератора с питанием обмотки ротора от статического преобразователя частоты [35,36,45];

В последние годы производители крупных ВЭУ начали более широкое использование в их структуре статических преобразователей электрической энергии. В основном преобразовательная техника применяется при использовании ВЭУ с непостоянной частотой вращения главного вала, укомплектованных асинхронными генераторами с КЗ ротором или синхронными генераторами, как с электромагнитным, так и с магнитоэлектрическим возбуждением.

И наконец, в последние 30 лет в мировой ветроэнергетике наблюдается устойчивая тенденция роста единичных мощностей ВЭУ, которые в настоящее время достигают величин в 5– 6 мегаватт [36,48] .

1.2.2 Анализ возможных вариантов схем электрических соединений ВП

Структура, характеристики и комплектующие схемы электрических соединений ВП определяются множеством факторов: единичной мощностью установок, их количеством, расстановкой на местности, типом применяемых генераторов электроэнергии и наличием статических преобразователей. Фактически ВП представляет собой локальную распределительную

электрическую сеть с обратно направленным потоком энергии, которую следовало бы назвать коллекторной сетью. В зависимости от перечисленных выше параметров соединительная сеть ВП может быть выполнена по магистральному, радиальному или смешанному принципу. Взаимное расположение установок и дистанция между ними обусловлены в основном двумя факторами: единичной мощностью и формой розы ветров на рассматриваемой площадке.

В случае расположения установок в линию, что характерно для горных перевалов, побережий морей или крупных озёр, оффшорных парков на морской косе или искусственном молу, применяется магистральная схема. Роза ветров при этом, как правило, имеет устойчивую вытянутую форму с ярко выраженными доминирующими направлениями, и линия установок располагается перпендикулярно биссектрисе сектора, ограничивающего эти направления. Расстояния между отдельными ВЭУ в ряду в этом случае могут составлять лишь 3–4 диаметра ветротурбины (ВТ), поскольку турбулентные следы от ВТ не оказывают влияния на работу соседних установок. Величины диаметров современных трёхлопастных ВТ мегаваттного класса колеблются в пределах от 60 до 120 метров. Таким образом, ВП, состоящий, например, из 10 установок, расположенный на морской косе, может иметь протяжённость магистрального кабеля от 1800 до 2400 метров.

В случае расположения ВП на материке в степной зоне, где роза ветров более равномерна, может быть применена радиальная схема с главной повышающей подстанцией в геометрическом центре парка (при этом соединение с прилегающей электрической сетью обычно выполняется комбинированной кабельно-воздушной линией электропередачи, поскольку на территории ВП воздушные ЛЭП, как правило, не применяются). При равномерной розе ветров дистанции между отдельными установками во всех направлениях должны быть одинаковыми. Их величина должна составлять не менее 6–9 [46], а по некоторым источникам [47] – 20 диаметров ВТ. Данное требование вызвано тем, что при рабочих для современных ВЭУ скоростях ветра (чаще всего от 10 до 25 м/с) турбулентный след от ВТ простирается по направлению ветра именно на такое расстояние. Вместе с тем попадание ВТ в турбулентный воздушный поток резко снижает её аэродинамический КПД.
Таким образом, для ВП с диаметрами ВТ от 60 до 120 метров дистанции между отдельными установками возрастают до 600–1200 метров.

В настоящее время в составе ВП наиболее широкое распространение получили ВЭУ с единичными мощностями от 1,5 до 3,5 МВт, номинальным напряжением на выходе генератора 660–690 В и диаметрами ВТ от 60 до 90 метров.

Простейший расчёт показывает, что при указанных мощностях генераторов и приведённых выше длинах соединительных кабельных линий экономичная работа коллекторных сетей ВП возможна лишь в случае применения в них повышенных рабочих напряжений.

Чаще всего современная сетевая ВЭУ снабжается собственным повышающим трансформатором, а соединение установок между собой осуществляется на стороне среднего напряжения от 6 до 30 кВ.

1.2.3 Схемы ВП небольшой мощности

ВП небольшой мощности, построенные 15–20 лет назад и состоящие из ВЭУ единичной мощностью от 100 до 250 кВт, выполнялись на рабочих генераторных напряжениях. На рис. 1–3 приведены варианты радиальных схем ВП на базе ВЭУ с различными типами электрогенераторов.

В случае если статические преобразователи отсутствуют, и частота вращения вала установки при работе поддерживается стабильной и кратной частоте сети, для ВП на базе ВЭУ с синхронными генераторами может быть несколько вариантов подключения:

– каждый генератор имеет собственное устройство синхронизации;

– устройства автоматической синхронизации синхронизируют генераторы между собой в группах, а затем происходит синхронизация

групп с сетью;

– устройства автоматической синхронизации синхронизируют генераторы между собой в группе, затем синхронизируются группы, а с сетью синхронизация происходит непосредственно на главной повышающей подстанции.

