

ВВЕДЕНИЕ

Современная тенденция развития и усовершенствования энергетики состоит в стремлении к повышению надежности энергоснабжения потребителей, а также к сбалансированности энергорайонов. Главную позицию в стратегии модернизации энергетики занимают автономные системы электроснабжения.

Необходимость в автономных системах электроснабжения возникает там, где экономически нецелесообразно или технически невозможно использовать центральное электроснабжение, к примеру, на объектах, которые находятся в движении. В первую очередь это тяжелодоступные объекты, удаленные от крупных энергосистем, и имеющие собственные источники электроэнергии, например, нефтяные и газовые месторождения.

В таких условиях решение проблем управления автономными энергетическими установками, прежде всего в части оптимизации процессов электроснабжения предприятий, с позиций минимизации затрат и энергосбережения представляет собой важную задачу.

Для потребителей автономных системах электроснабжения промышленной частоты имеет огромное значение обеспечение качества электрической энергии. Одной из главных задач для независимых систем энергоснабжения является получение неизменной частоты при переменной скорости вращения вала приводного двигателя. Имеется проблема обеспечения устойчивых параметров электроэнергии, получаемой преобразованием механической энергии от нестабильного ее источника, например, ветряного двигателя. Такая же проблема существует и при эксплуатации электроустановок от стабильного источника механической энергии, но при малоустойчивой электрической нагрузке. Эффективным путем решения данной проблемы является преобразование механической энергии в электрическую энергию с помощью специальных электрических машин, а именно асинхронизированных синхронных генераторов (АСГ) [1].

Существенное значение имеет изучение параллельной работы независимых источников электрической энергии с сетью. При этом появляется ряд принципиальных вопросов параллельной работы автономных систем электропитания с централизованной сетью.

Значительный вклад в процесс развития асинхронизированных электрических машин, практического использования и в создание современной теории их управления внесены отечественными учеными, в частности профессором М.М. Ботвинником, под надзором которого данные работы начали реализовываться во ВНИИЭ в 1955 г., а также его последователем – профессором Ю.Г. Шакарянном. Огромный вклад в практику и теорию данной тематики внесли исследования, которые были выполнены И.А. Лабунцом, В.И. Радиным, Л.Г. Мамиконяном, А.П. Лохматовым, С.В. Покровским, И.М. Постниковым, Н.Н. Блоцким, З.Н. Сазоновым и др. [2]. Практическое исполнение работ по введению асинхронизированных синхронных генераторов началось в 60-х годах, преимущественно важной из которых явилось ввод в эксплуатацию двух асинхронизированных синхронных гидрогенераторов мощностью по 40 МВт Иовской гидроэлектростанции (Колэнерго). Среди иностранных ученых, над данной темой занимались А. Kahn, J.C. Clare, R. Репа, L.M. Ricardo, R.M. Sebastian и др. [2, 3, 4, 5].

Непрерывное снабжение электрической энергией предполагает наличие автономного источника для энергоснабжения электроприемников первой категории. Выбор вида источника определяется его потребляемой мощностью, назначением, наличием или отсутствием сети электроснабжения, географическим положением потребителя и допустимыми затратами.

Обзор результатов исследований зарубежных и отечественных ученых показал, что использование асинхронизированных синхронных генераторов для АСЭ, эксплуатируемых на различную электрическую нагрузку, недостаточно изучены.

Одним из значительных препятствий на пути ввода в эксплуатацию асинхронизированных синхронных генераторов в автономных системах электр

троснабжения является проблема создания простейшей и надежной системы устойчивости напряжения по амплитуде и частоте, что требует проведения соответствующих исследований. В последние годы предъявляются все более серьезные требования к качеству электрической энергии, что накладывает соответствующие требования к системам управления с возможно более универсальными свойствами.

Несмотря на то, что АСГ характеризуются рядом отличных качеств, в настоящее время они изучены в незначительном объеме. Исследованию практики и теории управления автономными энергетическими установками и энергосбережением посвящено достаточно большой объем всевозможных научных работ отечественных и зарубежных специалистов. Однако, на уровне автономных систем электроснабжения эти исследования разобщены и не в достаточной мере способствуют решению данной задачи. Поэтому, исследования асинхронизированных синхронных генераторов для АСЭ, работающих на переменную нагрузку, являются в большой степени актуальной задачей.

Целью выполнения диссертационной работы является разработка алгоритмов управления асинхронизированного синхронного генератора, обеспечивающим требуемые критерии качества генерируемого напряжения при переменном значении электрической нагрузки, а также при переменной скорости вращения вала приводного двигателя.

Объектом исследования является электромеханическая система: асинхронизированный синхронный генератор; преобразователь частоты с независимым источником напряжения; система управления; приводной механизм.

Предметом исследования является система управления асинхронизированным синхронным генератором.

Научная новизна:

1. Разработан алгоритм управления асинхронизированным синхронным генератором на основе обобщенной электрической машины, позволяющий

улучшить динамические характеристики и повысить показатели качества электроэнергии в АСЭ.

2. Разработана имитационная модель исследования автономной системы электроснабжения на базе машины двойного питания (МДП) с предложенной системой автоматического регулирования.

Практическая значимость результатов ВКР: создание автономных систем электроснабжения на базе асинхронизированного синхронного генератора с показателями качества удовлетворяющими требованиям действующих ГОСТов.

Апробация работы. Основные положения работы были обсуждены и доложены на Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири» – 2015 г. (г. Иркутск), на 4-й Международной научно-практической конференции «Эффективное и качественное снабжение и использование электроэнергии» - 2015 г. (г. Екатеринбург).

1 Обзор литературы

Практика и теория асинхронизированных синхронных машин начинает свое развитие с работ по коллекторным каскадам, с исследований Д. Осанна, В. Зейца, М. П. Костенко, Л. Дрейфуса, а также В. Г. Касьянова. Значительный вклад в развитие данного направления, в создание теории асинхронизированных синхронных машин и основ их эксплуатации внес профессор М. М. Ботвинник, под руководством и по инициативе, которого данные работы были начаты во ВНИИЭ в 1955 г. [6].

1.1 Устройство асинхронизированной синхронной машины, основные элементы систем регулирования и возбуждения

Асинхронизированная синхронная машина представляет собой электро-механическую установку, состоящий из собственно электрической машины, автоматического регулятора возбуждения, возбудителя. Структура асинхронизированной машины показана на рис. 1 [7].

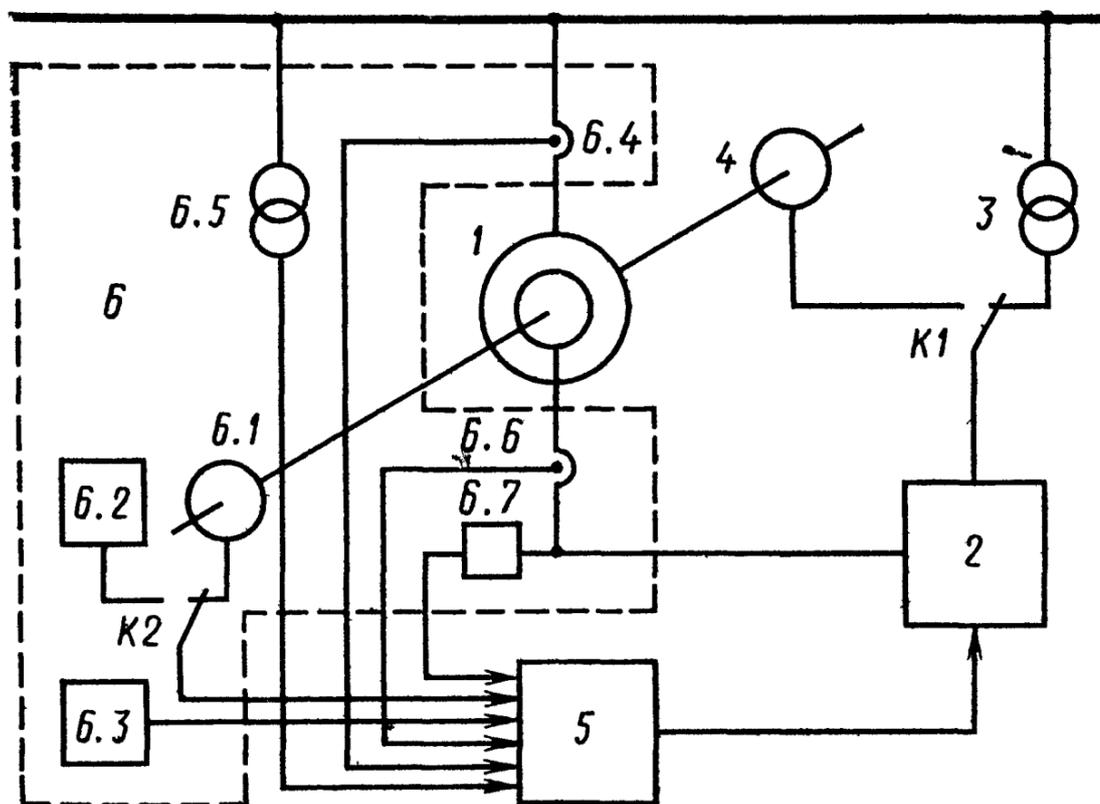


Рисунок 1 – Структура асинхронизированной синхронной машины

Собственно, электрическая машина 1 — неявнополюсная бесколлекторная машина переменного тока, содержащая в общем случае m_f на роторе и m фаз на статоре. Как известно, классически для большого количества практических случаев на статоре уложена симметричная трехфазная обмотка, подключаемая к трехфазной сети непосредственно или через трансформатор, а на роторе — двух- или трехфазная симметричная обмотка, подключаемая через контактные кольца непосредственно к возбудителю. Возбудитель — 2 , подсоединяемый к кольцам ротора машины 1 , получает силовое питание либо от вспомогательной электрической машины 4 , расположенной на одном валу с основной машиной 1 , либо от сети через трансформатор 3 . Возможен также вариант, когда электрическая машина 4 входит в состав отдельной, так называемой, двигатель-генераторной установки.

Частота напряжения на выводах возбудителя, подключенных к кольцам ротора может изменяться по заданному закону и равна в установившемся режиме разности круговых частот вращения поля ротора и статора (частоте скольжения) электрической машины. Из этого следует, что возбудитель асинхронизированной синхронной машины является в общем случае преобразователем частоты напряжения источника питания в частоту скольжения.

Автоматический регулятор возбуждения 5 служит для формирования требуемой функции регулирования машины, усиливаемой возбудителем. Очевидно, что число выходных сигналов регулятора соответствует числу фаз ротора машины. Функция регулирования формируется на основе информации, полученной с той или иной переменной, характеризующей режим работы машины. Эта информация получается от системы датчиков 6 , которая в общем случае содержит в себе следующие датчики:

6.1 — датчик тригонометрических функций угла поворота ротора (углоизмерительная машина или датчик углового положения ротора);

6.2 — задатчик независимой частоты;

6.3 – датчик тригонометрических функций угла изображающего вектора напряжения электрической системы. Эта информация может быть получена, например, с помощью устройства телепередачи угла;

6.6 и 6.4 – датчики токов статора и ротора;

6.7 и 6.5 – датчики напряжений ротора и статора.

Ключи *K1* и *K2* (см. рис. 1) могут находиться в одном из двух положений — левом или правом. Действительно, возбудитель 2 может питаться либо от понижающего трансформатора 5, либо от вспомогательной машины 4 хотя в отдельных случаях для повышения надежности асинхронизированной синхронной машины возможно питание возбудителя от двух независимых источников.

Если на регулятор 5 поступают сигналы от датчика 6.1 (ключ *K2* в правом положении), то, как будет показано ниже, выходная частота сигналов регулятора является функцией частоты вращения ротора и машина приобретает асинхронные свойства в отношении устойчивости; если же на регулятор поступают сигналы от датчика 6.2, то выходная частота сигналов регулятора не зависит от частоты вращения ротора, а машина приобретает синхронные свойства в отношении устойчивости.

В качестве электрической машины, входящей в состав асинхронизированной синхронной машины, как следует из рассмотренного, может использоваться машина двойного питания (асинхронная машина с фазным ротором) как специально спроектированная, так и серийного изготовления. В первом случае удастся получить систему с лучшими технико-экономическими показателями, так как машина проектируется с учетом свойств всех остальных элементов данного электромеханического комплекса. Во втором случае потребуются некоторые небольшие изменения – усиление бандажа ротора для работы со сверхсинхронной скоростью, иногда вывод шести контактных колец и др.

Возбудитель асинхронизированной машины может быть создан на основе как вентильных устройств, так и электрических машин. В настоящее время

электромашинная система возбуждения, состоящая из коллекторных машин переменного тока не применяется из-за известных недостатков таких систем.

Современная система возбуждения состоит из управляемых тиристорных преобразователей частоты. Из большого числа таких преобразователей – инверторов тока и напряжения, непосредственных преобразователей частоты с естественной коммутацией (НПЧЕ) – наиболее пригодными для асинхронизированных синхронных машин являются НПЧЕ с синусоидальной формой выходного тока [8, 9].

1.2 Принцип действия и основные свойства асинхронизированной синхронной машины

Нормальным установившимся режимом называют такой режим работы электрической машины, при котором реактивные и мощности активные роторных и статорных цепей являются постоянными и не зависят от времени, а угловая скорость ротора при этом остается также постоянной при стабильном механическом моменте на валу [10].

Нормальный установившийся режим для электрической машины существует только в том случае, когда магнитные потоки, которые созданы роторными и статорными токами, оказываются в пространстве взаимно неподвижными при различном значении угловой скорости ротора. Из этого условия следует также, что магнитодвижущие силы, создающие указанные магнитные потоки или изображающие векторы токов и напряжений, и ротора, и статора, также должны быть взаимно неподвижными. Данное условие записывается следующим образом:

$$\omega_f = \omega - \omega_R = -s\omega, \quad (1)$$

где ω – угловая скорость векторов напряжений, токов статора относительно статора и магнитных потоков;

ω_f – угловая скорость векторов напряжений, токов ротора относительно ротора и магнитных потоков;

ω_R – угловая скорость ротора.

