

Разработка многофункционального энергетического комплекса на основе гибридной ветродизельной установки с накопителем энергии

А.Н. Долуденко¹, Т.Ю. Жораев¹, А.Н. Новиков¹, Н.Л. Новиков¹, Ю.Г. Шакарян¹.

² *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур (ОИВТ РАН), Москва, Россия*

e-mail^ shakarian@ntc-power.ru

Аннотация

Разработанный многофункциональный энергетический комплекс (МЭК) на основе гибридной ветродизельной установки с накопителем энергии (НЭ) и солнечными фотоэлементами, обеспечивающими совместное производство электроэнергии с возможным подключением к звену переменного и постоянного тока, может явиться базовой основой автономного энергоснабжения потребителей, прежде всего, районов Арктики. Комплекс может осуществлять дополнительно обеспечение теплом с помощью распределённых электронагревателей, и осуществлять охлаждение с помощью подключаемых тепловых насосов, данные виды активной нагрузки могут быть использованы для покрытия избытков генерации или для собственных нужд, расширяя диапазоны эксплуатационных параметров.

В работе проводится исследование режимов работы многофункционального электрического комплекса (МЭК) состоящего из дизель-электростанции, ветроэнергетической установки, накопителя энергии при произвольном характере изменения нагрузки и генерации, разработка алгоритмов управления комплексом и его отдельными составляющими, обеспечивающих заданные параметры качества электрической энергии, при различных критериях топливной и экономической эффективности, исследования различных структур построения основной схемы МЭК для совместной работы ДЭС, ВЭУ, накопителя энергии, проведения исследований режимов работы ДЭС с различными способами генерации при переменных оборотах и постоянной частоте, определение режимов работы МЭК для выбранных и варьируемых параметров.

1. Актуальность исследований.

В энергетическом обеспечении в отдаленных и труднодоступных регионах Российской Федерации большая роль принадлежит малой энергетике, обеспечивающей электрической и тепловой энергией на 70% ее территории.

Внедрение новых технологий в малой энергетике, направленных на повышение эффективности работы оборудования, экономии топлива, обеспечении надежности и качества электроснабжения является важной и актуальной задачей, решение которой позволяет произвести улучшение по заданному критерию качества работы системы, таких как экономический, технический, функциональный.

На основе анализа проблем, стоящих перед малой и нетрадиционной энергетикой, можно сформулировать основные технические требования к автономным системам энергоснабжения (АСЭС):

- 1) многофункциональность;
- 2) комбинирование состава источников энергии (гибридные энергоустановки);
- 3) модульная компоновка на основе типизации и конструктивной унификации;
- 4) автономная работа энергетических модулей;

- 5) согласованность характеристик энергетических модулей, в т. ч. дизеля, генератора и потребителя нагрузок;
- 6) возможность совместной работы дизельной электростанции (ДЭС) с нетрадиционными источниками энергии (гибридная электростанция), а также с энергосистемой;
- 7) обеспечение высокого качества электрической и тепловой энергии независимо от колебаний нагрузки и потенциала возобновляемых видов энергии;
- 8) надежность, ресурс и эффективность функционирования АСЭС;
- 9) обеспечение безопасности и удобства работы оператора ДЭС;
- 10) типизация и унификация парка ДЭС, энергетического оборудования и комплектующих, топлив и моторных масел;
- 11) топливная экономичность;
- 12) приспособленность к климатическим (зональным) условиям;
- 13) защита окружающей среды при использовании энергетического оборудования;
- 14) ремонтпригодность;
- 15) транспортабельность;
- 16) высокий уровень автоматизации и диспетчеризации;
- 17) низкие эксплуатационные расходы и лёгкость проведения профилактических мероприятий;
- 18) технологичность и дешевизна изготовления, использование расширенной номенклатуры узлов и их взаимозаменяемость.

Для реализации указанных требований предлагается многофункциональный энергетический комплекс (МЭК) на основе гибридной ветродизельной установки с накопителем энергии и солнечными фотоэлементами, обеспечивающими совместное производство электроэнергии, при подключении дополнительных управляемых нагрузок возможна генерация тепла с помощью энергонагревателей, и холода с помощью тепловых насосов, со звеном переменного и постоянного тока.

Гибридная ветродизельная установка с накопителем электроэнергии (НЭ) может явиться основой автономного энергоснабжения потребителей, прежде всего, районов Севера (Арктики).

Для обеспечения согласованности работы энергетических модулей в составе предусматриваются следующие основные модули:

- ДЭС;
- ветроэлектроустановка (ВЭУ);
- статический преобразователь частоты (ПЧ);
- накопитель электроэнергии (НЭ);
- фотоэлектрическая солнечная батарея;
- система автоматического управления (САУ).

Первичный двигатель является основным энергетическим модулем электростанции. От его свойств и характеристик зависят надежность и долговечность, качество электрической энергии и стабильность ее параметров в статическом и динамическом режимах и т. д.

В настоящее время работа ДЭС протекает в условиях не согласованного изменения мощности потребителя с частотой вращения двигателя. Нагрузка на генераторе, в общем случае, может отсутствовать или изменяться от любого частичного до максимального значения. При этом показатели работы двигателя (мощность, частота вращения, часовой и

удельный расход топлива, крутящий момент или среднее эффективное давление), как правило, не являются оптимальными, особенно, эффекты негативного влияния изменения напряжения и частоты влияют на подключаемые непосредственно к сети электрические машины с относительно большой инерционной нагрузкой, чувствительной к этим изменениям. Данные факторы в основном обусловлены несовершенством общих компоновочных решений ДЭС.

Диапазон изменений каждого параметра двигателя ограничивается его прочностными, тепловыми и газодинамическими возможностями, так, например, частота вращения двигателя может изменяться в ограниченных пределах. Ряд факторов не позволяет превышать заданной максимальной скорости вращения коленчатого вала, так как это влечет за собой превышение допустимых значений сил в деталях двигателя с точки зрения их прочности и долговечности в виде ухудшения качества протекания рабочих процессов в цилиндре двигателей, увеличения термического перенапряжения деталей двигателя и т. п.

В некоторых случаях двигателю приходится работать при малой нагрузке. При этом режим отъёма мощности должен быть таким, чтобы дизель работал устойчиво (без рекуперации, без резкого изменения механической нагрузки) с поддержанием минимума удельного расхода топлива в заданном режиме.

Следует отметить, что скоростные режимы ДЭС естественным образом ограничены не только верхними и нижними пределами по частоте вращения вала дизеля, но и соответственно пределами по частоте вращения генератора, что обусловлено спецификой применения дизеля в качестве связанного малоинерционного источника механической мощности.

Использование преобразователя частоты и САУ в составе ДЭС позволит наделить ее новыми положительными свойствами:

- 1) снятие требования на соответствие фиксированной или находящейся в узком диапазоне частоты вращения двигателя частоте вращения электромеханического генератора;
- 2) возможность параллельной работы ДЭС с энергосистемой и нетрадиционными источниками энергии с использованием промежуточных преобразователей с общим уменьшением количества узлов преобразования;
- 3) энергетическая эффективность и топливная экономичность ДЭС за счет перехода двигателя на частичные скоростные характеристики при заданном спектре флуктуаций нагрузках потребителя;
- 4) повышение ресурса двигателя за счет отсутствия форсированных режимов, перегрузок, рекуперации и избыточной нагрузки при холодном старте;

Основной целью работы является разработка многофункционального энергетического комплекса (МЭК) на основе гибридной ветродизельной установки с накопителем энергии заключающаяся в построении математической модели и проведении физического эксперимента с отдельными составляющими системы.

В работе [1] рассматриваются методы построения локальной сети постоянного тока, с подключением к этому звену ДГУ, ВЭУ и накопителя энергии, исследуются режимы работы по заданному графику потребления. В [2] рассматриваются методы построения мегаваттного класса сетей переменного тока с гибридными установками. В [3] рассматриваются вопросы регулирования при больших флуктуациях частоты генерации в гибридной энергосистеме из ВЭУ и солнечных батарей. В [4] рассматриваются способы

управления дизель-генераторами при параллельной работе на энергосистему совместно с ВЭУ. Динамические режимы работы и линеаризованные модели гибридной энергосистемы рассмотрены в [5]. В [6] представлены методы оптимизации гибридной генерирующей системы в зависимости от годовой выработки и потребления. В [7] представлено использование метода линейного программирования для оптимизации ветро-дизельных систем, включая, использование промежуточного звена постоянного тока. В [8] исследуются режимы работы с применением нейронных сетей в качестве регуляторов в гибридной ветро-дизель генераторной станции с преобразователем STATCOM, используется линеаризованная динамическая модель. Исследования, касающиеся быстрой разработки иерархических систем Microgrid содержащих ДГУ и ВЭУ с точки зрения временных характеристик и построения информационных каналов, телекоммуникационной инфраструктуры изложены в [9]. Децентрализованная генерация для потребителей рассматривается в [10], представлены стоимостные оценки ДГУ, ВЭУ с учётом нагрузки потребителей, рассматриваются критерии по вредным выбросам и рентабельности. В [11] представлены модели для оптимизации практических систем ДГУ+ВЭУ+фотовольтаика на основе сети 440 В постоянного и 220 В переменного тока. В [12] представлен анализ аварийных ситуаций в ветроэнергетической установке. Управление режимами по напряжению и реактивной мощности для Smartgrid с распределённой ветрогенерацией представлена в [13], где рассмотрены вопросы связанные с задержкой регулирования, временными характеристиками по изменению нагрузки, её активной и реактивной составляющих. В [14] рассматриваются вопросы, касающиеся работы ВЭУ в составе системы из параллельно работающих дизель-генераторов, используются стандартные блоки Matlab для моделирования системы, рассматривается изменение частоты локальной сети. В работе Томских исследователей [15] представлены методы настройки регуляторов управления ДГУ при работе с генератором на шину постоянного тока в составе гибридной системы генерации ДГУ-ВЭУ. В [16] рассматриваются методы построения инверторов для автономных систем электроснабжения. Методы построения гибридных систем генерации рассматриваются в общем виде в [17]. Экспериментальные работы по гибридным системам проводятся в [18], используется физическая имитация работы масштабируемой системы. В [19] представлены методы управления нагрузкой в гибридной генерирующей системе совместно с накопителем энергии. Гибридная ветро-дизель-фото-гидрогенерирующая станция с накопителем представлена в [20], исследуются режимы рациональной работы системы с учётом распределения ветра, нагрузки и иных энергетических факторов во времени.