Очевидно, что первый вариант наиболее полно отвечает эксплуатационным требованиям и позволяет устанавливать минимальное количество синхронизирующих устройств. В этом случае любой из генераторов может подключаться к сети независимо от других, при запуске после аварии на одной из подстанций первой ступени синхронизируется только одна группа генераторов (рис. 1).

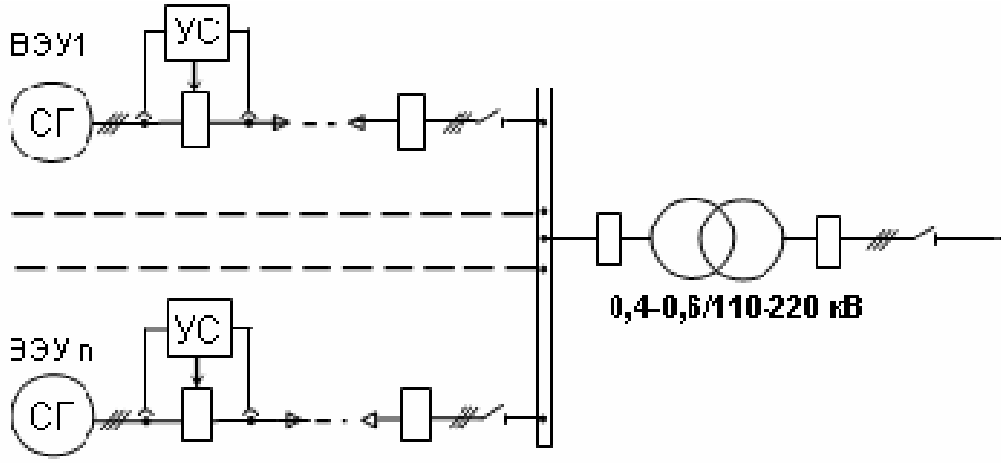


Рисунок 1.1 ВП небольшой мощности на базе ВЭУ с синхронными генераторами

Основными недостатками этой концепции являются необходимость частой синхронизации генераторов ВЭУ при подключении к сети и недовыработка

электроэнергии, обусловленная постоянной частотой вращения ВТ. Синхронизация должна осуществляться каждый раз после отключения ВЭУ от сети вследствие недостаточной величины скорости ветра, после отключения от сети вследствие превышения максимальной скорости ветра, а также после планово-предупредительных осмотров и ремонтов.

Применение асинхронных генераторов позволяет исключить из главной схемы ВП синхронизирующие устройства. Однако в этом случае собственнику ВП приходится либо расплачиваться с сетевой компанией за реактивную мощность, потребляемую установками из сети, либо применять устройства компенсации реактивной мощности. Компенсирующие устройства можно установить непосредственно у каждого генератора, одно на каждую группу генераторов или одно на повышающей подстанции второй ступени (рис.1.2). Для «мягкого» подключения ВЭУ к сети по достижению ВТ синхронной частоты вращения в таки схемах используются управляемые тиристорные вентили.

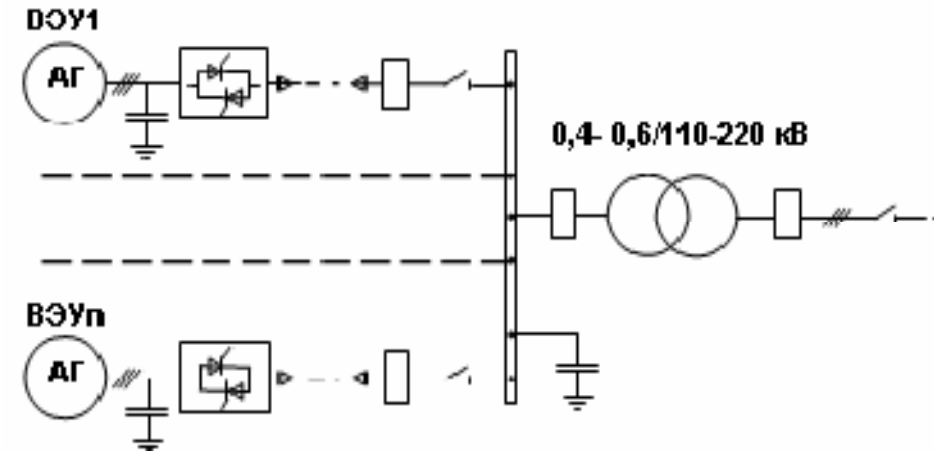


Рисунок 1.2. ВП небольшой мощности на базе ВЭУ с асинхронными генераторами с КЗ ротором

Аналогичные схемы подключения могут быть использованы для ВЭУ на базе двухскоростных асинхронных генераторов и асинхронных генераторов с фазным ротором и регулируемым скольжением. Однако такие электрические машины чаще применяются в составе более мощных ВЭУ, снабжаемых индивидуальными повышающими трансформаторами, и схемы их подключения рассмотрены ниже.