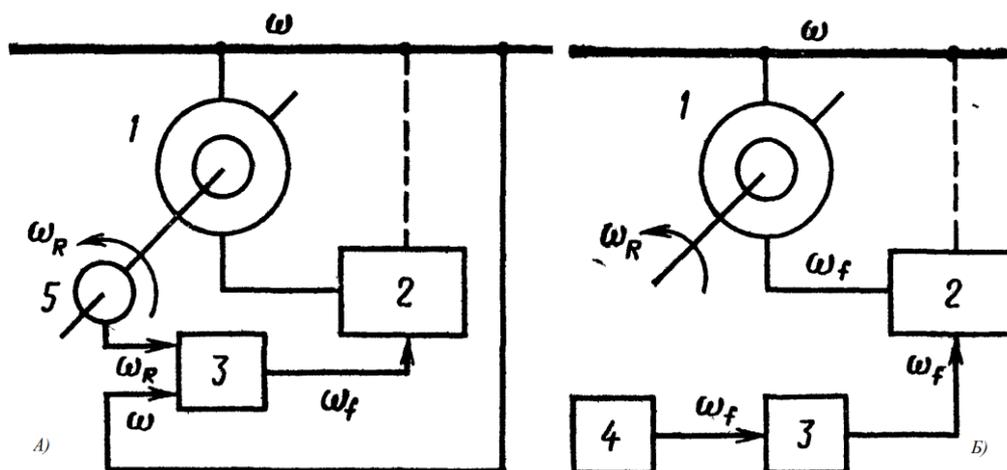


Рисунок 2 – Структурная схема машины, работающей в обобщенном асинхронном (а) и обобщенном синхронном (б) режимах

Практическое исполнение условия (1) может достигаться двумя принципиально разными методами: когда ω_R является независимой переменной, а ω_f – функцией скоростей ω и ω_R ; когда ω_f является независимой переменной, а скорость ω_R – функцией скоростей ω и ω_f .

На этом принципе основана классификация асинхронизированных синхронных машин, данная в свое время еще В. Т. Касьяновым и развитая позже в ряде других работ [11]. Машина первого типа определена как имеющая синхронные свойства, или работающая в «обобщенном синхронном» режиме. Машина второго типа определена как имеющая асинхронные свойства, или работающая в «обобщенном асинхронном» режиме. Эти оба режима одной и той же машины, называемой автором машиной двойного питания, могут существовать для конкретных условий, имеют свои принципы, достоинства и недостатки.

На рис. 2 показаны структурные схемы машины двойного питания, работающей в «обобщенном асинхронном» и «обобщенном синхронном» режимах. Схемы эти различаются тем, что в первом случае система автоматического регулирования электрической машины 1, ротор которой подсоединен к преобразователю частоты 2, разомкнута по скорости, так как сигнал ω_f поступает на вход автоматического регулятора 3 от независимого задатчика 4 (см. рис. 1, за-

датчик 6.2), во втором же случае система автоматического регулирования машины 1 замкнута по скорости и на вход автоматического регулятора 3 от датчика положения 5 поступает сигнал угловой скорости ротора (см. также рис. 1, датчик 6.1).

В первом случае при изменении, например, механического момента на валу и неизменных значениях скоростей ω и ω_f новый установившийся режим наступит только в том случае, когда скорость $\omega_R = \omega + \omega_f = const$, т. е. скорость ротора в установившемся режиме для данного случая не будет изменяться при изменении нагрузки на валу. В этом заключается полная аналогия рассматриваемого режима асинхронизированной и синхронной машин.

Во втором случае при изменении момента на валу и неизменном значении скорости ω новый установившийся режим наступит при произвольных значениях скорости ротора. Скорость же ω_f будет изменяться в соответствии с (1). Значения ω_R и ω_f , которые установятся в новом нормальном установившемся режиме, определяются механической характеристикой машины и другими факторами, которые будут подробно рассмотрены позже. Здесь важно отметить, что нормальный установившийся режим работы в данном случае сопровождается изменением скорости ротора вместе с изменением нагрузки точно так же, как это имеет место в асинхронных машинах. Очевидно, что как в первом случае (при неизменных ω и ω_f), так и во втором случае (при неизменных ω и ω_R) с изменением тока ротора в асинхронизированной синхронной машине можно изменять реактивную мощность статора так же, как и в синхронной машине.

Для обобщенного асинхронного режима угловая скорость ротора регулируется изменением напряжения ротора и фазы напряжения, вследствие чего изменяется соотношение между моментом, развиваемым электрической машиной, и механическим моментом на валу, что приводит к изменению скорости вращения ротора, а в электрической машине обобщенного синхронного режима

– изменением частоты ω_f напряжений на обмотках ротора. В том и другом случае новый нормальный установившийся режим наступит тогда, когда механический момент и момент, развиваемый машиной будут вновь равны.

Итак, асинхронизированная синхронная машина может работать в обобщенном асинхронном и синхронном режимах – режимах, отличающихся друг от друга характером формирования частоты ω_f напряжений (токов) ротора.

Эти способы формирования определяют и характер устойчивости машины – по углу или по скольжению соответственно [12].

Асинхронизированная машина независимо от способа формирования напряжений ротора позволяет контролировать реактивную мощность и может работать в нормальном установившемся режиме с различной частотой вращения ротора. При этом отметим, что характеристики и динамические и статические свойства машины определяются законом и параметрами регулирования фазы и амплитуды пространственного вектора тока (напряжения) ротора.

И.З. Богуславский и Я.Б. Данилевич рассматривали возможность применения асинхронизированных синхронных генераторов для ветростанций и малых ГЭС [14].

Уровень линейной нагрузки роторов АСГ выше примерно на 10 – 15 % [15, 16], поэтому при использовании двигателя с фазным ротором в качестве АСГ его номинальную мощность приходится снижать примерно на 20 %, одновременно предпринимая дополнительные меры по повышению эффективности вентиляции обмотки ротора. Следует также отметить, что при практически одинаковых коэффициентах мощности уровень насыщения магнитной цепи АСГ на 10 – 15 % выше, чем у двигателя [15].

Асинхронные двигатели в номинальном режиме обычно работают в диапазоне скольжений ~ 1 %; для АСГ этот диапазон значительно шире – до 20 – 25 %, соответственно, в меди и активной стали ротора АСГ значительно

большие потери и нагревы, так что дополнительные меры по повышению эффективности вентиляции должны быть приняты не только применительно к обмотке, но и к активной стали ротора [16].

В генераторах типа АСГ преобразователь частоты, как отмечалось выше, включается в цепь его ротора; при этом его мощность значительно меньше мощности преобразователя для синхронной машины, который необходимо включить в цепь статора. С точки зрения эксплуатационных режимов АСГ важно, что преобразователь в цепи его ротора может изменять напряжение на контактных кольцах не только по частоте и амплитуде, но и по фазе, тем самым меняя и коэффициент мощности АСГ [17].

У двигателей с фазным ротором применяются как правило полузакрытые пазы со стержневой обмоткой, выполненной в виде полусекций, уложенных узкой стороной вдоль высоты паза и спаянных в лобовых частях. Однако для АСГ такая конструкция может применяться только при малых диапазонах допустимых скольжений – не более 2 – 5 %. При скольжении до 20 – 25 % следует применять конструкции, учитывающие увеличение потерь и нагрева обмотки ротора из-за явления поверхностного эффекта [16]. Кроме того, конструкция АСГ должна отличаться значительным числом витков для того, чтобы напряжение на контактных кольцах при максимальных рабочих скольжениях составляло бы около 350 – 400 В; это целесообразно с точки зрения рациональной конструкции преобразователя.

Для машин с фазным ротором имеет значение вопрос снижения добавочных потерь. Этот вопрос может быть решен различными путями, один из которых – применение катушечной обмотки статоров машин переменного тока. Однако по технологическим соображениям эта конструкция предполагает применение открытого паза ротора, тогда в кривой поля ротора неизбежно появление высших пазовых гармоник, которые вызывают добавочные потери в активной стали и обмотках. Отметим, что крупные асинхронные машины часто выполняются с открытыми пазами ротора и надежны в эксплуатации; некоторого снижения потерь удастся достичь выбором открытия паза ротора, зазора маши-

ны. Другой путь – применение насыщенной обмотки; полуоткрытый паз такой обмотки решает проблему, но укладка такой обмотки в пазы ротора более трудоемка, чем катушечной.

Обмотка статора АСГ выполняется высоковольтной, поэтому она укладывается в открытые пазы. В этом случае в кривой поля статора неизбежно появление высших пазовых гармоник, которые также вызывают добавочные потери в активной стали и обмотках. В практике электромашиностроения для решения этой проблемы принимают меры, аналогичные мерам для открытых пазов ротора, но здесь появляются и дополнительные возможности: применение магнитных клиньев. Высшие пазовые гармоники в кривых статора и ротора вызывают искажение формы кривой напряжения АСГ, которая должна соответствовать нормам ГОСТ 183–74 или международным стандартам МЭК–34. С этой целью пазы выполняются со скосом. Такая практика широко используется в электромашиностроении, например, для дизельных генераторов малой и средней мощности [15, 16].

Высшие временные гармоники в кривой тока ротора являются также причиной искажения формы кривой напряжения АСГ. Эту проблему решает установка фильтров в контурах АСГ.

И.Ю. Середзинским и М.В. Чашко создали простую модель АСГ для исследования возможности получения постоянных значений частоты и напряжения от нестабильного источника механической энергии [18].

Имитационная модель электроустановки продемонстрирована на рис. 3.

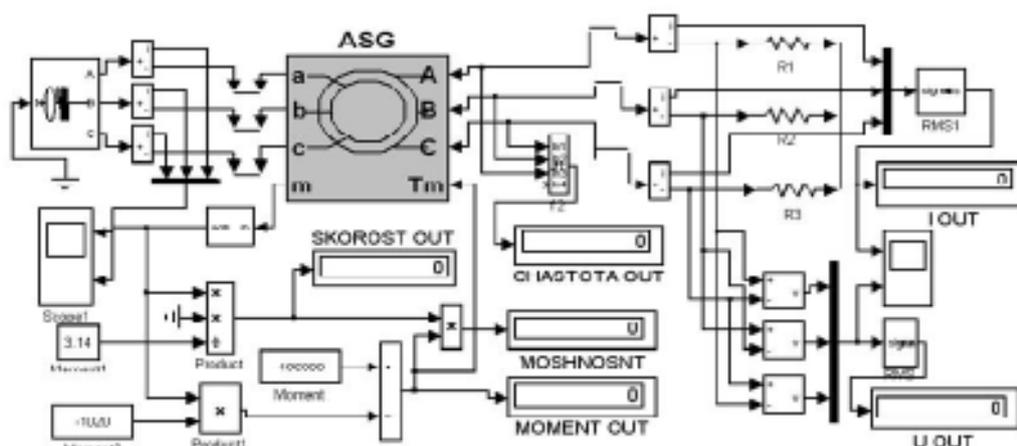


Рисунок 3 – Имитационная модель асинхронизированного синхронного генератора из библиотечных элементов *Simulink*

Виртуальная имитационная модель для определения характеристик генератора содержит машину двойного питания (асинхронизированный синхронный генератор) *ASG*, нагрузку, а также источник напряжения возбуждения. Имитационная модель машины двойного питания (трехфазной асинхронной машины с фазным ротором) из библиотеки *Simulink* принята в качестве АСГ, а библиотечный источник трехфазного напряжения – в качестве источника возбуждения. Электрическая нагрузка выполнена в виде резисторов.

Имитационная модель работает следующим образом. К ротору прикладывается момент, полученный как разность между заданным моментом и моментом, пропорциональным частоте вращения. Это дает возможность стабилизировать частоту вращения при изменении электрической нагрузки генератора. К трехфазной обмотке ротора прикладывается напряжение от трехфазного источника, так что в роторе создается вращающийся относительно ротора магнитный поток, который индуцирует в статоре электродвижущей силы. Частота и значение электродвижущей силы пропорциональны алгебраической сумме вращения магнитного потока относительно ротора и частот вращения ротора. Под действием электродвижущей силы через сопротивления нагрузки и обмотки статора проходит ток, которым энергия передается от генератора в нагрузку. Магнитный поток, созданный током нагрузки в обмотке статора, алгебраически складывается с магнитным потоком ротора, так что ЭДС в статоре создается потоком суммарным.

В.В. Чопик, В.М. Михальский, И.А. Шаповалов и В.М. Соболев разработали алгоритм управления машиной двойного питания с помощью двухступенчатого матричного преобразователя, включенного в роторную цепь. В отличие от преобразователя, где используются управляемый выпрямитель и инвертор, этот преобразователь обеспечивает прямое преобразование энергии с синусоидальными входными токами и коэффициентом мощности, близким к едини-

це. Выполнено моделирование работы системы генерирования электрической энергии на базе машины двойного питания [19].

Зарубежные ученые и студенты из разных университетов занимались в основном вопросами применимости асинхронизированных синхронных генераторов (машины двойного питания) в ветровых электрических станциях (ВЭС).

Wentao Guo, Feng Liu, Jennie Si, Dawei He, Ronald Harley, Shengwei Mei из университетов Китая и США разработали программное обеспечение для дополнительного контроля реактивной мощности асинхронизированным синхронным генератором на ВЭС [20].

Структурная схема АСГ представлена на рис. 4.

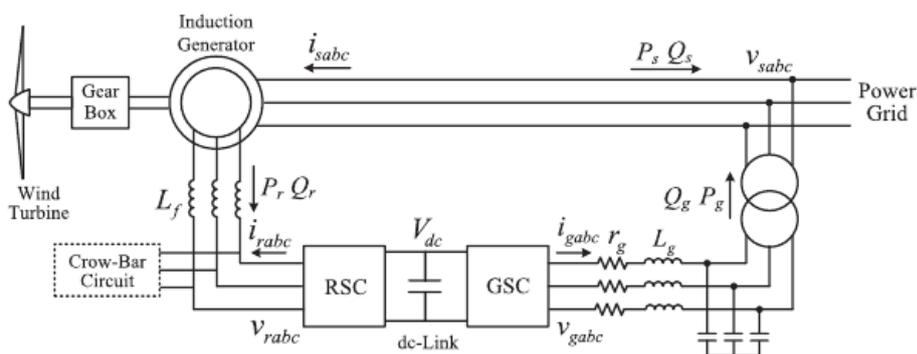


Рисунок 4 – Структурная схема АСГ

Ученые из университета Алжира Biskra S. Abdeddaim, A. Betka (Electrical Engineering Department, University of Biskra, Algeria) описали в своей статье оптимальный контроль скорости вращения и робастное регулирование мощности асинхронизированного синхронного генератора для ВЭС [21].