Новизна данной работы заключается в наличии управляемых преобразователей с накопительными элементами в системе генерации, позволяющего сократить неэффективное использование ветродизельной установки при циклических изменениях нагрузки, генерации и аварийных ситуациях, включая поддержание режимов параллельной работы дизельных и ветроэнергетических установок с улучшением показателей качества электроэнергии.

В данной работе разработаны принципы построения систем комбинированными энергоустановками, рассматриваются их структуры и основные параметры на основе математических моделей отдельных элементов и системы в целом при заданных критериях эффективности.

При создании подобного рода систем проводится оценка влияния внедрения новых структурных единиц и режимов работы по сравнению с большинством существующих

систем в виде дизель – генераторов, которые работают с постоянной частотой вращения вала во всём диапазоне изменения нагрузки. В таких дизель - генераторах стабилизация частоты переменного напряжения синхронного генератора обеспечивается постоянством оборотов вращения вала, при этом, стабилизация амплитуды напряжения статора синхронного генератора обеспечивается изменением тока в обмотке возбуждения.

Дизель, работая при постоянной частоте вращения, но при резко изменяющейся нагрузке с заданной периодичностью, работает с неоптимальным расходом топлива и, как следствие, с повышенным потреблением по отношению к постоянному номинальному потреблению. Ставится задача стабилизации частоты локальной сети с номинальным значением 50 Гц и отклонением ± 0.4 Гц и достаточно малой скоростью изменения частоты, при этом, характер переходного процесса дизельной установки по мгновенному значению мощности на валу соответствовал бы аperiodическому или колебательному процессу с большим затуханием с заданным минимальным перерегулированием, и, одновременно, производилась бы стабилизация выходного напряжения генератора с отклонением на величину не превышающую $\pm 10\%$ при коммутациях нагрузки.

2. Структура многофункционального энергетического комплекса на основе гибридной ветродизельной установки с накопителем энергии

Структура ветро-дизельной электростанции приведена на рис. 1. Режим работы ДВС поддерживается локальной системой управления дизелем на уровне номинальной мощности нагрузки. В случае наличия ветра производится изменение подачи топлива в заданном диапазоне, включая возможное наличие режима холостого хода, когда ветрогенерация, возможно, сопоставима со значением мощности нагрузки, которая, в общем случае, также является переменной с течением времени.

Может возникнуть ситуация, при которой система управления возбуждением генератора отработала изменение тока электрической нагрузки, в то время локальная система управления дизелем еще не изменила режим работы двигателя и продолжает впрыск топлива под большую нагрузку, создавая, тем самым, избыточное потребление при её частых и относительно больших изменениях.

Особенная ситуация возникает, когда энергоустановки работают на общую линию, возможно, достаточно протяжённую. К данной линии могут подключаться локальные потребители, на которых могут оказывать влияние подключаемые дополнительные источники энергии ввиду ограниченной мощности линии.

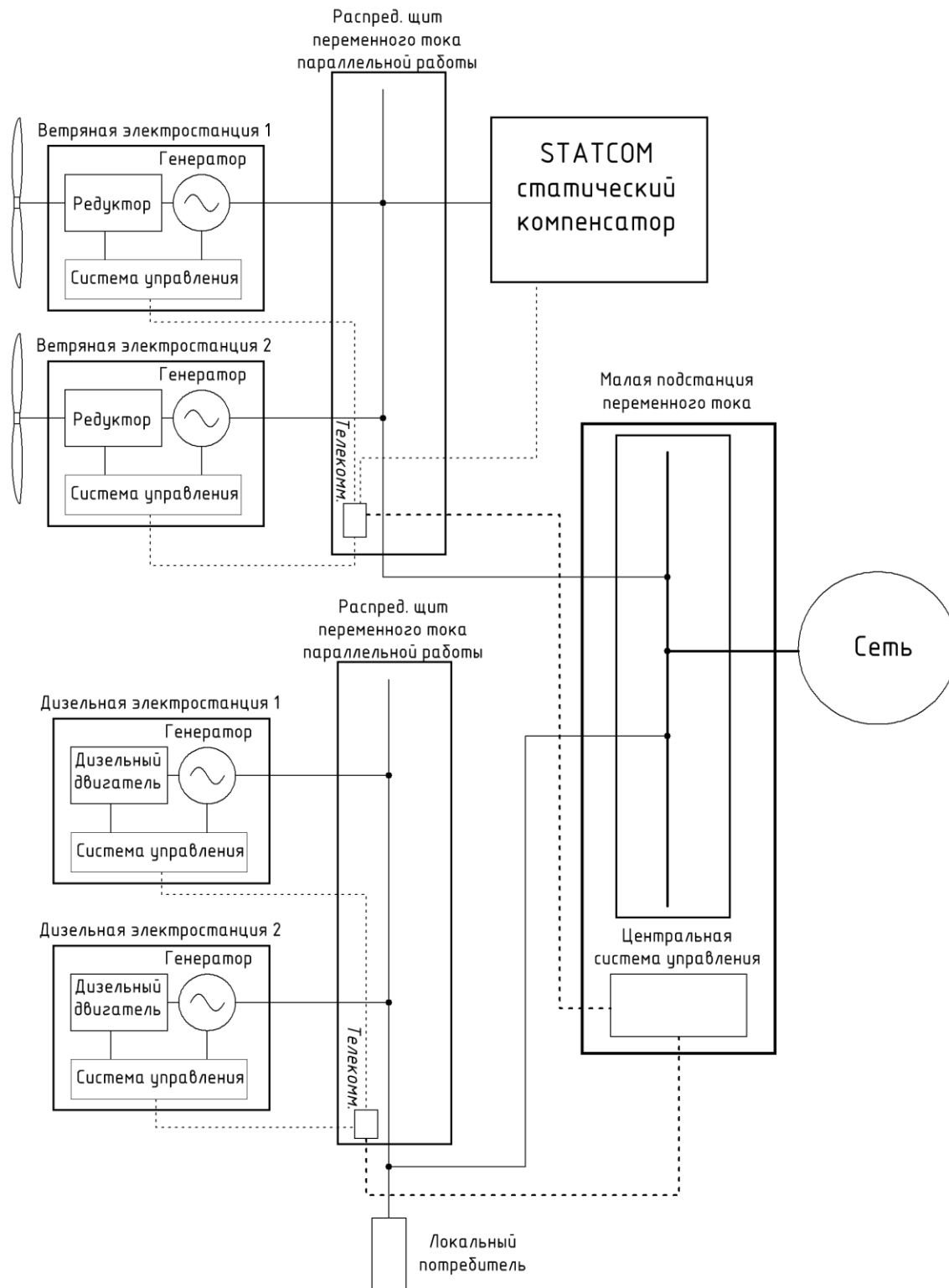


Рис. 1 Структура ветро-дизельной электростанции

Для компенсации реактивной мощности генератора при простейшем подключении генератора через привод постоянного вращения, в зависимости от режима работы генератора ВЭУ, имеется статический компенсатор, позволяющий устранить реактивную составляющую тока генерации в широких пределах, включая номинальную генерируемую активную мощность и на холостом ходу, в этом случае, статический компенсатор может быть использован для дополнительной компенсации реактивного тока нагрузки.

В зависимости от величины электрической нагрузки накопитель может работать в нескольких режимах:

- Режим заряда ёмкости при отключении нагрузки;
- Режим разряда ёмкости при включении нагрузки;
- Режим полностью разряженной или полностью заряженной ёмкости;
- Поддержание заданного заряда при отсутствии изменения нагрузки.

Режим заряда ёмкости при отключении нагрузки необходим для потребления электрической энергии.

Режим разряда ёмкости обеспечивает рекуперацию (возврат) энергии в сеть.

Режим полностью заряженной или полностью разряженной ёмкости возникает при избытке или исчерпании запасов энергии, когда время действия коммутации нагрузки превышает время, за которое происходит полный заряд или разряд ёмкости с номинальным током нагрузки, и, соответственно номинальной мощностью.