Если ВЭУ, входящие в состав ВП имеют непостоянную частоту вращения ВТ и оснащены асинхронными генераторами с КЗ ротором или синхронными генераторами (с электромагнитным или магнитоэлектрическим возбуждением) непостоянной частоты вращения, передача всей электрической мощности в сеть осуществляется с помощью статического преобразователя частоты [8,16] (рис. 1.3).

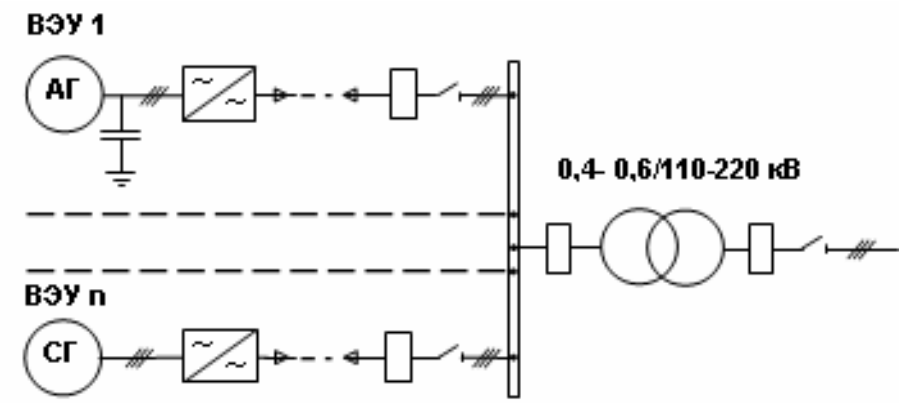


Рисунок 1.3. ВП небольшой мощности на базе ВЭУ с асинхронными или синхронными генераторами непостоянной частоты вращения и полным преобразованием вырабатываемой энергии

1.2.4 Радиальные схемы ВП средней мощности

На рис. 1.4–1.6 приведены схемы ВП, построенные по радиальному принципу с использованием трансформаторов среднего напряжения при ВЭУ.

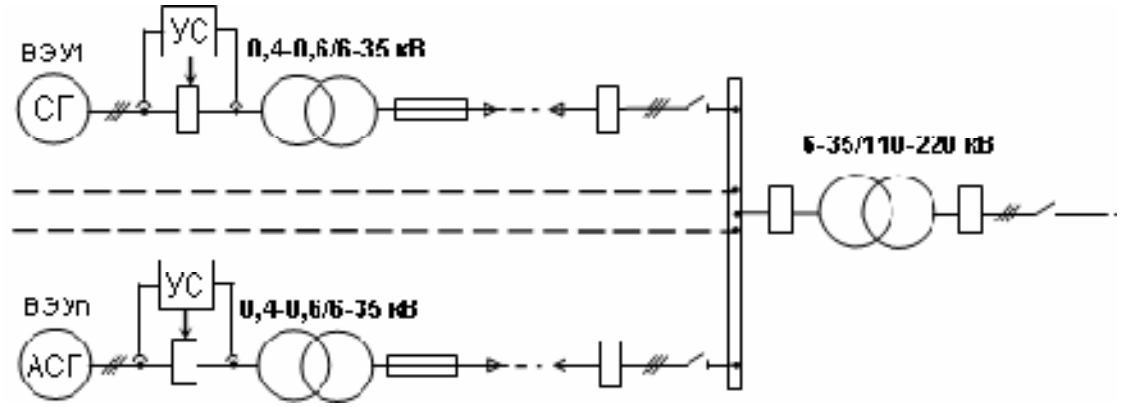


Рисунок 1.4. Радиальная схема соединений ВП на базе ВЭУ с синхронными генераторами

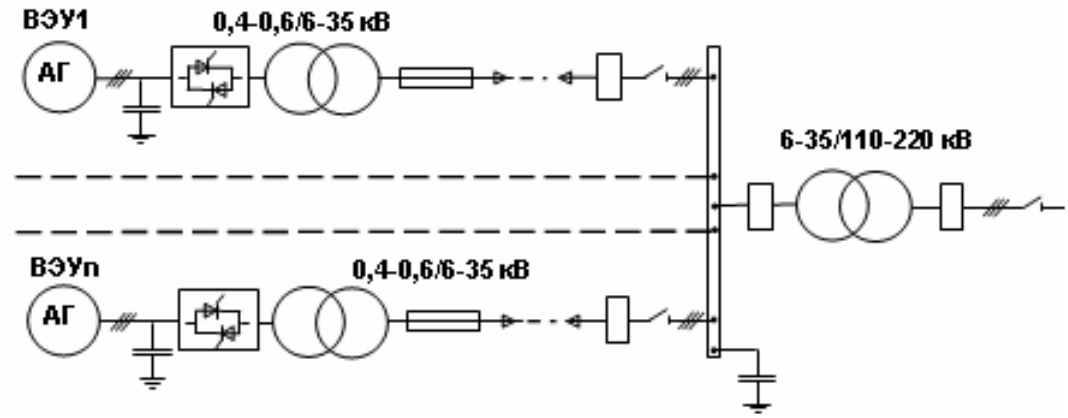


Рисунок 1.5. Радиальная схема соединений ВП на базе ВЭУ с асинхронными генераторами с КЗ ротором