На рис. 5 представлена блок-схема системы АСГ – ВЭС.

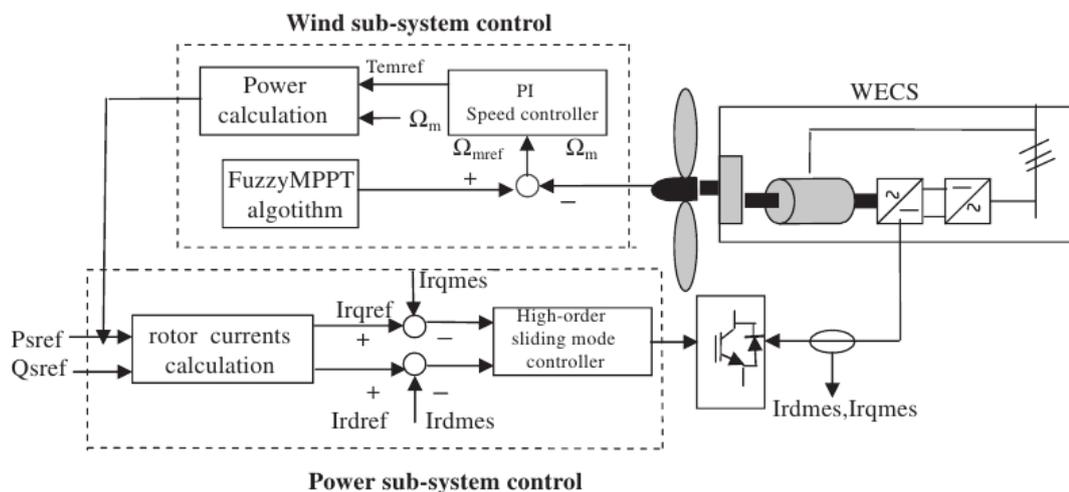


Рисунок 5 – Блок-схема системы АСГ – ВЭС

Блок-схема состоит из следующих подсистем:

– *Wind sub-system control* – подсистема управления воздушным потоком, которая включает в себя такие блоки, как: ПИ-регулятор скорости (*PI Speed controller*), алгоритм Фаззи регулятора (*FuzzyMPPT algorithm*), блок расчета мощности (*Power calculation*).

– *Power sub-system control* – подсистема управления активной и реактивной мощностью, которая включает в себя следующие блоки: блок расчета токов ротора (*rotor currents calculation*), блок регулятора режима скольжения старшего порядка (*High-order sliding mode controller*).

Ученые из Ирана М. Rahimi и М. Parniani описали в своей статье метод усовершенствования способности поддержания генераторного режима при провале напряжения сети асинхронизированного синхронного генератора [22].

Ученый из Ирана М. Farshadnia и ученый из Австралии S. A. Taher описали в своей статье контроль выдаваемой мощности АСГ при нестабильном уровне напряжения энергосистемы [23].

На рис. 6 представлена схема управления АСГ при нестабильном уровне напряжение энергосистемы.

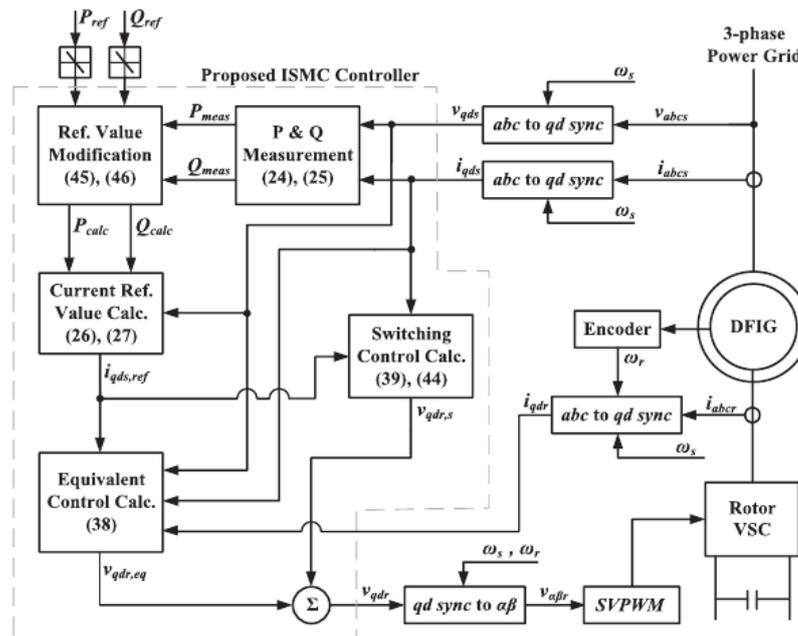


Рисунок 6 – Схема управления АСГ при нестабильном уровне напряжения энергосистемы

Ученые из Индии V. R.–R. Rudraraju, C. Nagamani, G. S. Pango разработали схему управления эффективности работы асинхронизированного синхронного генератора при низкой скорости потока воздуха с применением преобразователя частоты [24].

Ученые из разных университетов Алжира T. Ghennam, K. Aliouane, F. Akel, E.M. Berkouk и ученый из Франции B. Francois совместно разработали усовершенствованную систему управления асинхронизированного синхронного генератора для выработки реактивной мощности и интегрированных в диспетчерских управлениях на ВЭС [25].

Схема диспетчерского управления энергосистемой с использованием ветровых электрических станций, на которых установлены АСГ представлена на рис. 7.

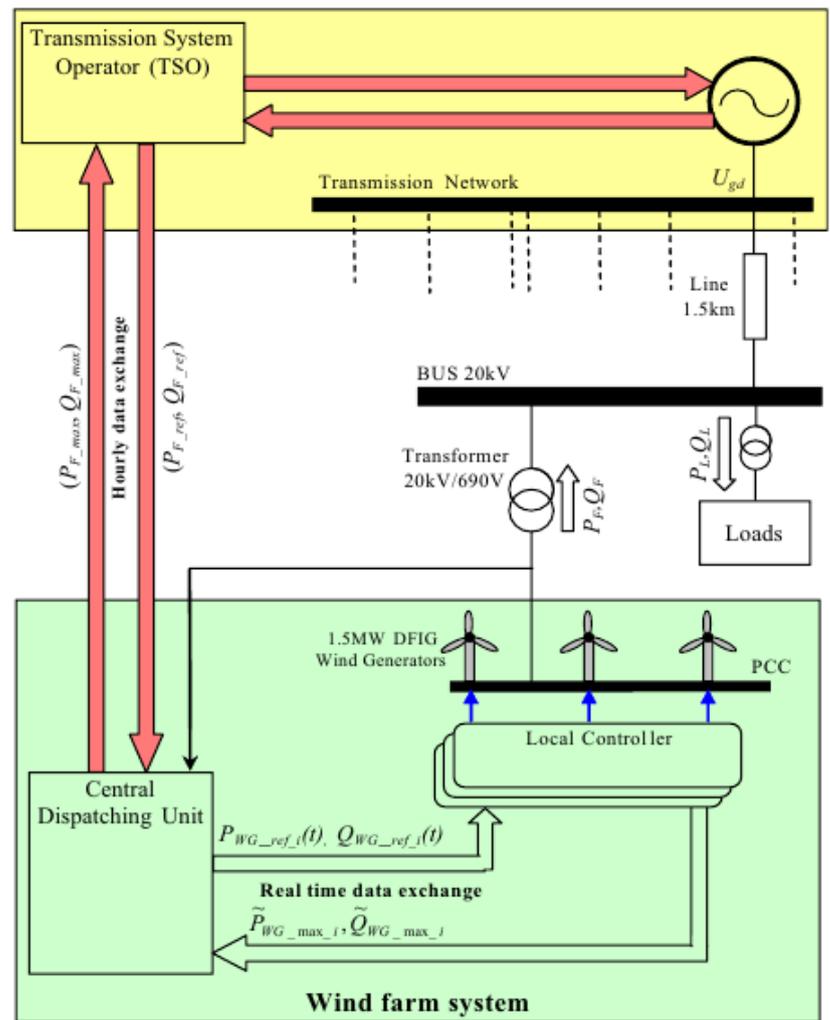


Рисунок 7 – Схема диспетчерского управления энергосистемой

Ученые из Китая Zh. Song, Ch. Xia, T. Shi рассматривали в своей работе переходный процесс АСГ при исчезновении напряжения ВЭС [26].

2 Объект и методы исследования

Объектом исследования является электромеханическая система: асинхронизированный синхронный генератор; преобразователь частоты с независимым источником напряжения; система управления; приводной механизм.

Главной задачей является получение стабильных значений напряжения на статорной обмотке асинхронизированного синхронного генератора при изменении скорости вращения приводного механизма, либо при изменении нагрузки.

В диссертационной работе при решении поставленной задачи использованы методы теории обобщенной электрической машины, математического моделирования, дифференциальных уравнений.

2.1 Теория обобщенной электрической машины

Обобщенная электрическая машина (ОЭМ) является математической моделью, описывающей процессы электромеханического преобразования энергии в электрических машинах как постоянного, так и переменного тока. Общим, объединяющим все электрические машины, является наличие воздушного зазора, в котором концентрируется магнитная энергия, и, в результате взаимодействия магнитных полей статора и ротора, создаются силы, приводящие в движение электрическую машину.

Следует отметить, что представленная на физическая модель обобщенной электрической машины является эталонной, и отличается от реальной электрической машины следующими допущениями:

- 1) ротор и статор имеют симметричные обмотки;
- 2) распределение магнитного поля каждой из обмоток вдоль окружности воздушного зазора машины считается синусоидальным;
- 3) не учитывается насыщение, гистерезис, а также вихревые токи в магнитопроводе;
- 4) не учитывается неоднородность магнитной проводимости, которая

обусловлена наличием пазов и неравномерностью воздушного зазора реальной электрической машины.

Практически электрические машины выполняют так, что распределение величины магнитного потока по окружности зазора близко к синусоидальному (рис. 8). Зная, что магнитный поток распределен по воздушному зазору синусоидально, для его определения достаточно знать его наибольшую величину (ψ_m) и положение в пространстве, которое определяется углом γ , относительно некоторой, индивидуально выбранной, системы координат. Следовательно, информацию о магнитном состоянии любой электрической машины (распределении магнитного потока) можно представить в виде вектора, модуль которого по величине равен ψ_m , а пространственное положение определено углом γ .

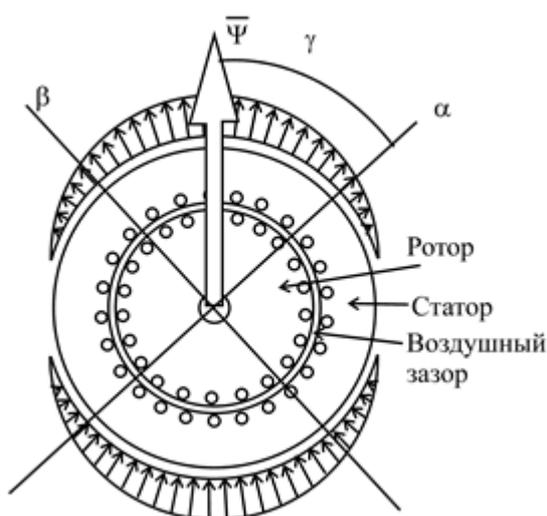


Рисунок 8 – Распределение напряженности магнитного поля в асинхронной машине

Подробно рассмотрим математическое описание ОЭМ. Для этого за основу примем физическую модель двухфазной электрической машины, продемонстрированной на рис. 9. Однако, здесь следует отметить, что обмотки ротора жестко связаны с ротором и поэтому вращаются относительно статора, в связи с чем, физическая модель представлена в двух не связанных между собой системах координат. Обмотки ротора при этом располагаются на осях координат неподвижных относительно ротора $d-q$, а обмотки статора располагаются на

осях координат неподвижных относительно статора α - β . Оси координат d - q и α - β располагаются под углом $\varphi_{эл}$, который меняется по мере вращения ротора относительно статора. $\varphi_{эл}$ - это электрический угол, который совпадает с реальным угловым положением между ротором и статором у электрической машины с одной парой полюсов и в P_{II} раз больше у многополюсных машин, где P_{II} - число пар полюсов. Эта разница возникает из-за того, что угол $\varphi_{эл}$ изменяется на 360° при прохождении ротора под одной парой полюсов. ЭДС наводимая в роторе при этом проходит один период, откуда и название – электрический угол.

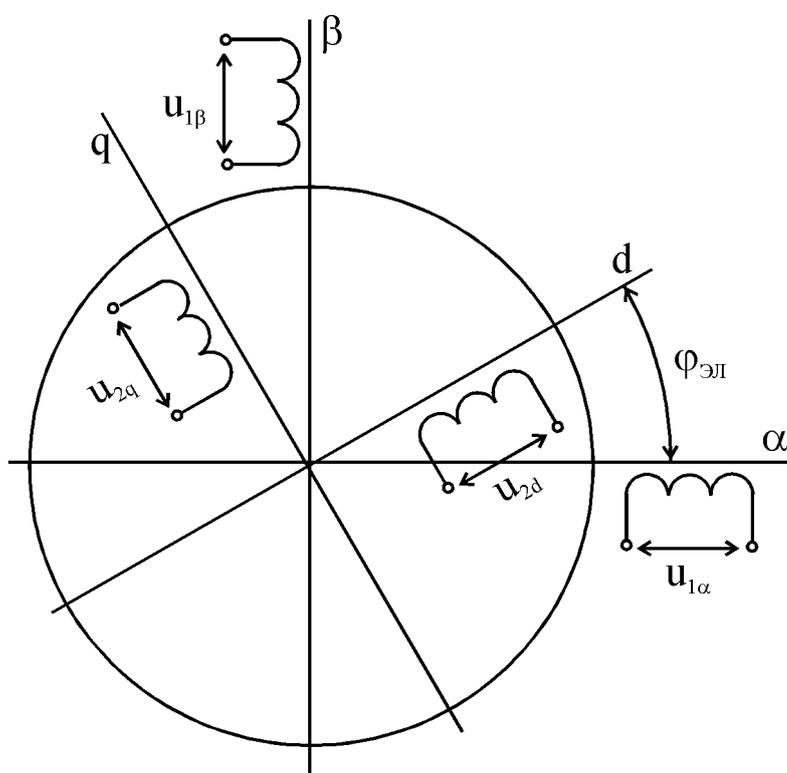


Рисунок 9 – Физическая модель обобщенной электрической машины

Учитывая все сказанное выше математическая модель ОЭМ имеет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} u_{1\alpha} &= i_{1\alpha} R_1 + \frac{d\psi_{1\alpha}}{dt}; \\ u_{1\beta} &= i_{1\beta} R_1 + \frac{d\psi_{1\beta}}{dt}; \\ u_{2d} &= i_{2d} R_2 + \frac{d\psi_{2d}}{dt}; \\ u_{2q} &= i_{2q} R_2 + \frac{d\psi_{2q}}{dt}. \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

Данная система уравнений описывает в каждой из обмоток электрическое равновесие. Напряжение, прикладываемое к обмотке, уравновешивается падением напряжения на активном сопротивлении соответствующей обмотки и ЭДС, которая возникает при изменении магнитного поля пронизывающего данную катушку. При этом ЭДС создается как за счет движения проводников обмотки относительно магнитного поля, так и за счет изменения магнитного поля по величине.