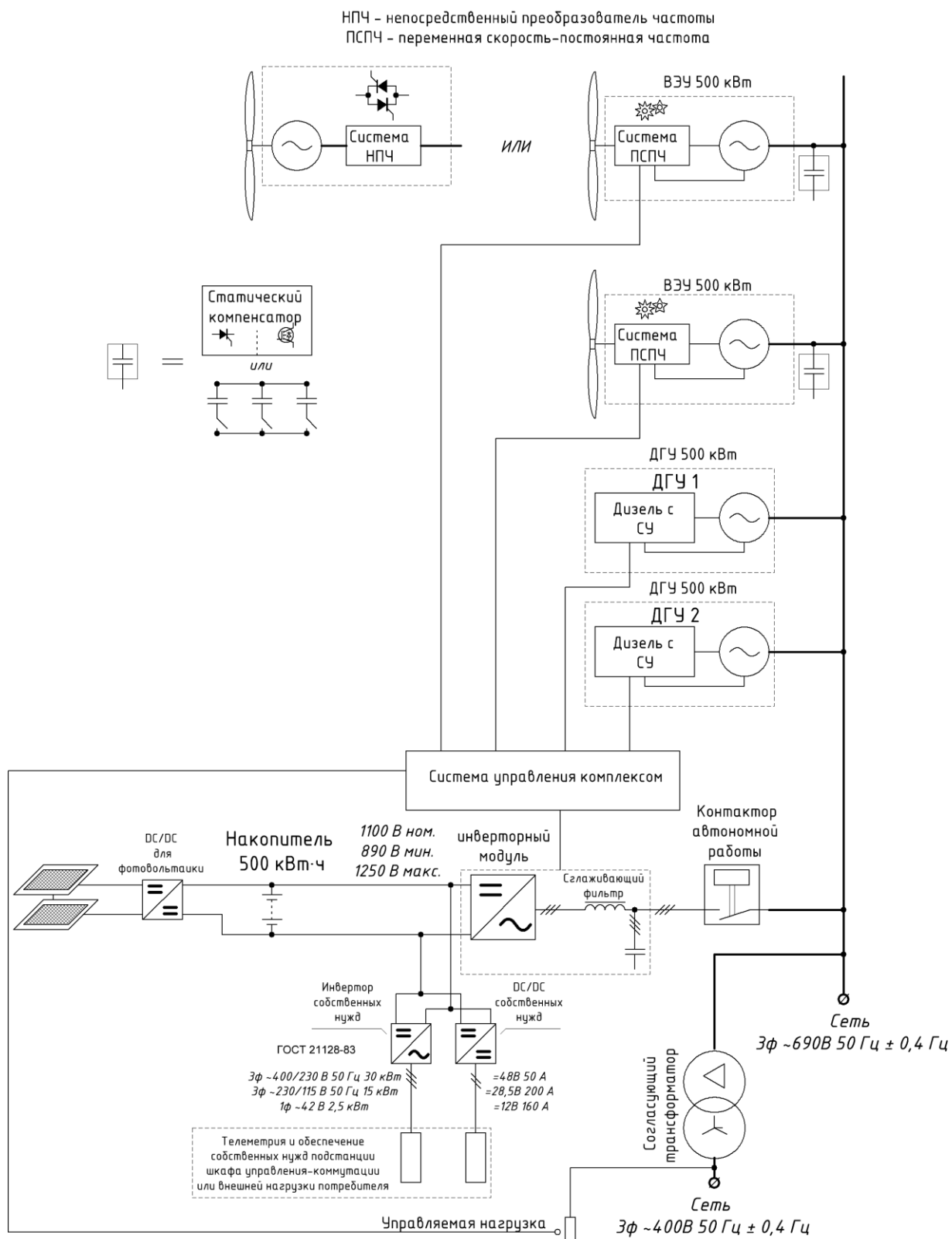


Рис. 2 А)

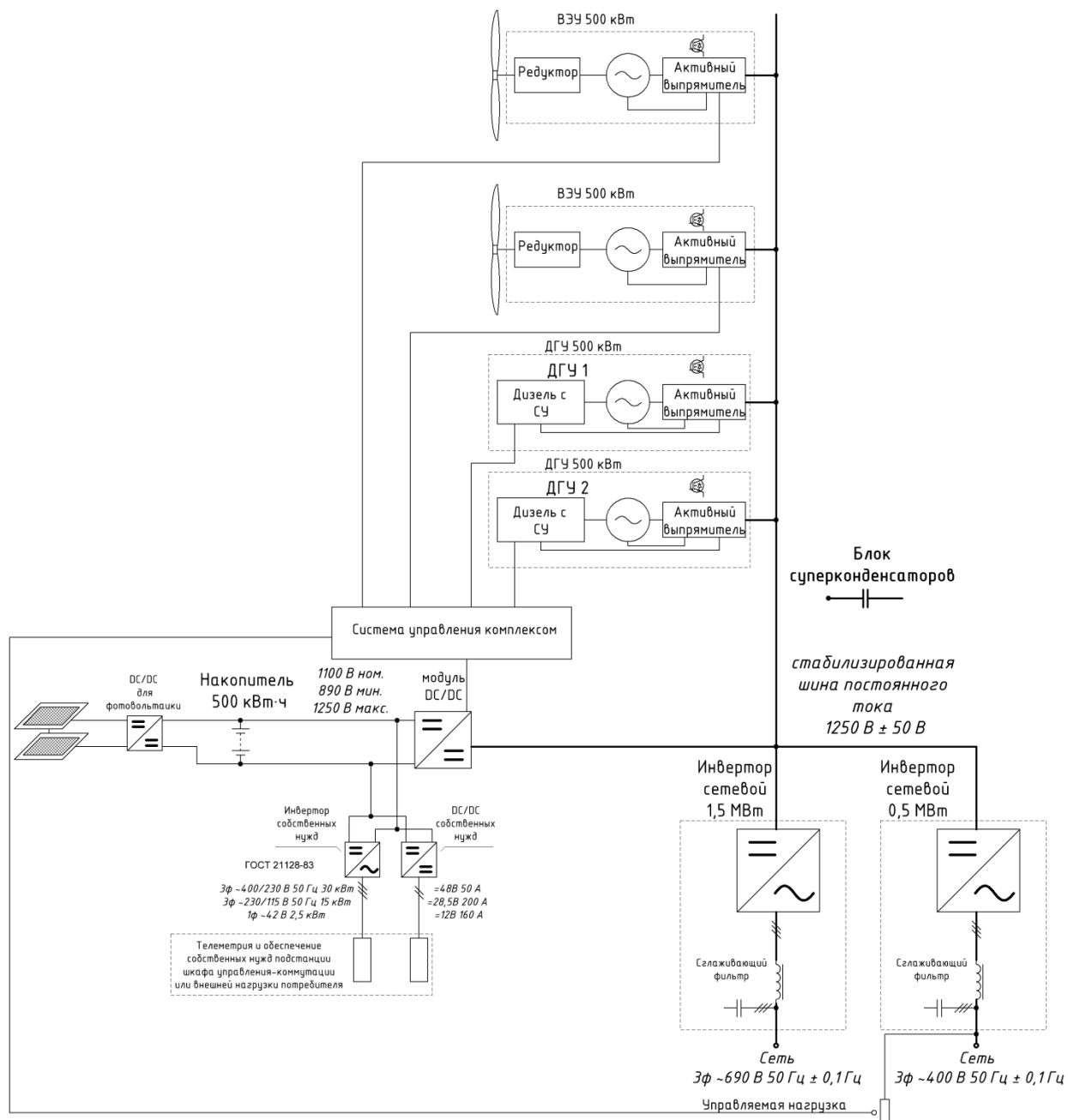


Рис. 2 Б)

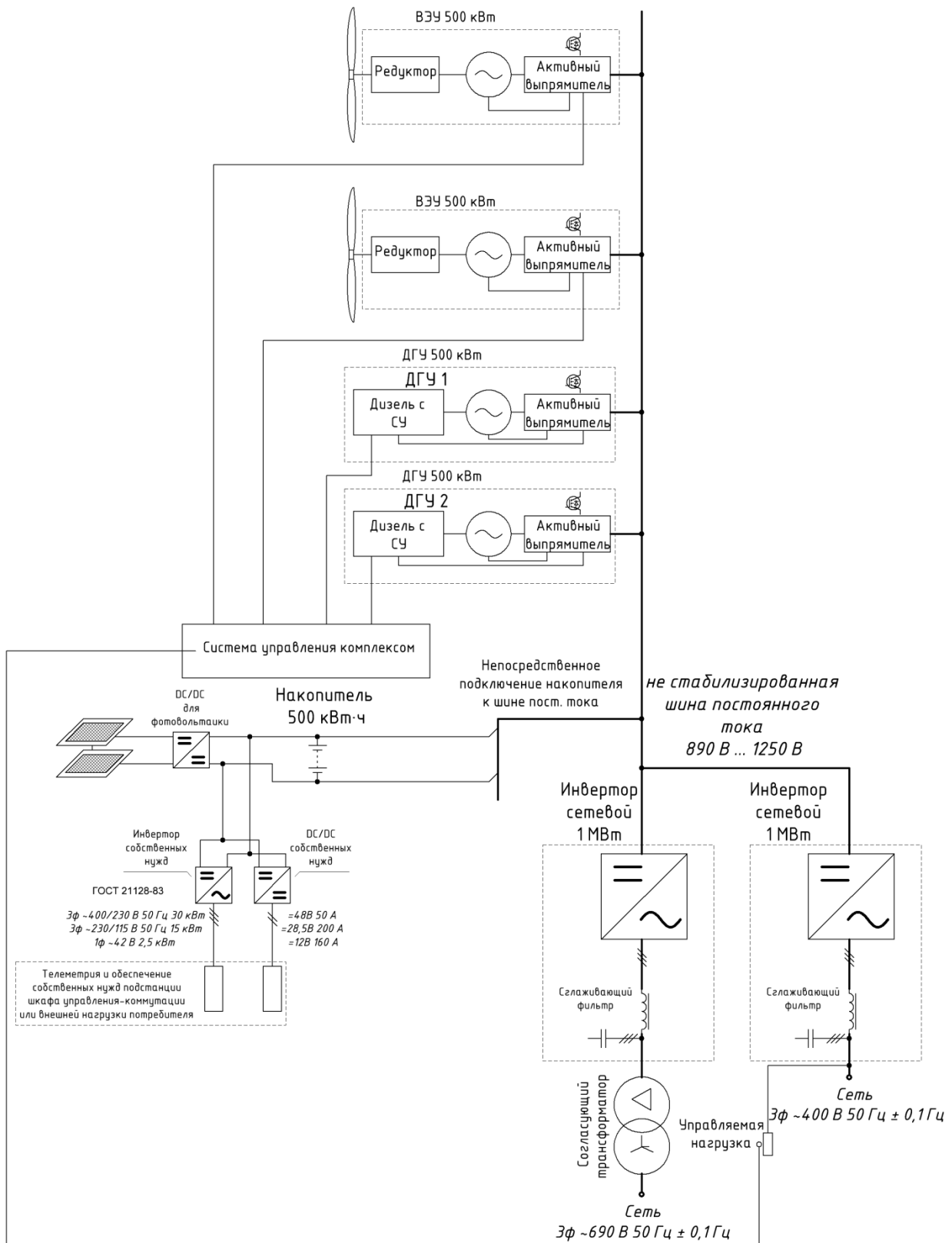


Рис. 2 В)

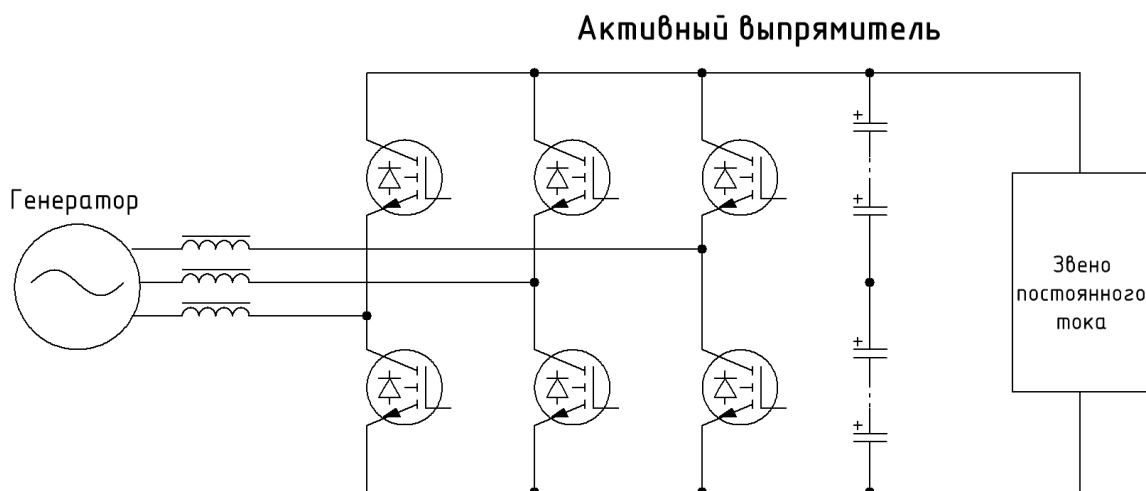


Рис. 2 Г)

Рис. 2 Структурные схемы исследуемой системы.