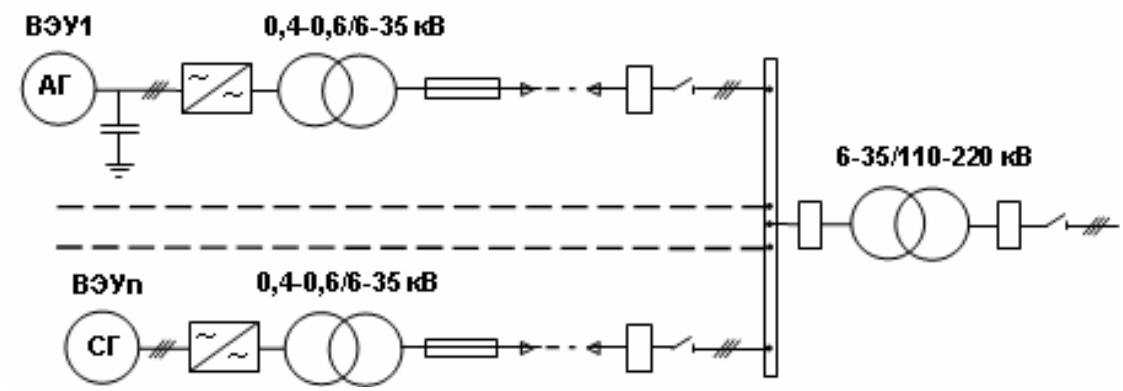


Рисунок 1.6. Радиальная схема соединений ВП на базе ВЭУ с асинхронными или синхронными генераторами непостоянной частоты вращения и полным преобразованием вырабатываемой энергии

При благоприятной геометрии розы ветров может наблюдаться подключение нескольких ВЭУ на один повышающий трансформатор среднего напряжения (рис. 1.7).

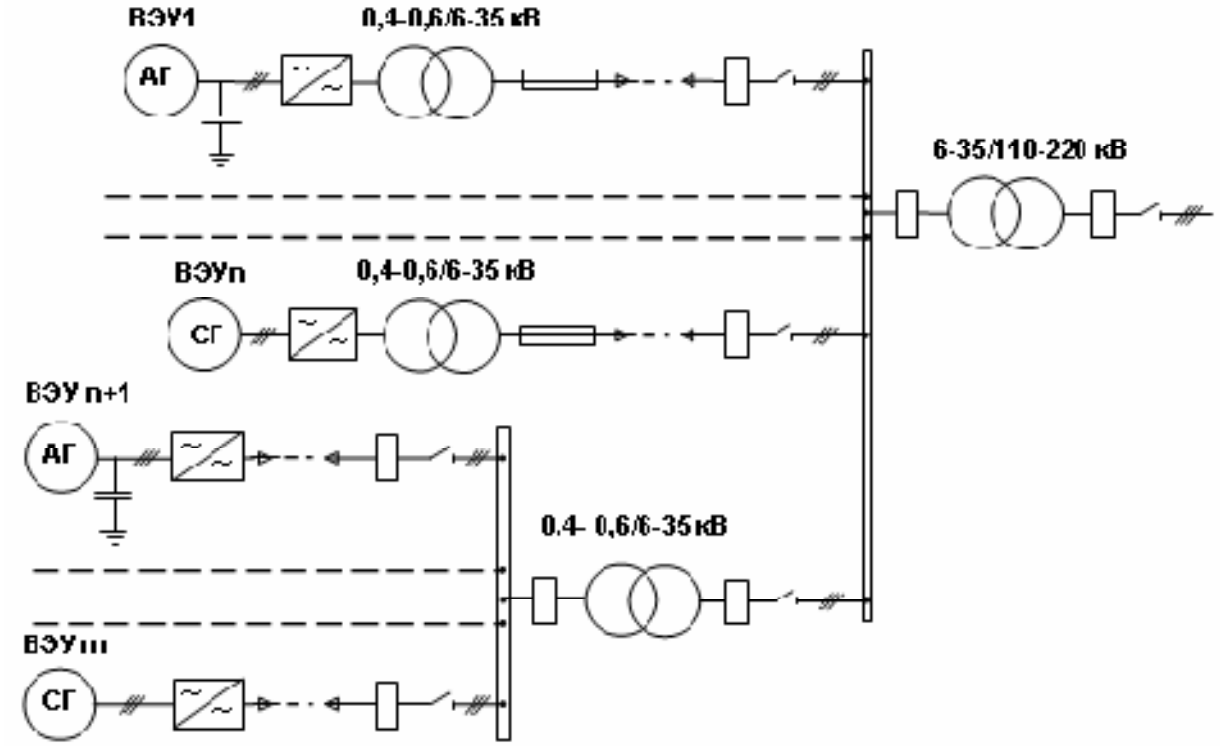


Рисунок 1.7. Вариант сложно разветвлённой радиальной схемы ВП

1.2.5 Магистральные и смешанные схемы соединений ВП средней и большой мощности

Одной из основных тенденций развития мировой ветроэнергетики является строительство крупных оффшорных ВП на континентальных шельфах. Количество ВЭУ в таких ВП колеблется от 8–10 до 80 единиц, при этом установки выстраиваются вблизи побережья в 2–4 ряда и соединяются между собой и с главной повышающей подстанцией подводными кабелями.