Следовательно, получена полная математическая модель ОЭМ. В этой модели обмотки статора и ротора находятся в разных системах координат. Это удобно для объяснения процессов, протекающих в ОЭМ, но не удобно для использования в практических приложениях. Для упрощенного процесса моделирования АСГ в программных комплексах воспользуемся моделью ОЭМ приведенной к одной системе координат. Рассмотрим наиболее важные моменты связанные с линейными координатными преобразованиями.

Прежде всего, линейные координатные преобразования позволяют существенно упростить математическую модель ОЭМ. Их используют для того, чтобы все электромагнитные переменные привести к одной системе координат. В результате получается математическая модель, у которой обмотки статора и ротора находятся на одних осях (рис. 10). Так как обмотки ОЭМ в этом случае остаются взаимно неподвижными, взаимные индуктивности между ними становятся постоянными, т.е. исключается нелинейность модели характеризующаяся зависимостью взаимных индуктивностей от угла поворота ротора машины.

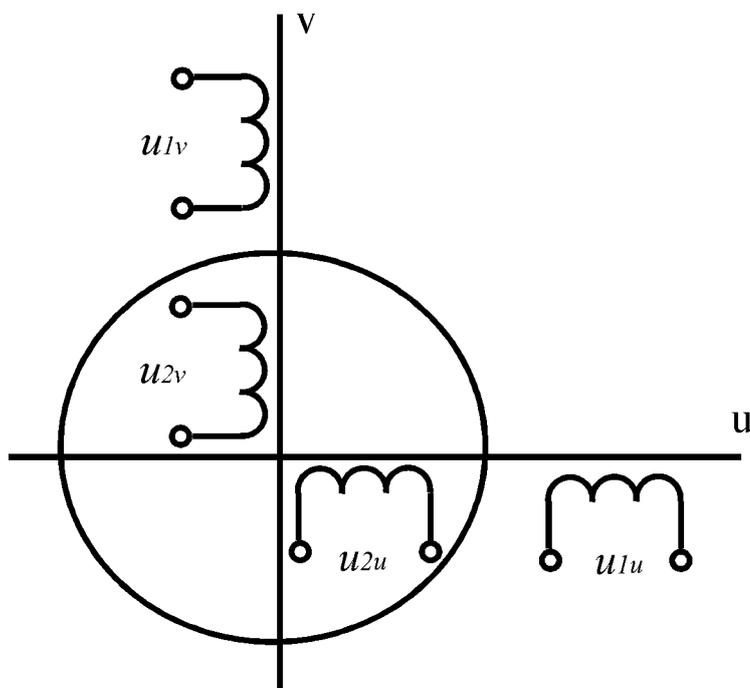


Рисунок 10 – ОЭМ приведенная к одной системе координат

Математическое описание ОЭМ для приведенной к одной, вращающейся с произвольной скоростью ω_k системе координат $u-v$, имеет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} u_{1u} &= i_{1u} R_1 + \frac{d\psi_{1u}}{dt} - \omega_k \psi_{1v}; \\ u_{1v} &= i_{1v} R_1 + \frac{d\psi_{1v}}{dt} + \omega_k \psi_{1u}; \\ u_{2u} &= i_{2u} R_2 + \frac{d\psi_{2u}}{dt} - (\omega_k - \omega_{эл}) \psi_{2v}; \\ u_{2v} &= i_{2v} R_2 + \frac{d\psi_{2v}}{dt} + (\omega_k - \omega_{эл}) \psi_{2u}. \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

В полученной системе уравнений справа добавляется дополнительное слагаемое. Оно получается в результате математических преобразований, но, тем не менее, имеет и физический смысл. Последний член уравнений отражает ЭДС вызванную вращением системы новой системы координат относительно реальных обмоток машины.

Потокосцепления для преобразованной модели определяются зависимостями:

$$\begin{aligned} \psi_{1u} &= L_1 i_{1u} + L_{12} i_{2u}; & \psi_{1v} &= L_1 i_{1v} + L_{12} i_{2v}; \\ \psi_{2u} &= L_2 i_{2u} + L_{12} i_{1u}; & \psi_{2v} &= L_2 i_{2v} + L_{12} i_{1v}. \end{aligned} \quad (2.3)$$

В нашем случае мы воспользуемся моделью ОЭМ приведенной к неподвижной системе координат α - β , $\omega_k = 0$:

$$\left. \begin{aligned} u_{1\alpha} &= i_{1\alpha} R_1 + \frac{d\psi_{1\alpha}}{dt}; \\ u_{1\beta} &= i_{1\beta} R_1 + \frac{d\psi_{1\beta}}{dt}; \\ u_{2\alpha} &= i_{2\alpha} R_2 + \frac{d\psi_{2\alpha}}{dt} + \omega_{эл} \psi_{2\beta}; \\ u_{2\beta} &= i_{2\beta} R_2 + \frac{d\psi_{2\beta}}{dt} - \omega_{эл} \psi_{2\alpha}. \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

2.2 Анализ требований, предъявляемых к генераторам автономных источников питания

Процесс развития машин автономных источников питания неразрывно связан с ужесточением предъявляемых к ним требованиям, что вызвано, как усложнением условий эксплуатации в отдаленных районах Сибири, так и требованиями к качеству генерируемой электроэнергии.

Функциональное назначение, особенности нагрузки и условия эксплуатации электрических машин автономных источников питания выдвигает ряд требований, которые могут быть сформулированы следующим образом [27, 28, 29]:

- соблюдение малых габаритных размеров и массы электрооборудования;
- высокий уровень надежности;
- бесперебойная работа АСГ при значительных внешних тепловых и механических нагрузках, а также при перегрузках по мощности в различных нейтральных и агрессивных средах с пониженным или повышенным давлени-

ем, возможность экономического регулирования в широких пределах выходного напряжения с высокой точностью;

- жесткость конструкций, минимальные аксиальные размеры и надежность работы подшипниковых узлов при размещении на одном валу двух и более машин;

- хорошие условия вентиляции и теплоотдачи;

- высокий уровень экономических, энергетических, эксплуатационных и других показателей;

- высокая стабильность выходного напряжения при значительной несимметрии и моментальных сбросах и набросах нагрузки;

- высокое качество вырабатываемой электроэнергии – синусоидальная форма кривой выходного напряжения, кратковременность протекания переходных электродинамических процессов;

- устойчивость систем регулирования напряжения при изменении в широких пределах нагрузки.

Электрические машины, которые использовались в автономных источниках питания до настоящего времени обладали рядом недостатков. Опишем их на примерах [27, 30, 31, 32].

1. В электрических машинах переменного тока с щеточным контактом и электромагнитным возбуждением при повышенном использовании активных материалов трудно получить высокую надежность, высококачественные характеристики электроэнергии и безотказное самовозбуждение.

Для устойчивой работы и самовозбуждения генераторов с регуляторами напряжения необходимы: малая мощность обмоток индуктора и узкая петля гистерезиса характеристики намагничивания; относительно большой остаточный поток (15 – 20 %), который обычно в этих машина не превышает 1 – 5 % рабочего потока возбуждения. Введение в магнитную часть участков из магнитной стали, существенно увеличивает мощность возбуждения и площадь петли гистерезиса, что в ряде случаев недопустимо. При этом увеличение остаточного потока оказывается недостаточным для самовозбуждения, которое обеспечива-

ет путем усложнения схем управления. В то же время для стабильной работы систем регулирования необходима нелинейность начального участка характеристики намагничивания, которая соответствует остаточному потоку, равному 15 – 20 % рабочего потока возбуждения [27, 30, 31, 32, 34].

2. Устойчивость выходного напряжения генераторов с электромагнитным возбуждением резко нарушается при несимметричном распределении электрической нагрузки между фазами и мгновенных ее изменениях, которые не могут быть устранены регуляторами напряжения. Для снижения моментальных изменений напряжения (провалов, всплесков) и явления несимметрии напряжений синхронные генераторы выполняют с низким уровнем линейной нагрузки, что значительно увеличивает их габаритные размеры и массу [27, 30, 31, 32, 33].

3. Бесконтактные синхронные генераторы с электромагнитным возбуждением обладают высокой надежностью и механической прочностью при работе на больших частотах вращения и имеют, примерно, в два раза большую массу, большие размеры по сравнению с аналогичными машинами с контактными кольцами и вращающимися обмотками и низкие электромагнитные характеристики [31, 33, 35, 36].

4. Синхронные машины с постоянными магнитами обладают безотказным самовозбуждением с высоким качеством электромагнитных характеристик, но не допускают непосредственного и экономичного регулирования напряжения, что ограничивает их применение в современных источниках питания [32, 33, 35, 36].

5. Применение бесконтактных источников питания определяет необходимость решения ряда дополнительных проблем, связанных с получением высокого уровня энергетических и электромагнитных показателей при минимальной массе систем электропитания, в том числе таких, как обеспечение высокой стабильности и синусоидальной формы кривой выходного напряжения при значительной несимметрии и мгновенных изменениях нагрузки, получение

низкого коэффициента пульсации выпрямленного напряжения, кратковременность протекания электромеханических переходных процессов [27, 33, 37].

6. При необходимости иметь некоторое количество автономных цепей питания, отличающихся родом тока, напряжениями и их стабильностью, автономным характером изменения нагрузок и пр., важным вопросом является разработка генератора с автономными цепями или рациональный выбор типов минимального числа генераторов регулирования напряжений [27, 31, 32].

Однако, можно сказать, что увеличение требований к электромеханическим комплексам без принятия специальных мер по их модернизации будет способствовать появлению непреодолимым трудностям при эксплуатации.

Эти плохо согласующиеся между собой требования существенно влияют на надежность и технологичность конструкций, на массу, габаритные размеры и специальные характеристики автономных источников питания в целом.

2.3 Способы возбуждения генераторов автономных систем

Для преобразования механической энергии в электрическую энергию переменного напряжения используются асинхронные и синхронные генераторы различных конструкций и типов.

До настоящего времени наибольшее распространение в автономных системах электроснабжения получили явнополюсные синхронные генераторы с контактными кольцами. Например, явнополюсные синхронные генераторы с электромагнитным возбуждением, обеспечивающие генерирование переменного тока промышленной частоты 50 Гц в диапазоне мощностей от 35 до 215 кВт имеют КПД 87 – 92 % и удельную массу – 7 – 12 кг/кВт [38, 39, 33, 35]. Однако стандартная конструкция синхронного генератора с контактными кольцами имеет ряд существенных минусов, главные из которых: необходимость в дополнительных устройствах для обеспечения возбуждения и ненадежная работа узла контактных колец. Кроме того, для включения синхронного генератора в

параллельную работу требуется дополнительная регулирующая и контролирующая аппаратура [40, 41].

Одно из направлений качественного улучшения характеристик автономных систем электроснабжения – внедрение и разработка бесконтактных электрических машин (ЭМ), обладающих повышенной надежностью, работающих с повышенными механическими и электромагнитными нагрузками, имеющих усовершенствованные малогабаритные и энергетические показатели, обладающих улучшенными эксплуатационными качествами и широким диапазоном допустимых окружающих условий.

Наиболее надежным и простым по конструкции бесконтактным генератором является асинхронный генератор. Применение асинхронных генераторов в основном сдерживалось по двум причинам: из-за сложности стабилизации выходного напряжения, а также вследствие отсутствия малогабаритных силовых генераторов, обеспечивающих возбуждение генератора и компенсацию реактивной мощности нагрузки. Разработанные в последние годы полипропиленовые пленочные твердопропитанные конденсаторы с удельной массой 0,10 – 0,20 кг/кВАр, современные устройства бесконтактного управления емкостью с использованием силовых быстродействующих полупроводниковых ключей, а также достижения в развитии микроэлектроники, применяемой в системах управления и контроля, практически снимают ограничения по использованию асинхронных генераторов в АСЭ, выполняемых на базе высокоскоростных приводных двигателей [38, 39, 42, 43]. При частотах вращения 18000-24000 об/мин асинхронные генераторы с конденсаторным возбуждением, работающие на непосредственный преобразователь частоты, имеют лучшие энергетические и массогабаритные показатели, чем синхронные генераторы [36, 30, 31, 44]. Однако асинхронные генераторы практически лишаются основных достоинств, по сравнению с синхронными генераторами при использовании в генераторном режиме асинхронный двигатель (АД) промышленного исполнения – такие машины имеют низкий коэффициент полезного действия, относительно большую массу и габариты. При работе в генераторном режиме им свойственны круто-

падающие внешние характеристики [31, 45]. Поэтому, необходимо специально проектировать асинхронную машину для работы в генераторном режиме на высоких частотах вращения ротора.

Среди бесконтактных синхронных генераторов распространение получили машины с вращающимся выпрямителем, реализованные в широком диапазоне мощностей от 1 до 10^6 кВт. При этом они имеют удельную массу 3,60 – 18 кг/кВт в зависимости от установленной мощности, а КПД находится в пределах от 32 до 95 %. Наиболее компактные синхронные генераторы с вращающимися выпрямителями разработаны и внедрены для авиационных систем энергоснабжения. При мощностях 30 – 120 кВА и частотах вращения 6000 – 9000 об/мин они имеют удельную массу 0,72 – 1,26 кг/кВА [31, 39, 42, 45].