Режим поддержания заряда ёмкости происходит при кратковременных изменениях нагрузки, при этом, мощность коммутации нагрузки недостаточна и энергии ёмкости достаточно для полной или частичной компенсации, при этом, ёмкость заряжается или разряжается не в полном диапазоне степени заряда.

На рис. 2 представлены возможные структурные схемы реализации. На рис. 2 А) представлена схема объединения по переменному току, при этом, в ВЭУ используются привода постоянного вращения, регулировка частоты вала генератора производится механическим способом, либо возможно использование циклоконвертора на полупроводниковых ключах, используется асинхронный и синхронный генератор соответственно. Для дополнительной компенсации реактивной мощности применяется статический компенсатор или косинусные ёмкости, показанные условным обозначением на схеме. На рис. 2 Б) представлена схема объединения систем по постоянному току со стабилизированной шиной напряжением 1250 В, аналогично, на рис. 2 В) представлена схема с не стабилизированной шиной. Объединение по постоянному току помогает избежать появления двойного преобразования, уменьшить количество преобразователей, однако, при этом необходимо наличие выпрямителей на номинальное значение мощности.

Основным преимуществом стабилизированной шины постоянного тока является универсальность и возможность объединения разнородных генераторов и потребителей, отсутствие реактивной мощности при передаче, эффективное преобразование в постоянный ток низкого напряжения для питания различных электронных схем, например в датацентрах. Основным недостатком является наличие специального оборудования для дугогашения, возможность появления «тления», постоянный потенциал приводит к гальваническим эффектам, увеличиваются размеры предохранителей. Эти эффекты можно в некоторой степени устранить мощные коммутируемые токоограничительные дроссели. На рис. 2 Г) представлена основная ячейка автономного инвертора напряжения, являющейся основой для указанных систем. Алгоритмы управления силовыми ключами обеспечивают генерацию и потребление активной/реактивной мощности от звена постоянного тока, управление по гармоническим составляющим и симметричным

компонентам с заданной полосой пропускания, определяемой, в основном, частотой коммутации силовых ключей и наличием параллельной работы силовых модулей.

На основе данной структурной схемы составлена базовая моделируемая схема в системе Matlab+Simulink, которая представлена на серии рис. В качестве исходных данных можно указать параметры ветряной турбины, например, модель Type DW 54 с параметрами диаметра ротора 54 м, изменяемой скоростью ротора 12 - 24 об·с⁻¹, номинальной выходной мощностью 500 кВт, скоростью ветра минимальная при которой происходит отсечка 3 м·с⁻¹, номинальная скорость ветра при 100% выработке номинальной мощности 10 м·с⁻¹, скорость ветра максимальная при которой происходит отсечка (на периоде усреднения 10 минут) м·с⁻¹, предельная скорость ветра 52.5 м·с⁻¹.

Подобного рода турбины снабжаются дополнительными устройствами собственных нужд, например, световым обеспечением для авиации, системой поворота для устранения мерцания теней лопастей для рядом стоящих зданий, детекторы обледенения лопастей, опции для холодного климата, сервисные механизмы для обслуживания турбины.

Электрическая и электромеханическая модель может быть реализована в виде блока Matlab-Simulink [25], который можно использовать для построения общей математической модели системы. В [25] представлена модель ветроэнергетической установки с использованием AC-DC-AC преобразователя, выходного индуктивного фильтра. Следует отметить, что модель Matlab усреднена и производит моделирование по комплексным величинам, являющимися углом и амплитудой базового вектора (phasor), отсутствует возможность рассматривать мгновенные значения трёхфазных величин и влияние не симметрии на работу установки.

Управление в данной схеме осуществляется по углу атаки лопастей, напряжению на электрической машине и току сети. Основным звеном является асинхронный генератор с двойным регулированием [26], AC-DC-AC преобразователь, одной из разновидностей являются асинхронизированные синхронные генераторы. Такие схемы построения позволяют осуществлять расстройку относительно центральной частоты в пределах $\pm 30\%$. У подобного рода систем имеются некоторые особенности, связанные с необходимостью поддержания высокой симметрии напряжения [27], в связи с чем, можно использовать дополнительно подключаемые преобразователи к сети, выполняющие функции активного корректора коэффициента мощности и формы. При этом, однако, в звене постоянного тока такого преобразователя при не симметричном токе появляются чётные пульсации, которые зависят от уровня не баланса и могут вызвать избыточную пульсацию на элементах аккумуляторной батареи, в связи с чем, из-за наличия внутреннего сопротивления и системы выравнивания заряда, чувствительной к пульсации возможно применение дополнительно суперконденсатора, через который замыкается ток чётных гармоник.

Управлению ВЭУ с системой генератора с двойным управлением посвящено множество работ, в частности, описанные далее. В [28] представлены возможные структурные способы формирования ВЭУ с классическим асинхронным генератором с конденсаторами и приводом постоянного вращения, с использованием генератора с двойным управлением, системы генератор-выпрямитель-инвертор. Особенностью генерации с двойным преобразованием является наличие инвертора с 20%-30% мощностью относительно номинальной. Благодаря этому преобразователю возможно управление током ротора и сети, поэтому, частоты ротора не зависят от частоты сети, при этом, использование преобразователя позволяет подстраивать активную и реактивную

мощность сети на стороне статора, и, соответственно, независимо от скорости вращения генератора. Недостатками двойного преобразования являются, в частности, сложности в преобразовательной части, наличие мощных токосъёмных колец на роторе. В системе генератор-выпрямитель-инвертор присутствует преобразователь с номинальной мощностью генератора, что увеличивает преобразовательную часть, и, соответственно, потери, связанные с непрерывной и импульсной составляющей тока, напряжения коммутации ключей, при этом, однако, электрическая машина является синхронным генератором со статорным отъёмом мощности.

3. Математическая модель многофункционального энергетического комплекса на основе гибридной ветродизельной установки с накопителем энергии

При построении математической модели приняты следующие допущения:

- дизель-генераторная установка заменяется стандартной линейной моделью с ограничениями и задержкой. Ограничение имитирует отсутствие отрицательной частоты (обратного вращения) и отсутствие обратного потока мощности (работа дизеля как компрессора), задержка имитирует работу топливной системы дизеля, звенья второго порядка имитируют работу локальной системы управления, механическую инерционность и газодинамические процессы;

- электрическая машина выбрана стандартной для синхронного генератора с системой возбуждения;

- малые отклонения по частоте и малая скорость её изменения ввиду инерционности дизеля и ротора генератора позволяют считать процессы синхронизации стационарными в широком диапазоне изменения нагрузки;

- вводятся ограничения в систему управления накопителем с использованием блока насыщения по току накопителя, соответствующего номинальному току нагрузки;

- вводится звено, имитирующее ёмкость накопительного элемента в виде конденсатора;

- автономный инвертор напряжения заменяется источником тока, так как обеспечивается заданный выходной ток инвертора путём задания на выходной ток;

- используются только прямая проекция (d) на вращающуюся систему координат, синхронизированную в фазе с напряжением генератора и, фактически представляющая собой активную составляющую тока нагрузки (при достаточно малой реактивной составляющей), режимы компенсации реактивной составляющей и режимы генерации реактивного тока не рассматриваются, ввиду особенностей применения дизелей в основном, для питания нагрузки с удовлетворительным коэффициентом мощности, при этом, компенсация реактивной мощности практически не затрагивает процессы заряда/разряда накопительного элемента в практических случаях;

- вводится простейшее звено идентификации коммутации нагрузки по производной тока, в достаточной мере определяющее характер изменения нагрузки;

Система состоит из дизельных двигателей с использованием стандартной математической модели Simulink (Diesel Engine & Governor), параметрами которых являются общий коэффициент усиления регулятора, постоянные времени регулятора оборотов, постоянные времени механической составляющей, задержки и ограничения по моменту. Регулируемым параметром является частота вращения вала дизеля ω в относительных единицах, задающим воздействием является частота задания, представленная также в относительных единицах ω_{ref} выходная переменная состояния - величина мощности на валу P_m . Выходной величиной электрической машины являются фазные токи и напряжения в замкнутой электрической цепи, при этом, производятся вычисления их квадратурных составляющих, требуемых для определения амплитуды, как это сделано в примере [29], при этом, в качестве изменений, следует выделить то обстоятельство, что данная система должна работать на сеть.

Схема модели дизеля, созданная в среде MATLAB / Simulink представлена на рисунке 3. В качестве способа управления электрической машиной используется блок опция блока управления DC1A, реализующая данный способ в виде математической модели, в этом блоке используется метод [30].