На рис. 8 приведена характерная схема соединений оффшорного ВП. Следует отметить, что применение ВЭУ на базе различных по принципу

действия и конструкции электрических генераторов наблюдается в основном при модернизации или расширении действующих ВП. На рис. 3 – 6 различные генераторы показаны как возможные варианты для соответствующих схем электрических соединений. Во вновь создаваемых ВП по эксплуатационным соображениям используются ВЭУ одинаковой конструкции и одного типоразмера.

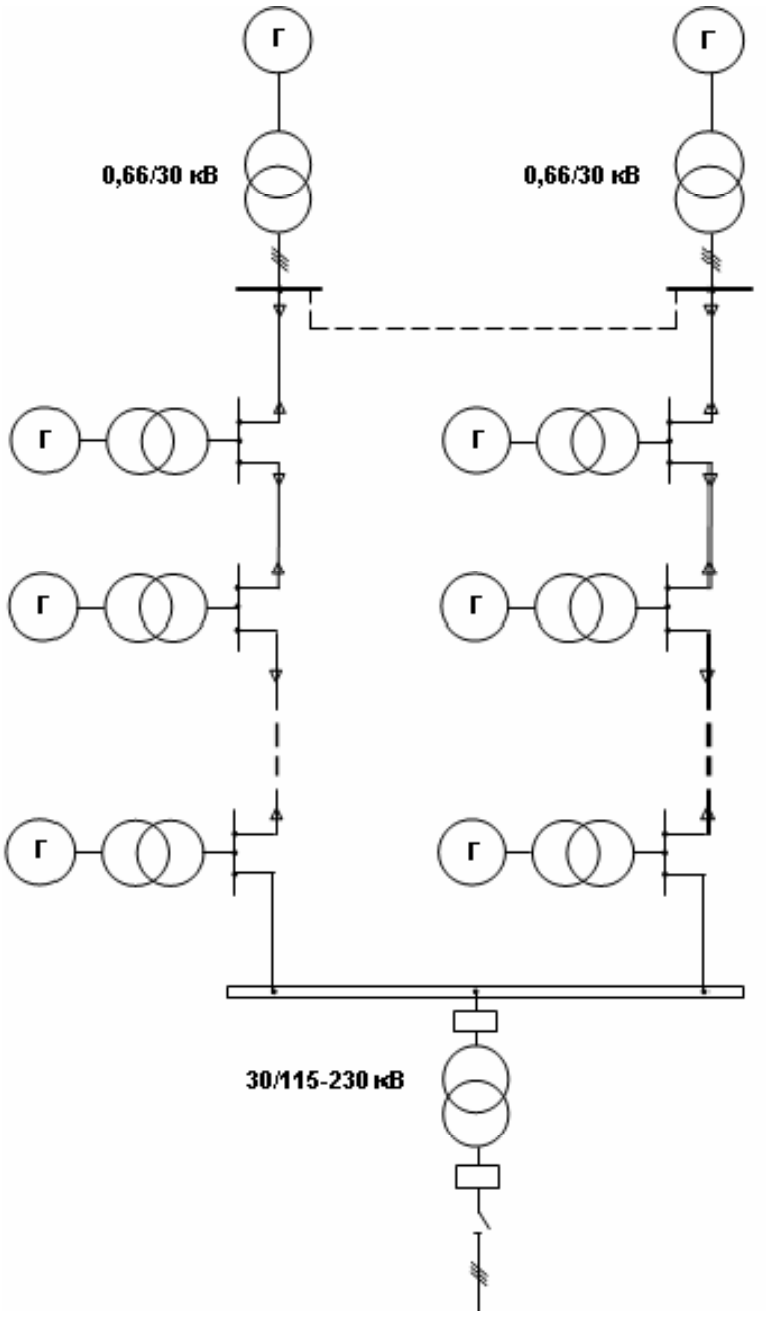


Рисунок 1.8. Пример магистральной (как вариант – кольцевой) схемы электрических соединений оффшорного ВП (упрощено)

На основании изложенного можно сделать следующие выводы:

– в мировой ветроэнергетике наблюдается устойчивая тенденция роста единичной мощности ВЭУ и строительства крупных ВП;

– ВЭУ, входящие в состав ВП всё чаще снабжаются индивидуальными повышающими трансформаторами с напряжением на высокой стороне от 6 до 30 кВ, что обусловлено значительной территориальной протяжённостью ВП;

– конфигурация схемы электрических соединений ВП и используемое рабочее напряжение коллекторной сети определяются значительным числом факторов, основными из которых являются: единичная мощность используемых ВЭУ, количество ВЭУ в парке и роза ветров на рассматриваемой площадке;

– наибольшее распространение для ВП небольшой мощности получили радиальные схемы электрических соединений, а для ВП средней и большой мощности – радиальные, магистральные и смешанные;

– соединительные сети ВП выполняются кабельными линиями среднего напряжения;

– последней тенденцией в развитии крупных ВЭУ и ВП является применение установок с непостоянной частотой вращения на базе синхронных генераторов с полным преобразованием вырабатываемой электроэнергии статическими преобразователями частоты.