В качестве возбудителя для СГ с вращающимися выпрямителями можно использовать, так называемый вращающийся трансформатор, а также асинхронные и синхронные вращающиеся возбудители [31].

Системы возбуждения генераторов автономных энергетических систем должны характеризоваться: полной автономностью – начальное возбуждение обеспечивается исключительно за счет внутренних источников; простотой и эффективностью схемотехнических и конструкторских решений, обеспечивающих высокую надежность и хорошие массогабаритные показатели; техническими характеристиками, удовлетворяющими самым жестким нормативно-техническим требованиям.

2.4 Выбор математического пакета

Стремление повысить надежность электрических сетей и средств управления ими устанавливает более высокие требования к точности моделирования аварийных режимов и вызывает необходимость совершенствования технических средств вычислений.

Современные компьютерные системы позволяют реализовывать достаточно совершенные алгоритмы вычислений, а точность моделирования процес-

сов в этих условиях во многом определяется достоверностью и точностью исходных данных, основу которых составляют параметры моделей электрических сетей.

Внедрение и разработка различных технологических комплексов требует значительного всестороннего анализа. Моделирование, как известно, является основным инструментом для принятия обоснованных и своевременных решений.

Представленные выше уравнения генераторов являются нелинейными, поэтому для их решения целесообразно использовать численный метод решения. Сложность математического описания процессов в объектах автономной энергетики требует или использования уже существующих универсальных программных комплексов (пакетов), или создания специальных прикладных программ. Поскольку создание специальных прикладных программ по исследованию автономных систем электроснабжения требует высокой квалификации программиста и значительных затрат времени, более приемлемым вариантом является применение универсальных программных комплексов.

Существует несколько программных продуктов, которые позволяют составлять схемотехническое моделирование электротехнического объекта, сокращая при этом время моделирования.

Приведем краткую характеристику таких программных комплексов.

APLAC 8.1 – предназначена для проектирования и моделирования систем и электрических схем во временной и частотной областях. Выполняются следующие виды расчетов: режим по постоянному току, частные характеристики, чувствительность и параметрическая оптимизация, спектральная плотность и коэффициент шума, спектры сигналов, переходные процесс, анализ периодических режимов, статический анализ по методу Монте-Карло. Подобные расчеты производятся обычно с помощью нескольких разных программ, а все перечисленные расчеты доступны в одной. Другая важная отличительная черта программы – наличие большого выбора библиотек элементов отдельных блоков и

принципиальных схем, применяемых в цифровых и аналоговых системах связи.

На рис. 11 показано окно для моделирования электрических систем и сетей.

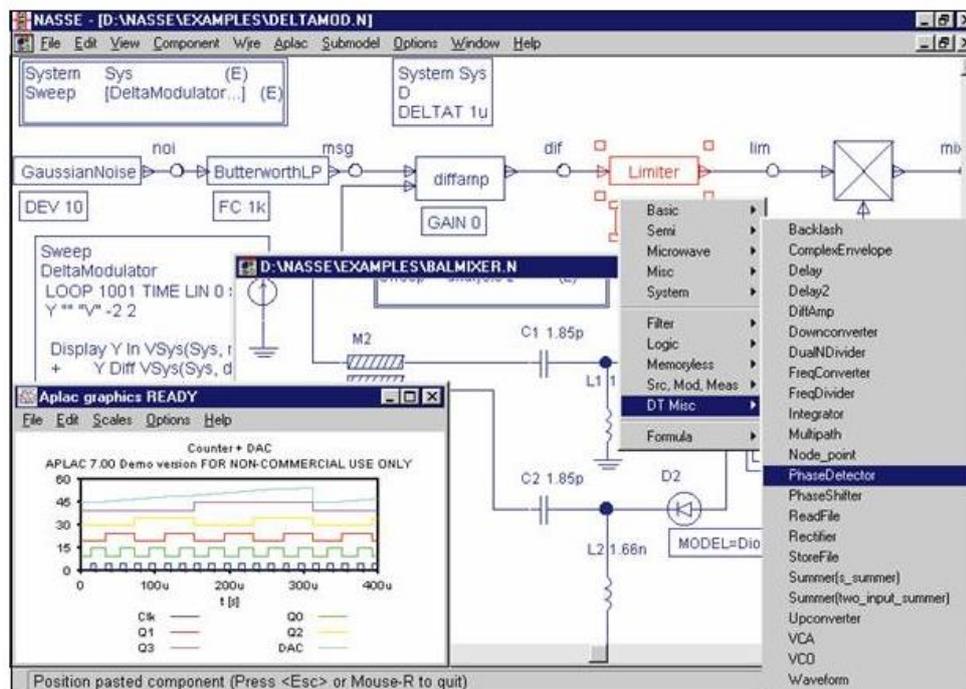


Рисунок 11 – Окно APLAC 8.1

DesignLab 8.1 – интегрированный программный комплекс корпорации MicroSim для сквозного проектирования цифровых, аналоговых и смешанных аналого-цифровых устройств, синтеза устройства программируемой логики и аналоговых фильтров. Проектирование начинается с ввода принципиальной формы, ее моделирования, а также оптимизации и заканчивается созданием управляемых файлов в специальном формате *JEDEC* для программистов, разработкой печатной платы и выводов управляющих файлов для фотоплоттеров и сверлильных станков. В системе используется известная система комплексного моделирования *PSpice*.

Electronic Workbench 5.12 – представляю собой виртуальную лабораторию с достаточно широкими возможностями, которая содержит достаточно обширную библиотеку различных электронных элементов. На экране изображаются измерительные приборы с органами управления, максимально приближенными к реальным. Сотрудник освобождается от изучения достаточно абстрактных (хотя и очень простых) правил составления заданий на моделирова-

ние. Программа позволяет пересчитывать режим по постоянному току, анализировать переходные процессы, а также производить линейризацию нелинейных элементов и затем проводить расчет характеристик расчетной области и схемы.

На рис. 12 показано окно *Electronic Workbench 5.12* для проектирования электрических схем.

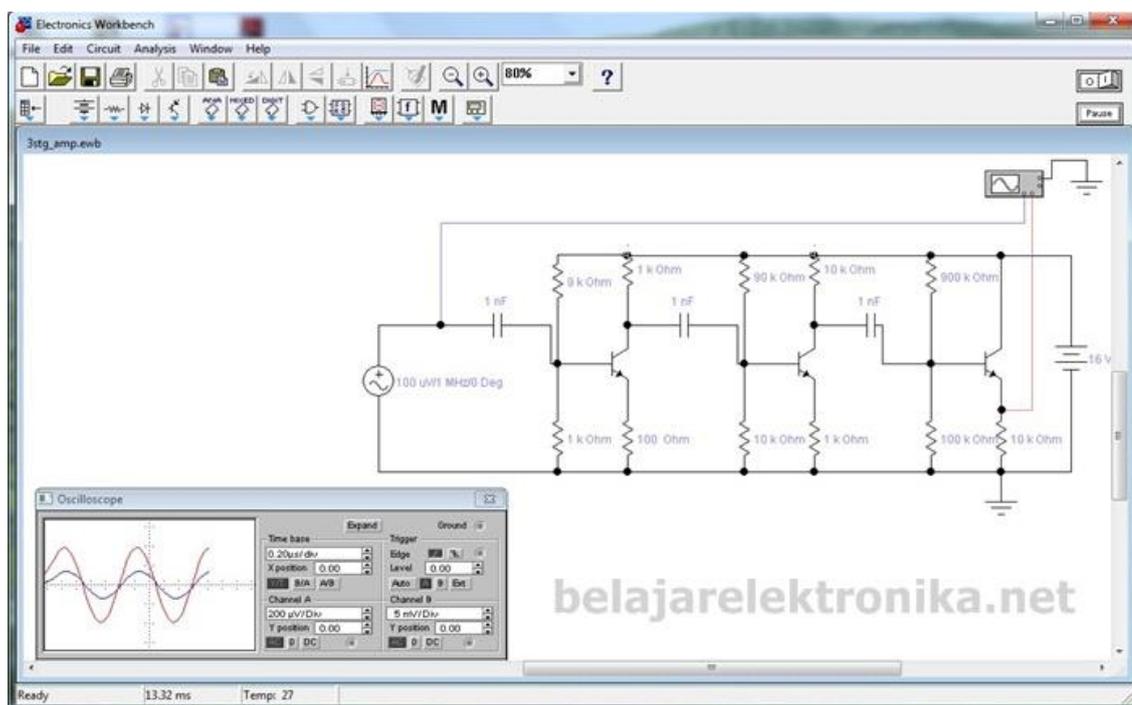


Рисунок 12 – Окно *Electronic Workbench 5.12*

Элитная система программирования компьютерной математики – *Matlab 2013a* позволяет инженерам-энергетикам и ученым легко и успешно реализовать свои идеи и получать практические результаты, а также навыки в программировании. Один из самых эффективных и мощных инструментов для создания различных программных комплексов, предназначенных для решения научно-технических задач. Одним из самых важных и по достоинству оцененных качеств системы *Matlab* является возможность ее модификации с целью решения всё новых и новых научно-технических задач, которые в изобилии появляются благодаря прогрессу в науке, технике и образовании. Это достигается, прежде всего, созданием целого ряда пакетов расширения системы, охватыва-

ющих многие новые и практические полезные направления компьютерной математики. На рис. 13 показано главное окно *Matlab 2013a*.

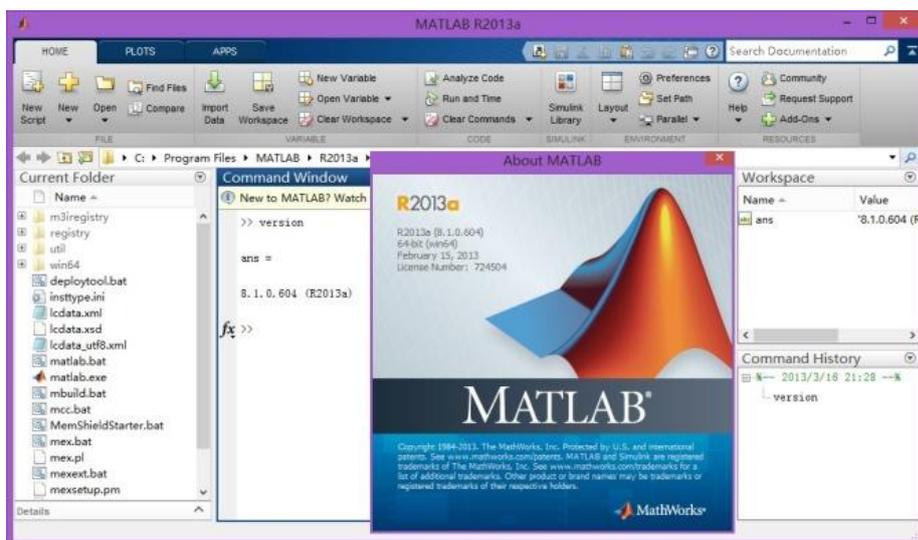


Рисунок 13 – Главное окно *Matlab 2013a*

Пакет *Simulink*, созданный на основе системы *Matlab*, предоставляет самые различные возможности, начиная от структурного (математического) представления системы и заканчивая генерированием кодов для программирования различных микропроцессоров в соответствии со структурной схемой имитационной модели. В нем реализованы принципы визуально-ориентировочного программирования, что позволяет легко набирать необходимые блоки и соединять их с целью составления имитационной модели анализируемого устройства или какой-либо системы. При этом сложнейшие уравнения состояния, описывающие работу моделей, формируются автоматически. По удобству графического пользовательского интерфейса, обилию имитационных моделей (блоков) компонентов во множестве библиотек, визуализации результатов моделирования и разнообразию виртуальных средств регистрации и, самое главное, по их надежности и достоверности пакет *Simulink* выгодно отличается от множества других программных комплексов подобного назначения.

На рис. 14 показано окно *Simulink* для моделирования сложных электро-механических систем.

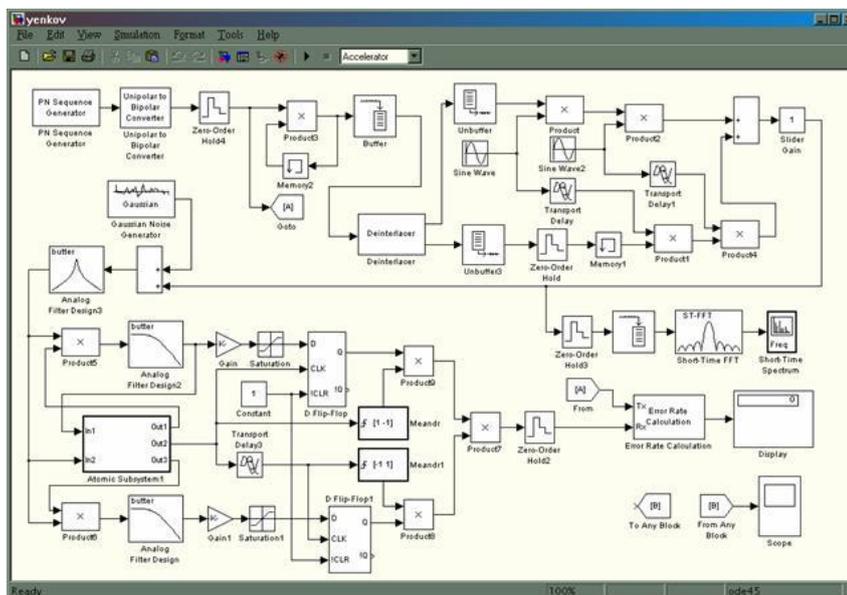


Рисунок 14 – Окно *Simulink* для моделирования сложных электромеханических систем

MicroCap 11.0 – предназначена для моделирования цифровых, аналоговых и аналого-цифровых устройств. Программный комплекс содержит многостраничный графический редактор принципиальных схем, способен выполнять поведенческое моделирование цифровых и аналоговых компонентов, предоставляет возможность описания цифровых компонентов с помощью логических выражений. В сочетании с библиотекой графических символов типовых операций позволяет моделировать динамические системы, заданные не только принципиальными, но функциональными схемами. *MicroCap* включает в себя большую библиотеку компонентов. Системой выполняется многовариантный анализ при вариации параметров и статический анализ по методу Монте-Карло. Кроме того, имеется специальная программа *MODEL* для расчета параметров математических моделей аналоговых компонентов по справочным или экспериментальным данным.