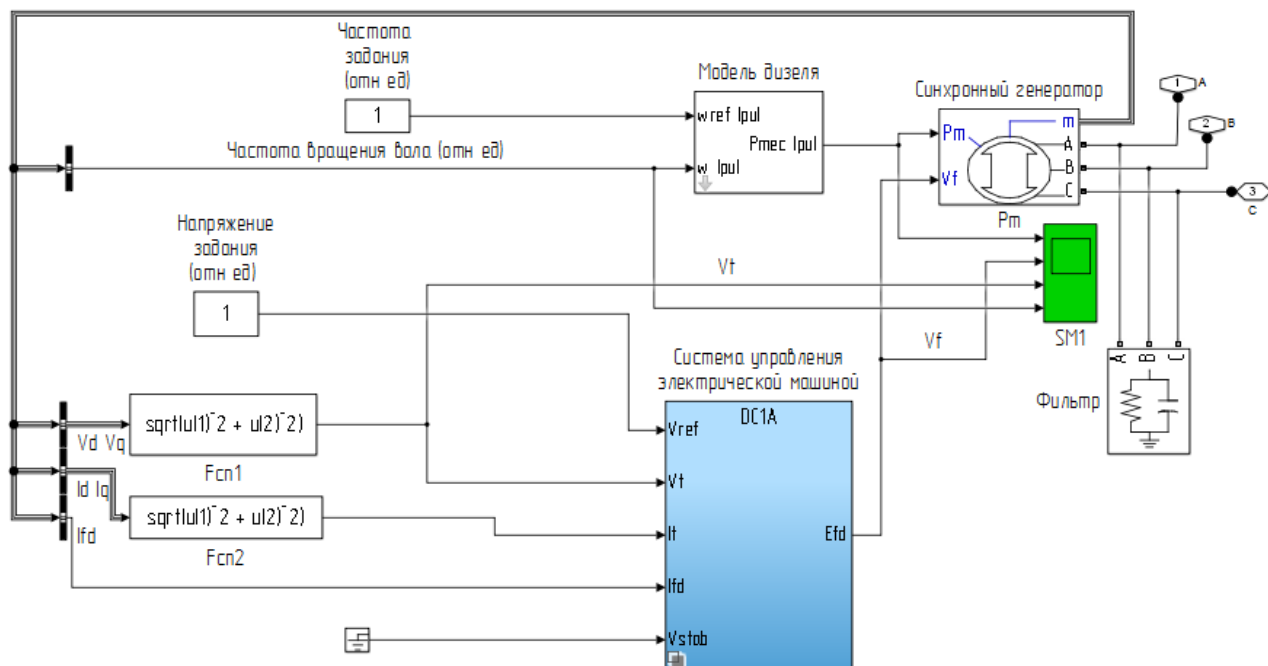


Рис. 3. Структура модели дизеля в исследуемой системе в MATLAB / Simulink.

Выбранная упрощённая система управления дизелем и модель самого дизеля представляется в виде совокупности звеньев второго порядка, как представлено на рис. 4:

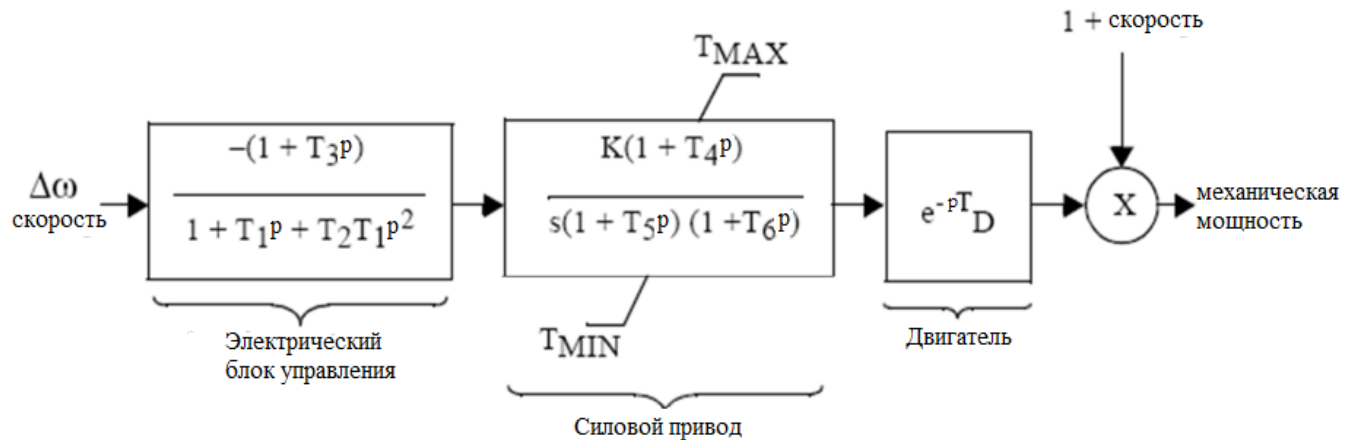


Рис. 4. Блок-схема передаточной функции дизеля и регулятора.

Выходной параметр – механическая мощность, момент инерции должен соответствовать генератору. Система управления дизеля реализована в виде звена второго порядка: $W_g = \frac{K(1+T_3 \cdot s)}{(1+T_1 \cdot s+T_1 \cdot T_2 \cdot s^2)}$, передаточная функция регулятора $W_a = \frac{(1+T_4 \cdot s)}{(s(1+T_5 \cdot s)(1+T_6 \cdot s))}$, где $K = 40$, постоянные времени $T_1 = 0.01$ с, $T_2 = 0.02$ с, $T_3 = 0.2$ с, $T_4 = 0.25$ с, $T_5 = 0.009$ с, $T_6 = 0.0384$ с, время задержки двигателя $T_d = 0.024$ с. Постоянные времени соответствуют установке мощностью 500 кВт.

В схеме присутствуют измерители с использованием векторных преобразований из переменного трёхфазного сигнала в постоянный. Блок измеритель напряжения и тока генератора трехфазный. Вход является трёхфазным, на выходе имеются сигналы токов и напряжений прямой составляющей d, отвечающей за активную составляющую тока или напряжения, q – за реактивную, так, при d=1 (в отн. ед.) q=0 принимается чисто активная составляющая, причём положительный знак отвечает потреблению, отрицательный – генерации относительно выбранного элемента схемы.

Для задания частоты и синхронизации с сетью служит блок формирования опорного сигнала. Синхронизация в симметричных системах возможна с использованием преобразования Кларке из трёх фаз в ортогональный сигнал. Следует отметить, что используется упрощённая модель ФАПЧ, которая использует симметричный трёхфазный сигнал, в то время как можно использовать системы повышенного быстродействия с выделением базового вектора, в том числе с однофазной синхронизацией, которые были реализованы в аппаратном прототипе.

Затем ортогональный сигнал (при трёхфазном симметричном исходном сигнале) поступает на функцию арктангенса двойного аргумента, после чего получается требуемая фаза «Gamma» для векторных преобразований. Для трехфазной системы, у которой отсутствует нулевая последовательность, производятся прямое и обратное преобразования Кларке. При отсутствии нулевой составляющей в трехфазной сети прямое преобразование Парка представляется в виде векторного преобразования с базовым углом $\theta = \omega \cdot t + \psi_0$ – значение абсолютного угла поворота (относительно осей системы координат «x,y») вращающейся системы координат с частотой ω . Следует отметить, что угол может быть относительным и быть в диапазоне $\theta \in [-\pi, \pi]$, в данном виде он реализуется в

практических системах управления, за нулевой угол условно подразумевается момент старта системы или синхроимпульс от внешних часов реального времени, корректирующий частоту и время, например, используя GPS, Глонасс, сигналы радиопередатчиков эталонов времени, как это делается в крупных энергосистемах. В общем случае угол поворота может изменяться произвольным образом. В качестве модели инвертора используется источник тока управляемый напряжением. Данная модель справедлива в линейном диапазоне регулирования и в большинстве случаев отражает стационарные режимы работы без учёта нелинейных свойств преобразователя. Нелинейные свойства преобразователя в большинстве случаев проявляются в режиме, соответствующему максимальному напряжению сети и большой степени разряда накопительного элемента. Таким образом, автономный инвертор напряжения работает (как управляемое звено) в режиме источника тока, определяемым его внутренней системой управления. При заданных условиях инвертор обеспечивает приемлемое быстродействие, поэтому, можно предположить его безынерционным звеном, или, в более сложном случае, использовать звено запаздывания и передаточную функцию, моделирующую внутренний контур управления преобразователем.

Для стабилизации средней степени заряда накопительного элемента необходимо использовать специальный алгоритм с нелинейными функциями, включая применение динамики изменения тока нагрузки или ветрогенерации. Данный алгоритм основан на том факте, что невозможно принять дополнительную энергию батареей при высокой степени заряда, при этом, в зависимости от напряжения ограничивается зарядный ток. С другой стороны, невозможно извлечь из батареи энергию при её достаточно большой глубине разряда. При этом, необходимо вводить дополнительные ограничения, зависящие от эксплуатационных факторов, таких как повышенная или пониженная температура, наличие избыточной пульсации на элементе, различного рода перегрузки или кратковременные превышения максимальных параметров или единичные превышения предельно допустимых значений, например короткие замыкания.

4. Результаты моделирования энергетического комплекса на основе гибридной ветродизельной установки с накопителем энергии

В ходе моделирования получены следующие результаты. Из кривой мощности дизеля можно видеть, что введение накопителя позволяет уменьшить колебательность переходных процессов на фронтах, тем самым, уменьшается площадь (энергия) кривой мощности при переходном процессе. На кривой напряжения нагрузки, генератора и накопителя (все они подключены к единым клеммам) видно заметное уменьшение выбросов по напряжению при отключении нагрузки. Отмечается снижение колебательности переходных процессов, первоначальный выброс уменьшается на 50%, время затухания уменьшается с 0,5 секунд до 0,2 секунды. Выбросы по напряжению на зажимах генератора (нагрузки) уменьшаются в 2 раза. Уменьшается на 15% диапазон изменения напряжения возбуждения.

Работа системы управления подтверждается наличием всех требуемых режимов работы – компенсация тока сети в первый момент времени до значения менее 5% от номинальной нагрузки, осуществление выхода на заряженное/разряженное состояние ёмкости за время порядка 1 секунды, детектирование включения/выключения (наброса/сброса) нагрузки, имеется режим выхода интегратора тока нагрузки на номинальное значение с заданной постоянной времени работы накопителя порядка 15 мс.