1.3 Обоснование использования асинхронного генератора в системе генерирования энергии для ВЭУ

Ветроэнергетика предъявляет к генераторам ряд специальных требований, основными из которых являются [15]:

- высокая стабильность и точность поддержания параметров электроэнергии (амплитуды, частоты и формы генерируемого напряжения) в условиях действия таких дестабилизирующих факторов, как переменная частота вращения ветроколеса, изменяющаяся величина и характер нагрузки, параллельная работа с другими источниками;
- высокие надежность работы и коэффициент полезного действия;
- минимальная масса и габариты;
- минимальная стоимость и эксплуатационные расходы.

В ветроэнергетических установках возможно использование различных типов генераторов: асинхронных, синхронных, магнитоэлектрических и др. При этом тип генератора практически полностью определяется схемой системы генерирования энергии в целом .

Асинхронизированные синхронные генераторы (АСГ), представляющие собой синтез собственно электрической машины и силовых статических преобразователей электроэнергии, применяются наиболее часто.

К достоинствам АСГ следует прежде всего отнести возможность устойчивой работы во всех требуемых по условиям эксплуатации режимах, в том числе и переменных частотах вращения ветроколеса. При этом требования к приводам АСГ по точности стабилизации частоты вращения значительно снижены в сравнении с требованиями, предъявляемыми к приводам традиционных СГ. Области устойчивости АСГ, при прочих равных условиях, всегда больше областей

устойчивости СГ, особенно в режимах глубокого потребления реактивной мощности [9].

Одним из недостатков АСГ является искаженность формы кривой выходного напряжения АСГ. Она отличается от синусоидальной, что обусловлено пространственной несинусоидальностью кривой поля в воздушном зазоре, несинусоидальностью тока возбуждения и сильными электромагнитными помехами из-за коммутаций полупроводниковых приборов преобразователя частоты [16].

Кроме того, АСГ имеет следующие недостатки: невозможность установки демпферных контуров на роторе; большая установленная масса; сложность СУ, и соответственно пониженные значения показателей надежности генератора в целом

Применение АГ долгое время сдерживалось, в основном, по двум причинам: из-за отсутствия малогабаритных силовых конденсаторов, обеспечивающих возбуждение генератора и компенсацию реактивной мощности нагрузки, а так же из-за сложности стабилизации выходного напряжения и частоты.

Разработанные в последние годы конденсаторы имеют удельную массу, не превышающую 0,1 кг/кВА, с развитием устройств бесконтактного управления емкостью, с использованием полупроводниковых элементов и интегральных микросхем, практически снимаются ограничения по использованию АГ в стабилизированных по напряжению и частоте системах генерирования энергии ВЭУ.

АГ имеют следующие преимущества в сравнении с СГ :

- При КЗ в цепи нагрузки происходит развозбуждение АГ, что не требует установки дополнительной защиты генератора;
- При работе АГ на несимметричную нагрузку, короткозамкнутая стержневая система магнитосимметричного ротора выполняет роль полной демпферной обмотки, вследствие чего качество электроэнергии, вырабатываемой АГ, обеспечивается на достаточно высоком уровне и в несимметричных режимах нагрузки.
- Для АГ повышенной частоты, у которых частота тока вырастает за счет увеличения частоты вращения ротора, более устойчивое возбуждение после замыканий. Кроме того, самовозбуждение таких генераторов происходит даже при наличии определенной нагрузки, подключенной к зажимам генератора.

Включение на параллельную работу СГ - сложная операция, которая требуют при одинаковом порядке чередования фаз, равенства напряжений на зажимах генераторов и частоты вырабатываемого тока. Если разность вращения валов приводных двигателей достаточно велика, то даже при наличии большого синхронизирующего момента вращающийся ротор может не втянуться в синхронизм в первом после включении цикле качаний без прово-рота. Толчки уравнительного тока и уравнительной мощности сопровождаются провалами напряжений и могут оказать отрицательное воздействие как на работу самих генераторов, так и на работу потребителей, а иногда привести к нарушению устойчивости и выпадении СГ из синхронизма.

Включение АГ на параллельную работу такой же мощности носит устойчивый характер, не требует сложной дополнительной аппаратуры, а синхронизация

генераторов сводится только к выравниванию их частот и напряжений. Даже при значительных рассогласованиях частот вращения роторов генераторов в системе устанавливается частота тока, равная среднему значению частот токов генераторов, включенных на параллельную работу. При этом, конденсаторы возбуждения играют роль фильтров и способствуют исчезновению биений напряжений и длительных переходных процессов после включения на параллельную работу [16].