На рис. 15 представлено окно *MicroCap* для проектирования электрических схем.

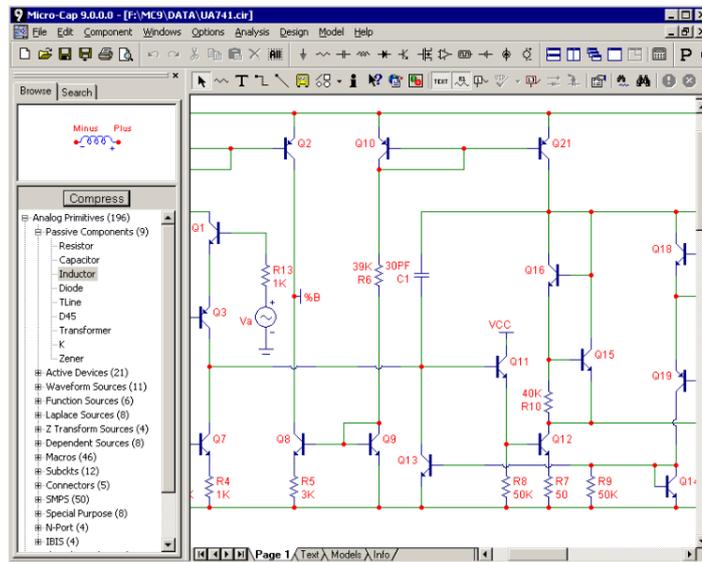


Рисунок 15 – Окно *MicroCap* для проектирования электрических схем

OrCAD 16.6 – объединяет в себе возможность синтеза, анализа, конструирования и расчета электронных схем и обладающий к тому же очень обширной библиотекой электронных компонентов. Позволяет проводить анализ электронных блоков, осуществлять проектирование печатных плат для разработанной и проанализированной электронной схемы, позволяет производить синтез программируемых логических интегральных схем.

На рис. 16 представлено окно *OrCAD* для проектирования электрических схем.

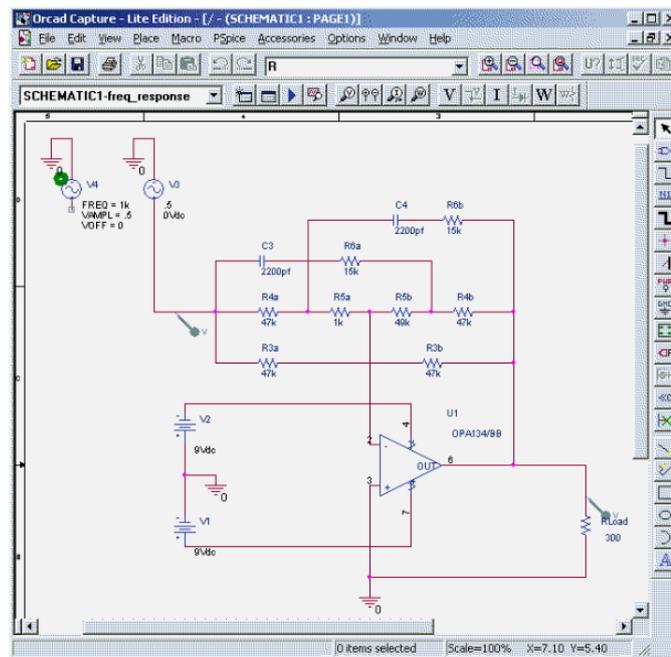


Рисунок 16 – Окно *OrCAD* для проектирования электрических схем

Использование любого программного обеспечения подразумевает соблюдение определенного алгоритма выполнения поставленной задачи. В любом пакете схемотехнического моделирования требуется выбрать электронными элементами и соединить их согласно принципиальной схеме исследуемой установки, то есть создать условия для начала моделирования. После составления схемы появляется возможность исследовать поведение схемы вложенными в пакет математическими методами. Каждый пакет предусматривает определенную стратегию исследования особенностей функционирования системы во времени при различных параметрах, как самой системы, так и внешней среды.

Для исследования в номинальных режимах во всех пакетах требуется создать схему, состоящую из элементов, имеющихся в библиотеке компонентов, задать параметры для расчета и провести необходимый анализ. Для исследования поведения системы в нештатных режимах необходимы элементы, позволяющие имитировать короткие замыкания и обрывы элементов схемы.

На основании вышеизложенного описания различных программных комплексов был выбран программный продукт *Matlab 2013a*, в состав которого входит пакет визуального моделирования *Simulink*. В отличие от других пакетов схемотехнического моделирования, где приходится создавать свою модель, используя специальный язык программирования, пакет *Matlab 2013a* с высокой степенью точности позволяет моделировать электрические системы, а также достаточно просто создавать собственные блок-элементы и подсистемы.

3 Расчеты и аналитика

3.1 Расчет параметров схемы замещения Асинхронизированного синхронного генератора

За основу возьмем расчет асинхронного двигателя АИР100L4

3.1.1 Исходные данные

- Мощность двигателя – $P_n = 4 \text{ кВт}$,
- Синхронная частота вращения – $n_o = 1500 \text{ об/мин}$,
- Номинальная частота вращения двигателя – $n_o = 1410 \text{ об/мин}$,
- Коэффициент полезного действия двигателя при нагрузке:
- $\eta_{100,75} = 85 \%$,
- Коэффициент мощности двигателя при нагрузке:
- $\cos \varphi_{100,75} = 0,85 \text{ о.е.}$,
- Ток двигателя при напряжении 380 В – $I_o = 8,40 \text{ А}$,
- Кратность пускового тока - $I_{\text{пуск}}/I_n = k_i = 7 \text{ о.е.}$,
- Кратность пускового момента - $M_{\text{пуск}}/M_n = k_n = 2,10 \text{ о.е.}$,
- Кратность максимального момента - $M_{\text{max}}/M_n = k_{\text{max}} = 2,40 \text{ о.е.}$,
- Момент инерции - $J = 0,013 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$,
- Масса двигателя – 29 кг,
- Класс энергоэффективности - $IE = 1$,
- Количество фаз - $m = 3$,
- Номинальное фазное напряжение - $U_{1n} = 220 \text{ В}$,
- Номинальное напряжение сети - $U_{\text{фн}} = 380 \text{ В}$,
- Номинальное скольжение двигателя - $s_n = 0,06 \text{ о.е.}$,
- Коэффициент загрузки двигателя - $p_* = 0,75 \text{ о.е.}$,
- Число пар полюсов двигателя - $p = 2$.

3.1.2 Определение параметров схемы замещения асинхронного двигателя по справочным данным

Математическая модель асинхронного двигателя может быть представлена различными схемами замещения. Наиболее простой и удобной для расчетов асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором является T-образная схема замещения, представленная на рис. 17.

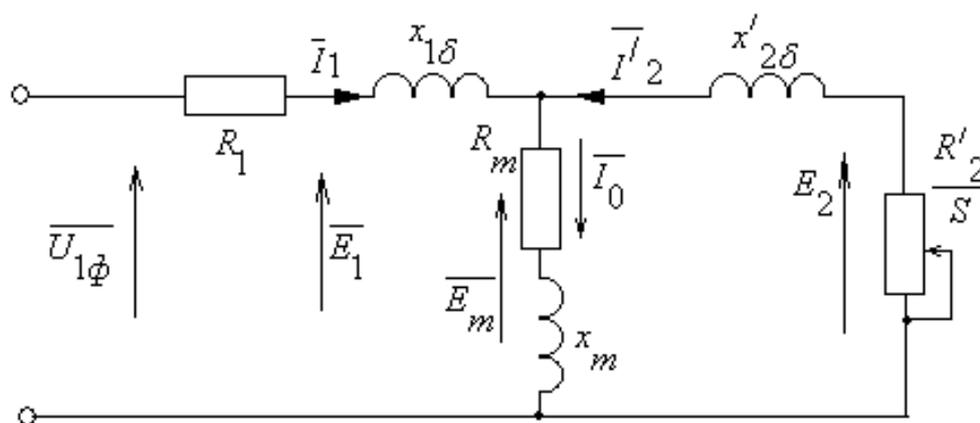


Рисунок 17 - T-образная схема замещения асинхронного двигателя

($\overline{U}_{1\phi}$ – фазное напряжение подводимое к обмотке статора двигателя, \overline{I}_1 – ток обмотки статора, R_1 – активное сопротивление обмотки статора, $x_{1\delta}$ – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора, \overline{I}_2 – приведенный ток обмотки ротора к обмотке статора, R'_2 – приведенное активное сопротивление цепи обмотки ротора к цепи обмотке статора, $x'_{2\delta}$ – приведенное индуктивное сопротивление рассеяния цепи обмотки ротора к цепи обмотке статора, \overline{I}_0 – ток холостого хода (намагничивания), x_m – индуктивное сопротивление контура намагничивания).

Основные уравнения асинхронного двигателя, соответствующие данной схеме:

$$\overline{E}_m + j \cdot x'_{2\delta} \cdot \overline{I}_2 + R'_2 \cdot \overline{I}_2 / s = 0 \quad (3.1)$$

$$\overline{U}_{1\phi} - \overline{E}_m - j \cdot x_{1\delta} \cdot \overline{I}_1 - R_1 \cdot \overline{I}_1 = 0 \quad (3.2)$$

$$\overline{I}_1 + \overline{I}_2 - \overline{I}_0 = 0 \quad (3.3)$$

Векторная диаграмма токов, ЭДС и напряжений изображена на рис. 18.

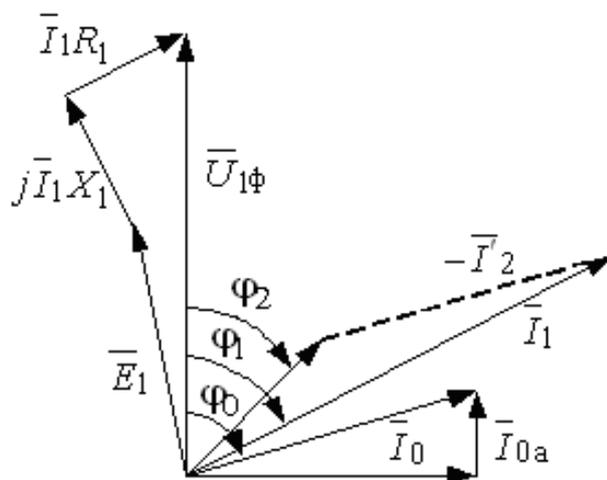


Рисунок 18 – Векторная диаграмма асинхронного двигателя

Ток холостого хода асинхронного двигателя определяется по формуле:

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{1n}^2 - [p_* \cdot I_{1n} (1 - s_n) / (1 - p_* \cdot s_n)]^2}{1 - [p_* \cdot (1 - s_n) / (1 - p_* \cdot s_n)]^2}}, \quad (3.4)$$

где I_{1n} - номинальный ток статора двигателя, А;

I_{11} - ток статора двигателя при частичной нагрузке, А.

$$I_{1n} = \frac{P_n}{m \cdot U_{1n} \cdot \cos \varphi_n \cdot \eta_n}, \quad (3.5)$$

$$I_{1n} = \frac{4000}{3 \cdot 220 \cdot 0,85 \cdot 0,85} = 8,39 \text{ А}$$

$$I_{11} = \frac{p_* \cdot P_n}{m \cdot U_{1n} \cdot \cos \varphi_{p_*} \cdot \eta_{p_*}}, \quad (3.6)$$

где $\cos \varphi_{p_*}$ - коэффициент мощности при частичной нагрузке,
 $\cos \varphi_{p_*} = 0,99 \cdot \cos \varphi_n = 0,99 \cdot 0,85 = 0,842 \text{ о.е.};$

$\eta_{p_*} = \eta_{n(75\%)} = 0,85 \text{ о.е.}$ - КПД при частичной нагрузке.

$$I_{11} = \frac{0,75 \cdot 4000}{3 \cdot 220 \cdot 0,842 \cdot 0,85} = 6,35 \text{ А}$$

Тогда ток холостого хода асинхронного двигателя будет равен:

$$I_0 = \sqrt{\frac{6,35^2 - [0,75 \cdot 8,39 \cdot (1 - 0,06) / (1 - 0,75 \cdot 0,06)]^2}{1 - [0,75 \cdot (1 - 0,06) / (1 - 0,75 \cdot 0,06)]^2}} = 2,12 \text{ А}$$

Из формулы Клосса определим выражение для расчета критического скольжения:

$$s_k = s_H \cdot \frac{k_{max} + \sqrt{k_{max}^2 - [1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (k_{max} - 1)]}}{1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (k_{max} - 1)}, \quad (3.7)$$

Значение коэффициента β , согласно [?], находится в диапазоне $0,6 \div 2,5$.

Принимаем $\beta = 1$.

$$s_k = 0,06 \cdot \frac{2,40 + \sqrt{2,40^2 - [1 - 2 \cdot 0,06 \cdot 1 \cdot (2,40 - 1)]}}{1 - 2 \cdot 0,06 \cdot 1 \cdot (2,40 - 1)} = 0,33 \text{ о.е.}$$

Определим значения коэффициентов:

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1H}}, \quad (3.8)$$

$$C_1 = 1 + 8,39 = 1,018 \text{ о.е.}$$

$$A_1 = \frac{m \cdot U_{1H}^2 \cdot (1 - s_H)}{2 \cdot C_1 \cdot k_{max} \cdot P_H}, \quad (3.9)$$

$$A_1 = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot (1 - 0,06)}{2 \cdot 1,01 \cdot 2,40 \cdot 4000} = 6,98 \text{ о.е.}$$

Найдем активное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора асинхронного двигателя:

$$R_2' = \frac{A_1}{(\beta + 1/s_k) \cdot C_1}, \quad (3.10)$$

$$R_2' = \frac{6,98}{(1 + 1/0,33) \cdot 1,018} = 1,714 \text{ Ом}$$

Определим активное сопротивление обмотки статора:

$$R_1 = C_1 \cdot R_2' \cdot \beta, \quad (3.11)$$

$$R_1 = 1,018 \cdot 1,714 \cdot 1 = 1,745 \text{ Ом}$$

Определим параметр γ , который позволяет найти индуктивное сопротивление короткого замыкания X_{KH} :

$$\gamma = \sqrt{(1/s_k^2) - \beta^2}, \quad (3.12)$$

$$\gamma = \sqrt{(1/0,33^2) - 1^2} = 2,83 \text{ о.е.}$$

Тогда

$$X_{кн} = \gamma \cdot C_1 \cdot R_2', \quad (3.13)$$

$$X_{кн} = 2,83 \cdot 1,018 \cdot 1,714 = 4,94 \text{ Ом}$$

Найдем индуктивное сопротивление рассеяния фазы роторной обмотки, приведенное к статорной:

$$x'_{2\delta n} = 0,58 \cdot X_{кн} / C_1, \quad (3.14)$$

$$x'_{2\delta n} = 0,58 \cdot 4,94 / 1,018 = 2,81 \text{ Ом}$$

Найдем индуктивное сопротивление рассеяния фазы статорной обмотки:

$$x_{1\delta n} = 0,42 \cdot X_{кн}, \quad (3.15)$$

$$x_{1\delta n} = 0,42 \cdot 4,94 = 2,074 \text{ Ом}$$

По найденным значениям C_1 , R_2' и $X_{кн}$ определим критическое скольжение:

$$s_{k1} = \frac{C_1 \cdot R_2'}{\sqrt{R_1^2 + X_{кн}^2}}, \quad (3.16)$$

$$s_{k1} = \frac{1,018 \cdot 1,714}{\sqrt{1,745^2 + 4,94^2}} = 0,33 \text{ о.е.}$$

Рассчитанные значения $s_{k1} = s_k = 0,33 \text{ о.е.}$ равны.