В целом, работа накопителя отражает предполагаемое поведение замкнутой системы управления и удовлетворяет поставленным требованиям и критерию решения поставленных задач.

На рис. 5 представлены результаты моделирования при коммутации нагрузки и наличии накопительного элемента с преобразователем, подключаемым к дизель-генераторной установке. При скачкообразном изменении нагрузки и включённом накопителе до момента времени 8 с происходит дополнительная компенсация колебаний по мощности на валу P_m дизель-генератора, при этом, скорость изменения частоты вращения вала ограничена, также, выходное напряжение генератора V_t не содержит существенных выбросов и провалов напряжения.

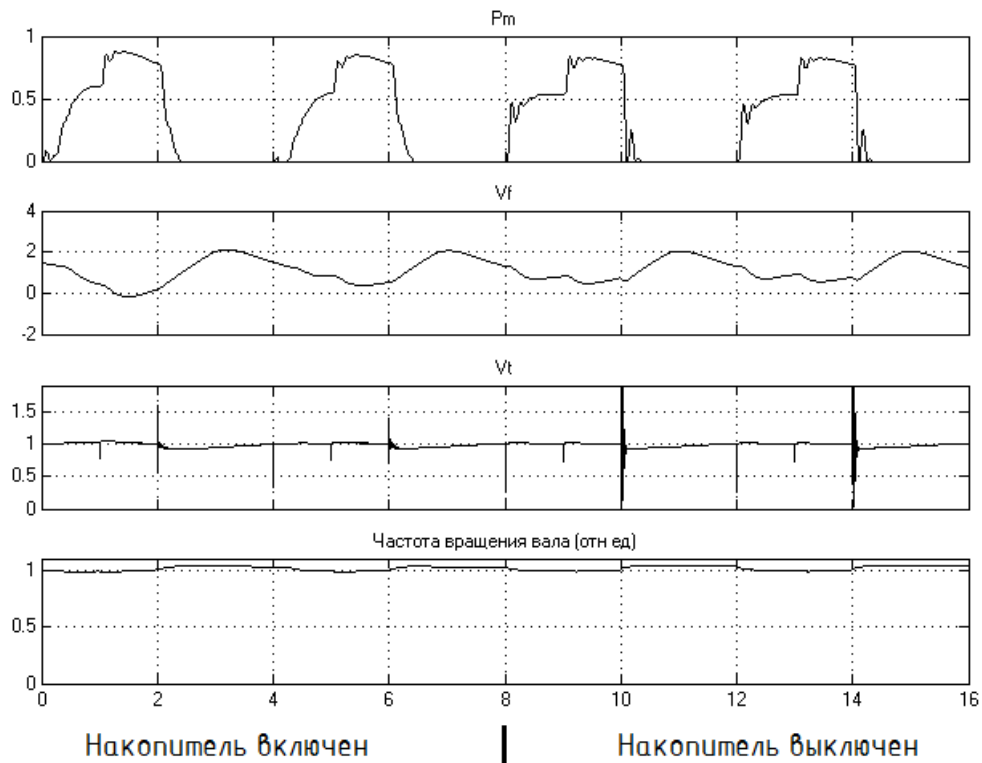


Рис. 5. Результаты моделирования по математической модели ветродизельной установки с накопителем энергии

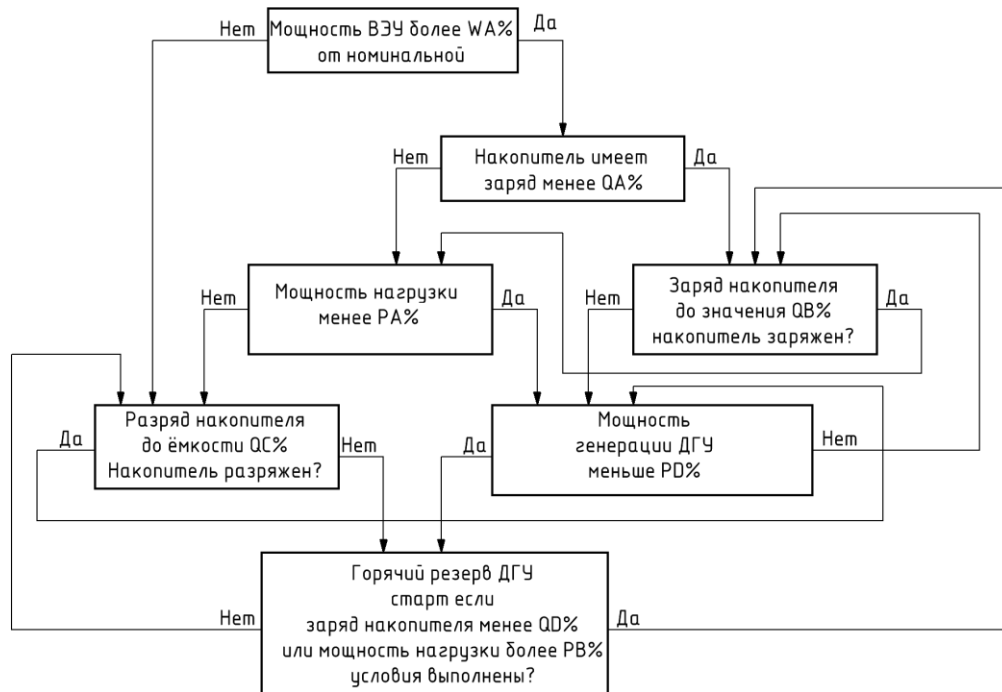


Рис. 6 Основные пограничные режимы работы ветродизельной станции и характерные параметры

В качестве режимов, отражающих мгновенные электромагнитные процессы, или усреднённые на интервале до десяти периодов сетевого напряжения, можно выделить следующие процессы:

- синхронизацию с внешними источниками переменного тока, такими как ДГУ, внешняя сеть, ведущий независимый преобразователь;
- управление по реактивной составляющей переменных величин и их гармоникам, управление по обратной последовательности (компенсация обратной последовательности тока нагрузки или формирование тока обратной последовательности соответствующим заданием амплитуды и фазы в отн. ед.);
- управление возбуждением генератора ВЭУ или ДГУ;
- коммутация с использованием электромеханических контакторов малой мощности с высоким быстродействием или мощных электронных коммутаторов, обеспечивающих островные и сетевые функции;
- срабатывание систем защит и предохранителей.

В качестве режимов, отражающих процессы на интервале от единиц до сотен периодов сетевого напряжения можно отметить:

- коммутацию с использованием мощных электромеханических контакторов при переходе из островного режима в сетевой и наоборот;
- собственная механическая постоянная времени дизельного двигателя.

Режимы, отвечающие за процессы характерным временем от единиц секунд до минуты:

- постоянные времени управления механическими элементами ВЭУ;
- заданная перегрузка ДГУ, преобразователей;
- предзаряд ёмкостей звена постоянного тока преобразователей;
- стабилизация скорости вращения ДГУ или отслеживание точки максимальной генерируемой мощности ВЭУ;

Процессы с характерным временем от единиц минут до часа:

- ветровая генерация;
- разряд аккумуляторной батареи (снижение напряжения);
- ускоренный заряд аккумуляторной батареи;
- выход на тепловой стационарный режим работы ДГУ, преобразователей, аккумуляторной батареи при относительно постоянной средней мощности.

Процессы с характерным временем свыше часа:

- заряд до 100% ёмкости батареи;
- ветровая генерация в течении суток;
- изменение объёма топлива ДГУ.

4. Макетирование многофункционального энергетического комплекса на основе гибридной ветродизельной установки с накопителем энергии

Переходной процесс выходного напряжения инвертора в островном режиме работы холостом ходу приведён на рис. 7.

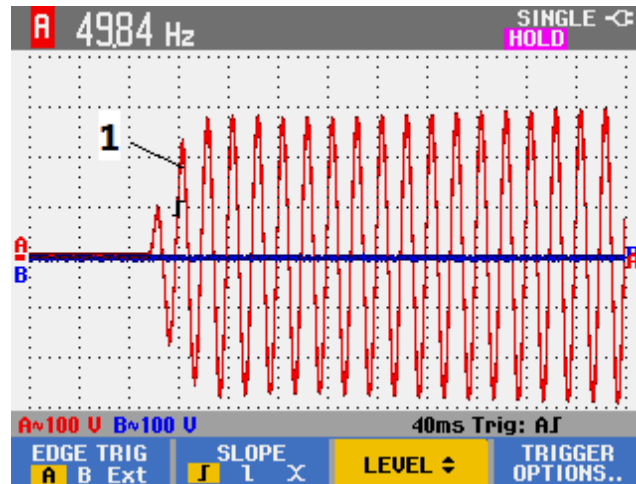


Рисунок 7 Переходной процесс выходного напряжения инвертора в островном режиме работы на холостом ходу

Особенностью измерителя является способ вычисления частоты при переходных процессах и не синусоидальных сигналах. В данном случае имеется выходной сигнал с частотой 50 Гц, с заданием амплитуды фазного напряжения в 310 В. Постоянная времени интегратора составляет порядка 0.2 сек, что видно как нарастание огибающей напряжения до установившегося значения. В начальный момент времени работает модель инвертора, реализованная в виде дискретной передаточной функции и осуществляющая прямое управление по напряжению с заданным уровнем статической ошибки, ошибка устраняется внешним контуром интегратора.