К основным недостаткам АГ следует прежде всего отнести сложность схем стабилизации частоты и напряжения. Поэтому наиболее перспективным направлением использования АГ в системах генерирования энергии ВЭУ является разработка специальных конструкций АГ, снижающих недостатки асинхронных короткозамкнутых двигателей в генераторном режиме.

1.4 Основные требования к преобразователям электроэнергии

ПЭ являются неотъемлемой частью ВЭС потребителей, которые, кроме преобразования электроэнергии, осуществляют функции стабилизации параметров электроэнергии и должны осуществлять функции согласующих устройств, обеспечивающих параллельную работу ВЭС с внешней сетью.

Постоянное развитие элементной базы ПЭ происходит в направлении достижения более высоких показателей функциональных характеристик. Требования, которым должны отвечать современные ПЭ, можно условно разбить на функциональные, электрические, конструктивные и эксплуатационные [17].

Функциональные требования включают в себя требования к выполнению определенных функций или условий, как правило, не выражающихся в виде численного значения. К ним относятся: обеспечение гальванической развязки между входом и выходом; возможность дистанционного включения и отключения; возможность включения на параллельную работу; ремонтопригодность; обеспечение быстрой замены блоков или элементов при неисправности и т.д. Эти требования не оказывают существенного влияния на энергетические характеристики и МГП преобразователей. Современные ПЭ, как правило, разрабатываются с учетом этих и других требований, поскольку они повышают степень их универсальности.

Электрические требования предъявляются к параметрам электроэнергии. В процессе работы систем управления (СУ) ПЭ должны обеспечивать стабилизацию параметров электроэнергии в заданных пределах при изменениях показателей качества электроэнергии ВЭУ и изменениях величины и характера нагрузки, а также обеспечивать защиту при отклонениях указанных параметров за допустимые пределы.

К конструктивным, с одной стороны, относятся требования к необходимой стойкости при воздействии различных эксплуатационных факторов (температуры, влаги, вибрации, агрессивных сред и др.), а с другой, - требования к обеспечению механического сочленения с несущими конструкциями устройства. Кроме того, к конструктивным относятся требования по созданию необходимых условий и разработке различных

способов отвода тепла, которое образуется за счет внутренних потерь. Наряду с указанными требованиями конструкция ПЭ должна обеспечивать возможность контроля электрических параметров в процессе эксплуатации и технического обслуживания.

В эксплуатационных отражены требования к показателям надежности ПЭ и, прежде всего, по безотказности работы на протяжении всего срока эксплуатации.

Таким образом, современные ПЭ должны иметь не только повышенные показатели эффективности, но и отвечать основным перечисленным выше требованиям.

1.5 Особенности работы статических преобразователей в ВЭУ

Принцип действия полупроводниковых преобразователей, основанный на переключении нелинейных элементов, вызывает появление электромагнитных помех. Электромагнитные помехи возникают из-за скачкообразного изменения токов и напряжений в электрических цепях преобразователя. Передача электромагнитных помех происходит как по проводным связям преобразователя с другими устройствами ВЭУ, так и непосредственно через окружающее пространство. В возникающей при этом проблеме можно выделить следующие основные аспекты: появление шумов в аппаратуре связи, сбой работы различного рода электронной аппаратуры и нарушение нормального функционирования СУ и защиты самого источника помех - преобразователя.

При оценке электромагнитных помех, создаваемых полупроводниковыми преобразователями, пользуются понятием электромагнитной совместимости основных ФУ ВЭУ. Понятие «электромагнитная совместимость» перенесено в силовую преобразовательную технику из радиотехники. Под электромагнитной совместимостью принято подразумевать способность источников, преобразователей и потребителей электроэнергии работать совместно так с учетом неблагоприятных, но всегда возникающих при такой работе явлениях, чтобы обеспечить выполнение задач электроснабжения с заданным качеством электроэнергии [16].

Уровень электромагнитных помех в основном зависит от принципа работы преобразователя. Но в общем случае уровень электромагнитных помех в ВЭУ непрерывно изменяется под воздействием самых разнообразных возмущений, которые могут быть разделены на естетсвенные и искусственные [49], либо на три группы:

- случайные изменения параметров электроэнергии на выходе источника и входе полупроводниковых преобразователей;
- случайные изменения величины и характера нагрузки;
- случайные изменения параметров в СУ.

Первая группа возмущений в ВЭУ связана с изменением параметров электроэнергии внешней сети. В силу различных обстоятельств параметры электроэнергии даже в нормальных режимах работы могут изменяться случайным образом в пределах от 90% до 110% от номинальных значений[16].

Так, к примеру, выходное напряжение АСГ, в ряде случаев отличается существенно от синусоидального из-за конструктивных особенностей генератора, а именно, питанием обмотки возбуждения от полупроводникового выпрямителя.