ЭДС ветви намагничивания E_m , наведенная потоком воздушного зазора в обмотке статора в номинальном режиме, равна

$$E_m = \sqrt{(U_{1n} \cdot \cos \varphi_n - R_1 \cdot I_{1n})^2 + (U_{1n} \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_n} - x_{1\delta n} \cdot I_{1n})^2}, \quad (3.17)$$

$$E_m = \sqrt{(220 \cdot 0,85 - 1,745 \cdot 8,39)^2 + (220 \cdot \sqrt{1 - 0,85^2} - 2,074 \cdot 8,39)^2} = 198,52 \text{ В}$$

Тогда индуктивное сопротивление контура намагничивания будет равно

$$X_{\mu n} = \frac{E_m}{I_0}, \quad (3.18)$$

$$X_{\mu n} = \frac{198,52}{2,12} = 93,82 \text{ Ом}$$

Определим синхронную угловую скорость двигателя

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30}, \quad (3.19)$$

$$\omega_0 = \frac{3,1415 \cdot 1500}{30} = 157,08 \text{ рад/с}$$

При использовании в процессе моделирования в программном комплексе Matlab асинхронного двигателя применяют следующий блок: «Блок параметров: Асинхронная машина (*Block Parameters: Asynchronous Machine SI Units*)». Данный блок представлен на рис. 19. Запишем параметры, которые необходимо занести в блок:

- ❖ Номинальная мощность двигателя (*Nominal power*) - $P_n = 4000 \text{ Вт}$;
- ❖ Номинальное напряжение (*Nominal voltage*) - $U_{1n} = 220 \text{ В (Vrms)}$;
- ❖ Номинальная частота сети (*Nominal frequency*) - $f = 50 \text{ Гц (Hz)}$;
- ❖ Активное сопротивление обмотки статора (*Stator resistance*) - $R_1 = 1,745 \text{ Ом} (R_s, \text{ohm})$;
- ❖ Индуктивность статорной обмотки (*Stator inductance*) - $L_1 = \frac{x_{1\delta n}}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{2,074}{2 \cdot 3,1415 \cdot 50} = 0,006606 \text{ Гн} (L_{1s}, \text{H})$;
- ❖ Активное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора асинхронного двигателя (*Rotor resistance*) - $R_2' = 1,714 \text{ Ом} (R_r', \text{ohm})$;
- ❖ Индуктивность роторной обмотки (*Rotor inductance*) - $L_2 = \frac{x_{2\delta n}'}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{2,814}{2 \cdot 3,1415 \cdot 50} = 0,008961 \text{ Гн} (L_{1r}', \text{H})$;
- ❖ Индуктивность контура намагничивания (*Mutual inductance*) - $L_{\mu n} = \frac{X_{\mu n}}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{93,82}{2 \cdot 3,1415 \cdot 50} = 0,299 \text{ Гн} (L_m, \text{H})$;
- ❖ Число пар полюсов двигателя (*Pole pairs*) - $p = 2$.

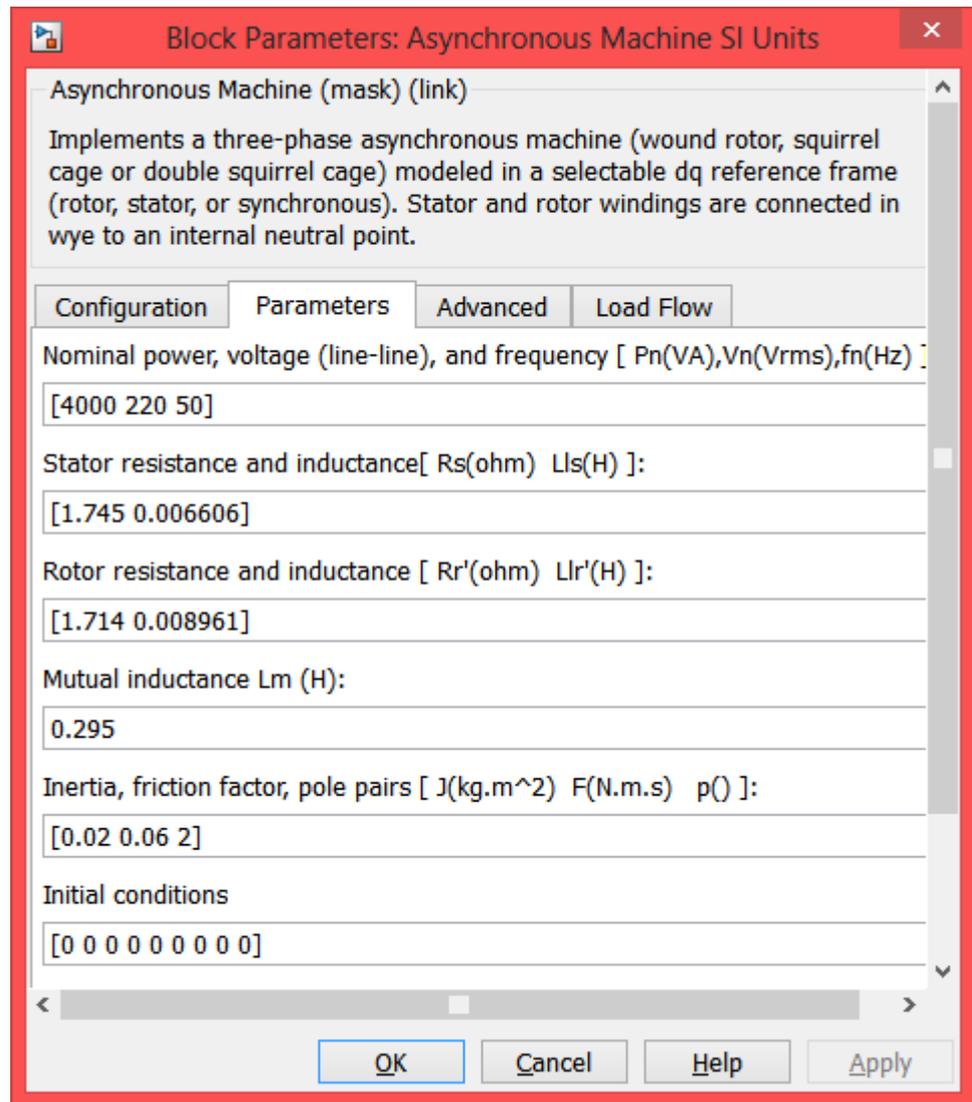


Рисунок 19 - Блок параметров: Асинхронная машина

3.2 Разработка алгоритмов управления асинхронизированным синхронным генератором

Запишем условие работы системы:

$$\begin{aligned}
 U_a - U_a^* &= 0, \\
 U_b - U_b^* &= 0, \\
 U_c - U_c^* &= 0.
 \end{aligned}
 \tag{3.20}$$

где U^* – заданное значение.

$$\begin{aligned}
U_a^* &= U_{ma} \sin(314 \cdot t), \\
U_b^* &= U_{mb} \sin\left(314 \cdot t + \frac{3\pi}{2}\right), \\
U_c^* &= U_{mc} \sin\left(314 \cdot t - \frac{3\pi}{2}\right).
\end{aligned}
\tag{3.21}$$

Как уже было сказано выше, АСГ будем рассматривать в двухфазной системе координат на основе модели ОЭМ (рис. 20).

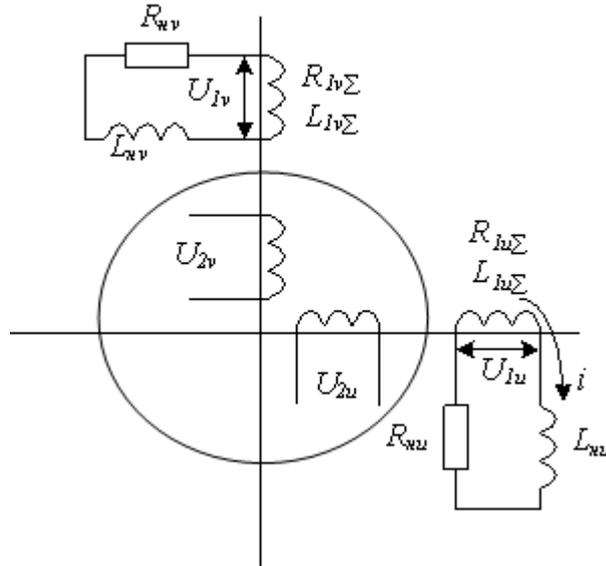


Рисунок 20 – АСГ в двухфазной системе координат на основе модели ОЭМ

Математическую модель асинхронизированного синхронного генератора как объекта управления будем рассматривать в виде двухфазной модели обобщенной электрической машины:

$$\begin{aligned}
U_{1v} &= i_{1u} R_1 + \frac{d\Psi_{1u}}{dt} + \omega_k \Psi_{1v}, \\
U_{1u} &= i_{1v} R_1 + \frac{d\Psi_{1v}}{dt} - \omega_k \Psi_{1u}, \\
U_{2v} &= i_{1v} R_1 + \frac{d\Psi_{2v}}{dt} + (\omega_k - \omega) \Psi_{2u}, \\
U_{2u} &= i_{1u} R_1 + \frac{d\Psi_{2u}}{dt} - (\omega_k - \omega) \Psi_{2v}.
\end{aligned}
\tag{3.22}$$

Используя фазные преобразования цель управления примет вид:

$$\begin{aligned}
U_{1u} - U_{1u}^* &= 0, \\
U_{1v} - U_{1v}^* &= 0.
\end{aligned}
\tag{3.23}$$

где

$$\begin{aligned} U_{1u}^* &= U_{mu} \sin(\omega_3 t), \\ U_{1v}^* &= U_{mv} \sin\left(\omega_3 t - \frac{\pi}{2}\right). \end{aligned} \quad (3.24)$$

Для синтеза алгоритма управления примем неподвижную систему координат $\alpha\beta$, в которой математическая модель асинхронизированного синхронного генератора примет вид;

$$\begin{cases} \frac{d\psi_{1\alpha}}{dt} = i_{1\alpha} R_1 + i_{1\alpha} R_n + L_{1n} \frac{di_{1\alpha}}{dt}, \\ \frac{d\psi_{1\beta}}{dt} = i_{1\beta} R_1 + i_{1\beta} R_n + L_{1n} \frac{di_{1\beta}}{dt}, \\ \frac{d\psi_{2\alpha}}{dt} = u_{2\alpha} - i_{2\alpha} R_2 - \omega \psi_{2\beta}, \\ \frac{d\psi_{2\beta}}{dt} = u_{2\beta} - i_{2\beta} R_2 + \omega \psi_{2\alpha}. \end{cases} \quad (3.25)$$

где R_n, L_n – активное сопротивление и индуктивность нагрузки.

Учитывая, что ЭДС генератора и потокосцепление статора связаны зависимостью:

$$E_{1\alpha} = \frac{d\psi_{1\alpha}}{dt}; \quad E_{1\beta} = \frac{d\psi_{1\beta}}{dt}, \quad (3.26)$$

а $U \approx E$, то можно записать:

$$\begin{aligned} \psi_{1\alpha}^*(t) &= \int E_{1\alpha}^* dt = \int U_{m\alpha}^* \sin(\omega_3 t) dt = \frac{U_{m\alpha}^*}{\omega} \cos(\omega_3 t) \\ \psi_{1\beta}^*(t) &= \int E_{1\beta}^* dt = \int U_{m\beta}^* \sin\left(\omega_3 t - \frac{\pi}{2}\right) dt = \frac{U_{m\beta}^*}{\omega} \cos\left(\omega_3 t - \frac{\pi}{2}\right). \end{aligned} \quad (3.27)$$

Таким образом мы перешли от задания в виде напряжения на обмотке статора генератора к заданию потокосцепления статора:

$$\begin{aligned} \psi_{1\alpha_ref} - \psi_{1\alpha} &= 0, \\ \psi_{1\beta_ref} - \psi_{1\beta} &= 0. \end{aligned} \quad (3.28)$$

В случае, если генератор является автономным, то в качестве задания будут использоваться функции от времени:

$$\begin{aligned} \psi_{1\alpha_ref} &= \psi_{1m} \sin(\omega t), \\ \psi_{1\beta_ref} &= \psi_{1m} \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right). \end{aligned} \quad (3.29)$$

При работе генератора в составе сети с внешними источниками энергии задание потокосцепления статора необходимо вычислять, беря за основу измеренное напряжение сети в соответствии с зависимостями:

$$\begin{aligned}\psi_{1\alpha_ref} &= \int (U_{1\alpha} + i_{1\alpha} R_1) dt, \\ \psi_{1\beta_ref} &= \int (U_{1\beta} + i_{1\beta} R_1) dt.\end{aligned}\tag{3.30}$$

Перейдем к синтезу алгоритма управления.