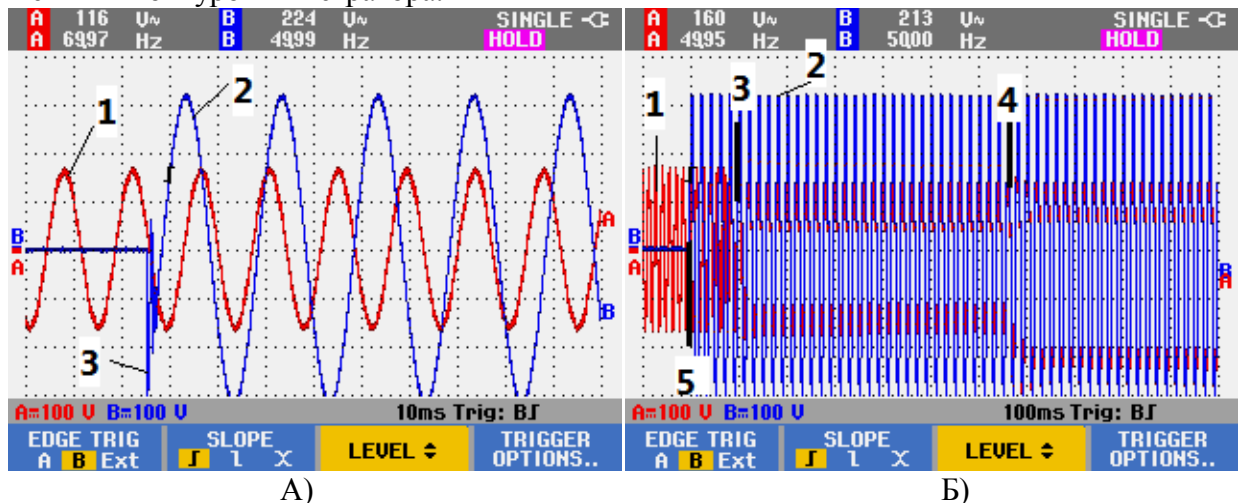


Рисунок 8 Синхронизация по напряжению сети в момент начального пуска системы или появлению сети вновь после её отсутствия

На рис. 8 А) и Б) представлены временные диаграммы процесса синхронизации с сетевым напряжением. На рис. 8 А) представлен процесс в самом начале синхронизации, при этом, условно, была выбрана существенно отличающаяся амплитуда и частота островного режима работы, которая составила 116В и 70 Гц, в то время как сеть была 224В и 50 Гц. На рис. 8Б) показаны этапы работы ФАПЧ, плавной подстройки фазы и амплитуды (с заданной постоянной времени, определяемой пользователем), и включение

под сетевое напряжение. Следует обратить внимание, что данный метод может быть использован для синхронизации электромашинных генераторов с сетью и реализованы в виде дискретной системы автоматического регулирования на базе микропроцессорных средств, как это сделано в испытываемых преобразователях.

Возможность управления активной и реактивной мощности при работе установки на сеть представлена на рис. 9.

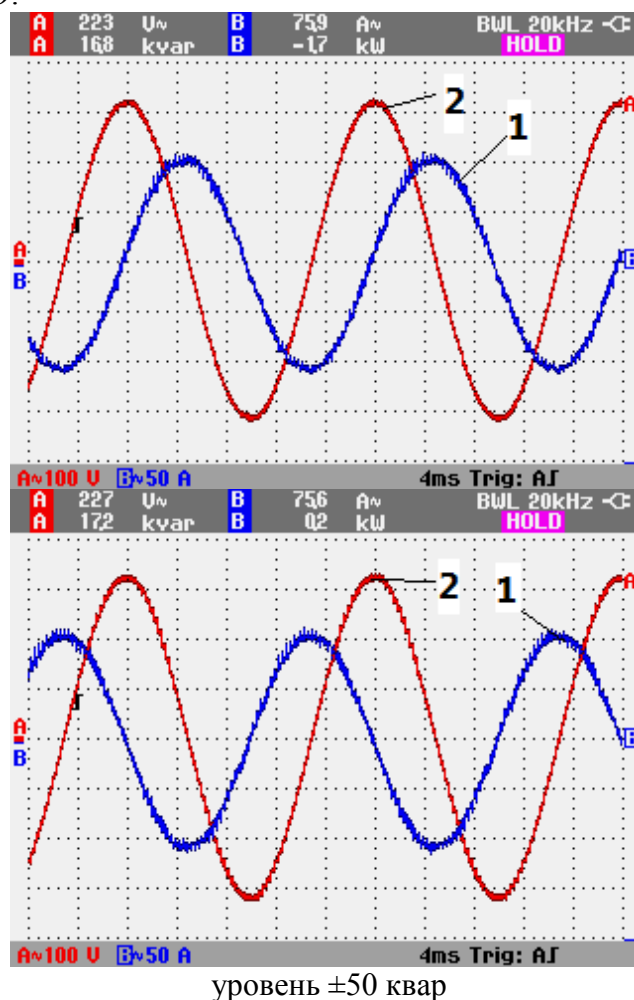


Рисунок 9 - Управление по реактивной составляющей тока сети

Новизна результатов.

В качестве новизны можно отметить следующее:

- Предложен анализ режимов работы ДЭС, ВЭУ, и НЭ при произвольном характере изменения нагрузки, в том числе при работе ДЭС с переменной частотой вращения;
- разработаны алгоритмы регулирования ДЭС, обеспечивающих управление эффективностью системы при изменении нагрузки АСЭС, реализованы режимы поддержания максимальной генерируемой мощности, максимальной эффективности преобразования, генерации и накопления по общим критериям;
- схемотехнические решения главной схемы МЭК для совместной работы ДЭС, ВЭУ,

накопителя энергии;

- алгоритмы работы САУ МЭК;
- схемотехника и алгоритмы работы преобразователей на основе процессоров цифровой обработки сигналов с обеспечением заданных показателей качества электрической энергией и управлением по основным величинам, гармоникам, симметричным компонентам, предложены алгоритмы быстрой синхронизации.

Разработаны две структуры макетного образца многофункционального энергетического комплекса (МЭК) на основе гибридной ветродизельной установки с накопителем энергии и солнечными фотоэлементами, обеспечивающими совместное производство и управление электроэнергией с заданными нагрузками, со звеном переменного и постоянного тока.

Научная и практическая значимость работы.

Разработанный многофункциональный энергетический комплекс обеспечит выполнение основных технических требований к автономным системам энергоснабжения (АСЭС) для условий Арктики с высокими экономическими показателями. Топливная экономичность первичного дизеля в составе многофункционального энерготехнологического комплекса с оптимизацией скоростного режима с переменными оборотами может достигать 27 %. Экономия топлива за счёт применения СНЭ может достигать 25 %. Экономия топлива за счёт применения ВЭУ может достигать 40 %. Экономия топлива за счёт применения фотовольтаики может достигать 25 %.

В настоящее время одобрена Программа развития возобновляемых источников энергии (ВИЭ) Холдинга ОАО «РАО Энергетические системы Востока» на период до 2016 г. с перспективой до 2020г. Основным стимулом для изучения потенциала ВИЭ в Дальневосточном федеральном округе (ДФО) стала специфика, связанная с труднодоступностью многих районов округа для централизованного энергоснабжения. При подготовке Программы были проведены экономические расчеты для более чем 170 населенных пунктов во всех регионах ДФО. Особенно сложная проблема надёжного энергообеспечения для Чукотского АО по причине:

- высокой доли транспортных расходов, сложных логистических схем (с наличием многочисленных перевалок с одного вида транспорта на другой) и сезонный характер доставки топлива из-за коротких сроков навигации;
- неоптимальных структур топливного баланса, приводящая к значительным затратам на дизельное топливо;
- значительной неравномерности суточных графиков электрических нагрузок ввиду значительной доли коммунально-бытового энергопотребления, как следствие, - повышенная нагрузка и износ оборудования, высокие удельные расходы топлива;
- суровых природно-климатических условия эксплуатации производственных фондов;
- значительных ежегодных размеров кредитных ресурсов, привлекаемых для завоза дизельного топлива, существенно снижает финансовую устойчивость предприятий;
- высокой стоимости производства энергии и высокие тарифы.

Полученный опыт при выполнении работы по созданию МЭК может быть использован для Чукотского АО в семи пилотных проектах МЭК мощностью 8.8 Мвт

Разработанная гибридная ветродизельная установка с накопителем электроэнергии (НЭ) может явиться базовой основой автономного энергоснабжения потребителей, прежде всего, районов Арктики.

Целесообразно рассмотреть вариант построения многофункционального энергетического комплекса на основе дизельной установки, работающей на сырой нефти, снижающей себестоимость выработки энергии в 4 раза по сравнению с дизельной установкой, работающей на арктическом дизельном топливе.

Полученные результаты и их анализ.

Основаниями для технологической интеграции различных источников энергии в единый комплекс служат следующие факторы: 1) повышения энергобезопасности за счет диверсификации структуры энергоисточников; 2) снижения себестоимости электроснабжения за счет оптимизации загрузки наиболее эффективных источников энергии; 3) повышения надежности электроснабжения потребителей при возрастании количества допустимых альтернатив поставок; 4) снижение стоимости поставляемой энергии; 5) развитие конкурентных отношений за счет увеличения числа субъектов рынка.

Проведён анализ режимов работы многофункционального энергетического комплекса при переменной частоте вращения вала генераторов, определены режимы работы МЭК для выбранных и варьируемых параметров накопителя энергии при произвольном характере изменения нагрузки и генерации, разработаны алгоритмы управления комплексом и его отдельными составляющими, обеспечивающих заданные критерии качества при заданных возмущениях.

Разработаны две структуры опытного образца многофункционального энергетического комплекса на основе гибридной ветродизельной установки с накопителем энергии и солнечными фотоэлементами, обеспечивающими совместное производство электроэнергии, тепла с помощью энергонагревателей и холода с помощью тепловых насосов.

Схема со звеном переменного тока Все генераторы объединяются на шине переменного тока с относительно постоянной частотой. Должны быть подключены потребители, способные питаться от стабильного напряжения с относительно стабильной частотой. Инверторный модуль подключается к батарее с заданным диапазоном напряжения звена постоянного тока. К звену постоянного тока можно подключить через DC/DC преобразователь солнечную батарею которая обеспечивается накопителем.

Схема со звеном постоянного тока. В данной схеме к звену постоянного тока с не стабилизированным напряжением непосредственно подключается накопитель. Напряжение варьируется согласно паспортным данным батареи в зависимости от степени заряда. Поддерживается в основном номинальное напряжение рабочей точки порядка 1,1 кВ. Инвертор на 400 В может работать без гальванической развязки.

Проведены исследования режимов работы МЭК и разработаны алгоритмы управления САУ МЭК.

Топливная экономичность первичного дизеля в составе многофункционального энерготехнологического комплекса с оптимизацией скоростного режима с переменными оборотами может достигать 27%. Экономия топлива за счёт применения СНЭ может достигать 25%. Экономия топлива за счёт применения ВЭУ может достигать 40%.