С другой стороны, входные токи преобразователей существенно несинусоидальны (в особенности в преобразователях с естественной коммутацией силовых вентилей) и представляют собой импульсные последовательности сложной формы, что весьма нежелательно для электромашинных генераторов, а также трансформаторов и других устройств, питающихся с общей шины.

Таким образом, с одной стороны, источники электроэнергии могут генерировать напряжение с некоторым искажением формы, которое затрудняет управление преобразователями, что может привести к нарушениям алгоритмов управления полупроводниковыми приборами и чаще всего, к аварийным ситуациям в системе. А, с другой стороны, сами преобразователи потребляют несинусоидальный ток и также вносят искажения в форму напряжения источника. Здесь необходимо отметить, что, чем больше преобразователей работает от общей шины источника, тем больше вносятся искажения в форму питающего напряжения.

Во второй группе возмущений различают два режима изменения нагрузки: большие изменения и малые (в пределах 10%).

При больших изменениях нагрузки, а они бывают очень редко (несколько десятков процентов, когда от номинального значения изменяется напряжение источника электроэнергии), как правило, если ВЭУ имеет соизмеримую мощность с потребителями, СУ преобразователями восстанавливают напряжение в течение нескольких секунд, когда не срабатывает защита.

Малые изменения нагрузки наблюдаются непрерывно, так как включение и отключение потребителей электроэнергии происходит с небольшим перерывом во времени. Параметры выходных фильтров также вносят определенные погрешности при изменениях нагрузки. Кроме того, увеличение числа потребителей электроэнергии с импульсным потреблением мощности повышает уровень электромагнитных помех.

Третья группа возмущений возникает в СУ преобразователей. Разброс параметров электрических элементов (транзисторов, стабилитронов, диодов, используемых в СУ), несимметрия синхронизирующего (опорного) сигнала происходят по причине искажения напряжения источника питания, не точности в измерении контролируемого (ведущего) сигнала, из-за изменений параметров нагрузки. Все рассмотренные причины приводят к изменениям углов управления преобразователями, которые являются случайными функциями времени.

Анализируя рассмотренные случайные возмущения, можно определиться с направлениями научных исследований по уменьшению уровня электромагнитных помех и, соответственно, повышения уровня электромагнитной совместимости источников, преобразователей и потребителей электроэнергии СЭС.

Спектральный состав выходного напряжения и входного тока ПЭ, используемых в СЭС, позволит еще на стадии проектирования учитывать вопросы электромагнитной совместимости, т.е. заложить необходимые запасы мощности в ВЭУ, предусмотреть, с учетом вопросов оптимизации, как выходные, так и входные фильтры в преобразователях.

Для борьбы с электромагнитными помехами на практике используются разнесение и ориентация монтажных соединений, экранирование и заземление, фильтрация и другие методы подавления помех [13].

Для уменьшения влияния электромагнитных помех, как на собственные ФУ управления преобразователей, так и на питаемые потребители, при проектировании преобразователей необходимо соблюдать следующие правила выполнения монтажа:

- разделять силовые цепи и цепи управления;
- пересечение силовых цепей и цепей управления проводить под прямым углом;
- силовые соединения осуществлять проводниками минимальной (с учетом конструктивных возможностей) длины;
- разделять цепи переменного и постоянного токов;
- трехфазные цепи переменного тока, так же как и двухполюсные цепи постоянного тока, проводить единым жгутом (при этом происходит уменьшение электромагнитных помех, так как суммарный ток общего жгута равен нулю).

Кроме указанных основных правил монтажа, применяют различные специфические приемы с учетом функциональных задач отдельных узлов. В частности, провода, передающие сигналы от датчиков в усилители регуляторов, измерительные устройства и другие высокочувствительные узлы, выполняют в виде свитых (скрученных) пар проводов.

При этом, благодаря транспонированию проводов, обеспечивается компенсация токов, наведенных в них источниками помех.

Проводную связь и ФУ питаемой радиоэлектронной аппаратуры можно защитить от внешнего электромагнитного поля экранами - электростатическими, магнитостатическими и электромагнитными.

Электростатический экран обычно выполняется из медной или алюминиевой фольги и им окружают источник помех. Металлическая оболочка экрана замыкает электрическое поле провода, ограничивая его распространение в окружающую среду. Из-за большого объема и дополнительных потерь активной мощности магнитостатические и электромагнитные экраны в современных статических ПЭ используются редко. Как правило, использование такого типа экранов целесообразно при разделении внутри ограниченного объема преобразователя его силовых электромагнитных элементов и схем СУ.

Рассмотренные особенности работы статических ПЭ и рекомендации по повышению электромагнитной совместимости ФУ ВЭУ имеют большое значение на этапе проектирования перспективных СЭС. Кроме того, уже сейчас можно сделать не сложный вывод о том, что, чем меньше силовых полупроводниковых приборов в составе преобразователя, тем меньше уровень электромагнитных помех в ВЭУ[16].