Экономия топлива за счёт применения фотовольтаики может достигать до 15-20 % в зависимости от установленной мощности.

Разработан вариант построения multifunctional энергетического комплекса на основе дизельной установки, работающей на сырой нефти, снижающей себестоимость выработки энергии в 4 раза по сравнению с дизельной установкой, работающей на арктическом дизельном топливе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многофункциональный энергетический комплекс (МЭК) на основе гибридной ветродизельной установки с накопителем энергии и солнечными фотоэлементами, обеспечивающими совместное производство электроэнергии, управлением основными и вспомогательными нагрузками, может явиться базовой основой автономного энергоснабжения потребителей труднодоступных районов России для централизованного энергоснабжения, прежде всего, районов Арктики.

На основе теоретических сведений и практического опыта разработана математическая модель замкнутой системы автоматического регулирования потоком активной мощности накопителя в составе системы ветроэнергетические генераторы - дизель генераторная установка – накопитель - нагрузка.

Разработана методика выбора коэффициентов настройки регуляторов по отработке высокочастотных составляющих спектра колебаний мощности и параметров накопителя энергии, позволяющие осуществить компенсацию возмущений нагрузки.

Разработаны алгоритмы управления преобразователем, позволяющие сформировать заданное качество электрической энергии с регулировкой по основным составляющим токов и напряжений, гармоникам, реактивной мощности, обратной последовательности.

Введение в систему накопителя энергии влияет на характер переходных процессов дизеля, вследствие этого наблюдается улучшение управления расходом топлива ввиду уменьшения перерасхода при значительных переходных процессах в случае относительно большого скачкообразного изменения нагрузки, при этом, эффективность накопителя сильно зависит от характера и величины электрической нагрузки. Наблюдается снижение колебательности переходного процесса по мощности на валу, уменьшение выбросов по напряжению для синхронного генератора при коммутациях нагрузки, что благоприятно сказывается для потребителя и дизель-генераторной установки. Снижается влияние флуктуаций ветра.

4. Список литературы

1. Xiaonan Wang, Ahmet Palazoglu and Nael H. El-Farra. Operation of Residential Hybrid Renewable Energy Systems: Integrating Forecasting, Optimization and Demand Response. 2014 American Control Conference (ACC) June 4-6, 2014. Portland, Oregon, USA. Pp. 5043 – 5048
2. Hafez, B. ; Krishnamoorthy, H.S. ; Enjeti, P. ; Ahmed, S. ; Pitel, I.J. Medium voltage power distribution architecture with medium frequency isolation transformer for data centers. Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2014 Twenty-Ninth Annual Publication Year: 2014 , Page(s): 3485 – 3489
3. Ketabi, A. ; Fini, M.H. An Underfrequency Load Shedding Scheme for Hybrid and Multiarea Power Systems. Smart Grid, IEEE Transactions on Volume: PP , Issue: 99 Publication Year: 2014 , Page(s): 1

4. Shuben Zhang ; Jian Yang ; Xiaomin Wu ; Ruiyi Zhu Dynamic power provisioning for cost minimization in islanding micro-grid with renewable energy. Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), 2014 IEEE PES Publication Year: 2014 , Page(s): 1 - 5
5. Pan, I. ; Das, S. Kriging Based Surrogate Modeling for Fractional Order Control of Microgrids. Smart Grid, IEEE Transactions on Volume: PP , Issue: 99 Publication Year: 2014 , Page(s): 1
6. Hopulele, E. ; Gavrilas, M. ; Atanasoae, P. Optimal design of a hybrid distributed generation system Power Engineering Conference (UPEC), 2014 49th International Universities Publication Year: 2014 , Page(s): 1 – 6
7. Leong Kit Gan ; Shek, J.K.H. ; Mueller, M.A. Optimisation sizing of hybrid wind-diesel systems using linear programming technique. Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2014), 7th IET International Conference on Publication Year: 2014 , Page(s): 1 – 6
8. Sharma, P. ; Hoff, B. ; Meena, R. ANN based reactive power control of an autonomous wind-diesel hybrid power plant using PMIG and SG. Power and Energy Systems Conference: Towards Sustainable Energy, 2014 Publication Year: 2014 , Page(s): 1 – 6
9. Messinis, G. ; Gonzalez-Espin, F. ; Valdivia, V. ; Rea, J. ; Mollaghan, D. ; Hatziaargyriou, N. Application of rapid prototyping tools for a hierarchical microgrid control implementation. Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), 2014 IEEE 5th International Symposium on Publication Year: 2014 , Page(s): 1 – 5
10. Akinyele, D.O. ; Rayudu, R.K. ; Nair, N.K.C. ; Chakrabarti, B. Decentralized energy generation for end-use applications: Economic, social and environmental benefits assessment. Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), 2014 IEEE Publication Year: 2014 , Page(s): 84 – 89
11. Pirhaghshenasvali, M. ; Asaei, B. Optimal modeling and sizing of a practical hybrid wind/PV/diesel generation system Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC), 2014 5th Publication Year: 2014 , Page(s): 506 – 511
12. Khan, M.R. ; Khan, M.F. Fault analysis of wind turbine generator in an isolated network Advances in Energy Conversion Technologies (ICAECT), 2014 International Conference on Publication Year: 2014 , Page(s): 227 – 232
13. El Moursi, M.S. ; Zeineldin, H.H. ; Kirtley, J.L. ; Alobeidli, K. A Dynamic Master/Slave Reactive Power-Management Scheme for Smart Grids With Distributed Generation. Power Delivery, IEEE Transactions on Volume: 29 , Issue: 3 Publication Year: 2014 , Page(s): 1157 – 1167
14. Mipoung, O.D. ; Lopes, L.A.C. ; Pillay, P. Frequency Support From a Fixed-Pitch Type-2 Wind Turbine in a Diesel Hybrid Mini-Grid. Sustainable Energy, IEEE Transactions on Volume: 5 , Issue: 1 Publication Year: 2014 , Page(s): 110 - 118
15. Lukutin, B.V. ; Sarsikayev, Y.Zh. ; Surkov, M.A. ; Lyapunov, D.Yu. Tuning the regulators of wind-diesel power plant operating on the DC-bus Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2014 14th International Conference Publication Year: 2014 , Page(s): 459 – 463
16. Seliga, R. ; Ernest, E. ; Paciura, K. ; Brown, N.L. Operation of sine-wave voltage source inverter in hybrid genset based autonomous power system Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2014), 7th IET International Conference on . Publication Year: 2014 , Page(s): 1 – 5
17. Delgado, C. ; Dominguez-Navarro, J.A. Optimal design of a hybrid renewable energy system Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), 2014 Ninth International Conference on Publication Year: 2014 , Page(s): 1 – 8

18. Nikolic, D. ; Negnevitsky, M. ; de Groot, M. ; Gamble, S. ; Forbes, J. ; Ross, M. Fast demand response as an enabling technology for high renewable energy penetration in isolated power systems . PES General Meeting | Conference & Exposition, 2014 IEEE DOI: 10.1109/PESGM.2014.6939282 Publication Year: 2014 , Page(s): 1 – 5
19. Lan Zhu ; Zheng Yan ; Wei-Jen Lee ; Xiu Yang ; Yang Fu Direct load control in microgrid to enhance the performance of integrated resources planning Industrial & Commercial Power Systems Tehcnical Conference (I&CPS), 2014 IEEE/IAS 50th Publication Year: 2014 , Page(s): 1 – 7
20. Atiqur Rahman, M.M. ; Al Awami, A.T. ; Rahim, A.H.M.A. Hydro-PV-wind-battery-diesel based stand-alone hybrid power system Electrical Engineering and Information & Communication Technology (ICEEICT), 2014 International Conference on DOI: 10.1109/ICEEICT.2014.6919044 Publication Year: 2014 , Page(s): 1 – 6
21. Adam M. Ragheb and Magdi Ragheb. Wind Turbine Gearbox Technologies. University of Illinois at Urbana-Champaign, 216 Talbot Laboratory, USA. Fundamental and Advanced Topics in Wind Power. 20, June, 2011, 422 p., pp. 189-206.
22. Derek F. Lahr, Dennis W. Hong. The operation and kinematic analysis of a novel cam-based infinitely variable transmission. Proceedings of IDETC/CIE 2006 ASME 2006 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference September 10-13, 2006, Philadelphia, Pennsylvania, USA. Pp. 1-6.
23. Bjørn Skaare, Bo Härnsten, and Finn Gunnar Nielsen. Energy Considerations for Wind Turbines with Hydraulic Transmission Systems. EWEA OFFSHORE 2011, 29 November – 1 December 2011, Amsterdam, The Netherlands.
24. R. R. Salunkhe Prof V. R. Gambhire R. S. Kapare. Review on Eclipse Gearbox Reliability. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE) ISSN: 2278-1684, PP: 27-34.
25. Wind Turbine Doubly-Fed Induction Generator (Phasor Type) – Simulink Library Element. Matlab and Simulink 2014 Edition. The MathWorks, Inc.
26. Sheng Huang ; Hui Wang ; Wu Liao ; Shoudao Huang. Generator side converters coordinated control Strategy based on VSC-HVDC DD-PMSG wind turbine series-parallel connection. Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), 2014 IEEE Conference and Expo DOI: 10.1109/ITEC-AP.2014.6940692 Publication Year: 2014 , Page(s): 1 – 7
27. Tourou, P. ; Sourkounis, C. Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), 2014 Ninth International Conference on DOI: 10.1109/EVER.2014.6844083 Publication Year: 2014 , Page(s): 1 - 9 Cited by: Papers (1). Review of control strategies for DFIG-based wind turbines under unsymmetrical grid faults.
28. Dudurych O., Conlon M. Impact of reduced system inertia as a result of higher penetration levels of wind generation. Power Engineering Conference (UPEC), 2014 49th International Universities Publication Year: 2014 , Page(s): 1 - 6
29. G. Sybille (Hydro-Quebec), Tarik Zabaoui (ETS). Emergency Diesel-Generator and Asynchronous Motor. MathWorks. Simulink Examples.
30. IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies." IEEE Standard, Vol. 421, No. 5, 2005 (Revision of IEEE 521.5-1992)