За основу возьмем условие равенство знака ошибки регулирования и производной регулируемой величины гарантирующее достижение цели управления:

$$\text{sign}(\Delta\psi_1) = \text{sign} \frac{d\psi_1}{dt},\tag{3.31}$$

где

$$\Delta\psi_1 = \psi_{1_ref} - \psi_1.\tag{3.32}$$

Тогда получим:

$$\begin{aligned}\text{sign}(\psi_{1\alpha_ref} - \psi_{1\alpha}) &= \text{sign} \frac{d\psi_{1\alpha}}{dt}, \\ \text{sign}(\psi_{1\beta_ref} - \psi_{1\beta}) &= \text{sign} \frac{d\psi_{1\beta}}{dt},\end{aligned}\tag{3.33}$$

Выразим вектор потокосцепления статора через вектора потокосцепления и тока ротора.

Сперва запишем уравнения векторов потокосцеплений для выбранной системы координат:

$$\begin{cases} \psi_1 = i_1 L_1 + i_2 L_{12}, \\ \psi_2 = i_2 L_2 + i_1 L_{12}. \end{cases}\tag{3.34}$$

Выразим из второго уравнения вектор тока ротора и вставим в первое уравнение:

$$\begin{cases} \psi_1 = i_1 L_1 + i_2 L_{12}, \\ i_2 = \frac{\psi_2 - i_1 L_{12}}{L_2}. \end{cases}$$

$$\begin{aligned}\psi_1 &= i_1 L_1 + \left(\frac{\psi_2 - i_1 L_{12}}{L_2} \right) L_{12} = i_1 L_1 + \frac{\psi_2 L_{12}}{L_2} - \frac{i_1 L_{12}^2}{L_2} = \frac{\psi_2 L_{12}}{L_2} + \frac{i_1 L_1 L_2 - i_1 L_{12}^2}{L_2} = \\ &= \frac{\psi_2 L_{12}}{L_2} + \frac{i_1}{\sigma L_2}\end{aligned}$$

где $\sigma = \frac{1}{L_1 L_2 - L_{12}^2}$

Тогда вектор потокосцепления статора будет равен:

$$\psi_1 = \frac{\psi_2 L_{12}}{L_2} + \frac{i_1}{\sigma L_2} \quad (3.35)$$

Запишем вектор потокосцепления статора для неподвижной системы координат $\alpha\beta$

$$\begin{cases} \psi_{1\alpha} = \frac{\psi_{2\alpha} L_{12}}{L_2} + \frac{i_{1\alpha}}{\sigma L_2}, \\ \psi_{1\beta} = \frac{\psi_{2\beta} L_{12}}{L_2} + \frac{i_{1\beta}}{\sigma L_2}. \end{cases} \quad (3.36)$$

Продифференцируем полученные уравнения по времени и заменим производные потокосцепления ротора на правую часть второго уравнения системы (3.25):

$$\begin{cases} \frac{d\psi_{1\alpha}}{dt} = \frac{d\psi_{2\alpha}}{dt} \frac{L_{12}}{L_2} + \frac{di_{1\alpha}}{dt} \frac{1}{\sigma L_2}, \\ \frac{d\psi_{1\beta}}{dt} = \frac{d\psi_{2\beta}}{dt} \frac{L_{12}}{L_2} + \frac{di_{1\beta}}{dt} \frac{1}{\sigma L_2}. \end{cases} \quad (3.37)$$

При $\begin{cases} \frac{d\psi_{2\alpha}}{dt} = u_{2\alpha} - i_{2\alpha} R_2 - \omega \psi_{2\beta} \\ \frac{d\psi_{2\beta}}{dt} = u_{2\beta} - i_{2\beta} R_2 + \omega \psi_{2\alpha} \end{cases}$ получаем

$$\begin{cases} \frac{d\psi_{1\alpha}}{dt} = \frac{(u_{2\alpha} - i_{2\alpha} R_2 - \omega \psi_{2\beta}) L_{12}}{L_2} + \frac{di_{1\alpha}}{dt} \frac{1}{\sigma L_2}, \\ \frac{d\psi_{1\beta}}{dt} = \frac{(u_{2\beta} - i_{2\beta} R_2 + \omega \psi_{2\alpha}) L_{12}}{L_2} + \frac{di_{1\beta}}{dt} \frac{1}{\sigma L_2}. \end{cases} \quad (3.38)$$

Из полученного уравнения определим, чему должен быть равен вектор напряжение ротора, чтобы производная потокосцепления статора была равна нулю:

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_1}{dt} &= \frac{(U_2 - i_2 R_2 - \omega \psi_2^*) L_{12}}{L_2} + \frac{di_1}{dt} \frac{1}{\sigma L_2} = 0 \\ \frac{(U_2 - i_2 R_2 - \omega \psi_2^*) L_{12}}{L_2} &= - \frac{di_1}{dt} \frac{1}{\sigma L_2} \\ U_2 - i_2 R_2 - \omega \psi_2^* &= - \frac{di_1}{dt} \frac{1}{\sigma L_{12}} \\ U_2^0 &= i_2 R_2 + \omega \psi_2^* - \frac{di_1}{dt} \frac{1}{\sigma L_{12}} \end{aligned} \quad (3.39)$$

где $\psi_2^* = D\psi_2 = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \psi_{2\alpha} \\ \psi_{2\beta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\psi_{2\beta} \\ \psi_{2\alpha} \end{pmatrix}$

Запишем вектор напряжения для неподвижной системы координат $\alpha\beta$:

$$\begin{cases} U_{2\alpha}^0 = i_{2\alpha} R_2 - \omega \psi_{2\beta} - \frac{di_{1\alpha}}{dt} \frac{1}{\sigma L_{12}}, \\ U_{2\beta}^0 = i_{2\beta} R_2 + \omega \psi_{2\alpha} - \frac{di_{1\beta}}{dt} \frac{1}{\sigma L_{12}}. \end{cases} \quad (3.40)$$

В результате получаем алгоритм управления гарантирующий выполнение условия (3.33) в виде:

$$U_{2_ref} = U_2^0 + K \Delta\psi_1. \quad (3.41)$$

Для неподвижной системы координат $\alpha\beta$:

$$\begin{cases} U_{2\alpha_ref} = U_{2\alpha}^0 + k_1 (\psi_{1\alpha_ref} - \psi_{1\alpha}), \\ U_{2\beta_ref} = U_{2\beta}^0 + k_2 (\psi_{1\beta_ref} - \psi_{1\beta}). \end{cases} \quad (3.42)$$

3.3 Имитационная модель асинхронизированного синхронного генератора

Имитационная модель АСГ представлена на рис. 21.

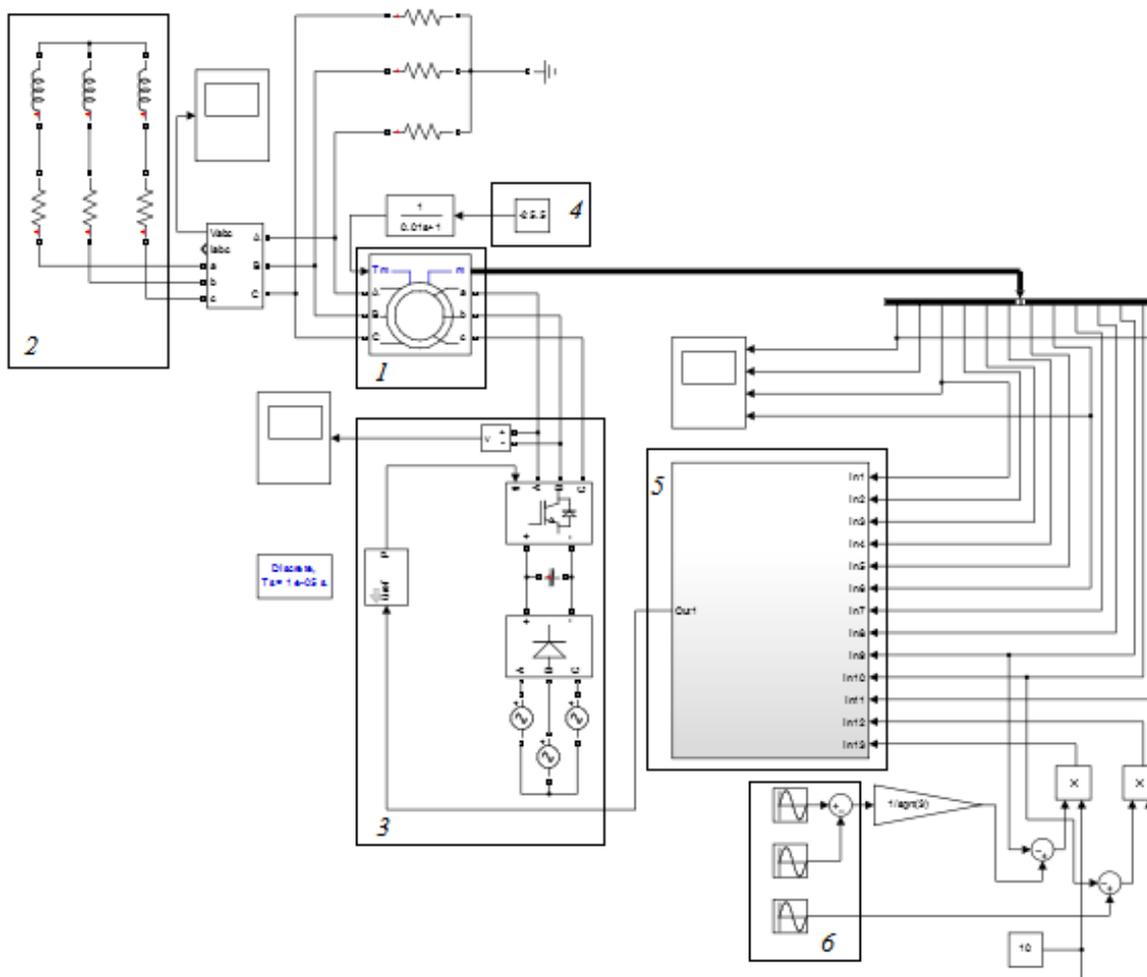


Рисунок 21 – Имитационная модель АСГ

В имитационную модель входят следующие блоки:

- 1 – Асинхронизированный синхронный генератор,
- 2 – Активно-индуктивная нагрузка,
- 3 – Преобразователь частоты,
- 4 – Задание крутящего момента АСГ,
- 5 – Система управления АСГ,
- 6 – Блоки задания потокосцепления статора.

На рис. 22 представлена система управления АСГ.

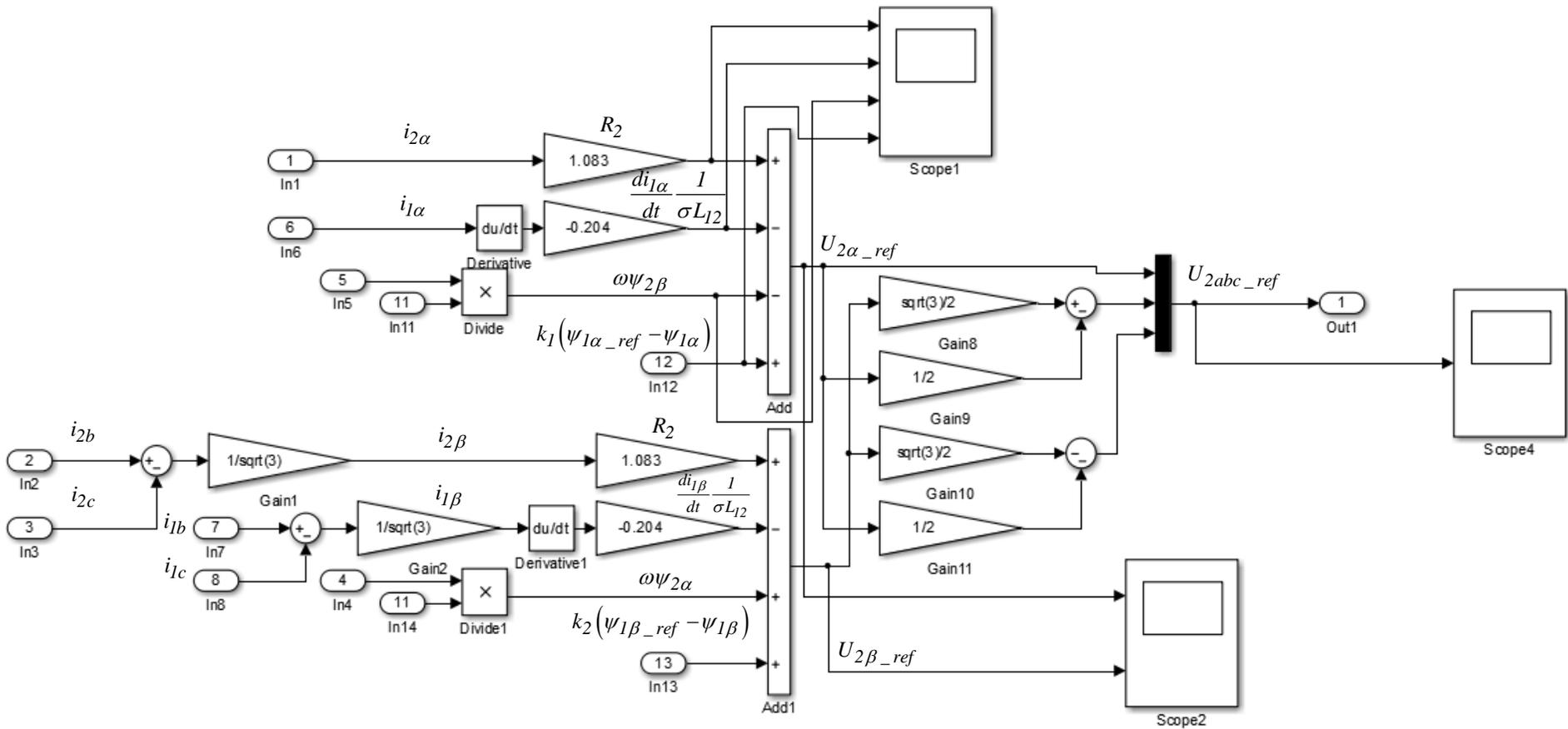


Рисунок 22 – Система управления АСГ

4 Результаты проведенного исследования

Полученный алгоритм управления АСГ должен обеспечивать стабильное значение напряжения при изменении нагрузки.

Сперва снимем напряжение на статорной обмотке АСГ при номинальной нагрузке (рис. 23).

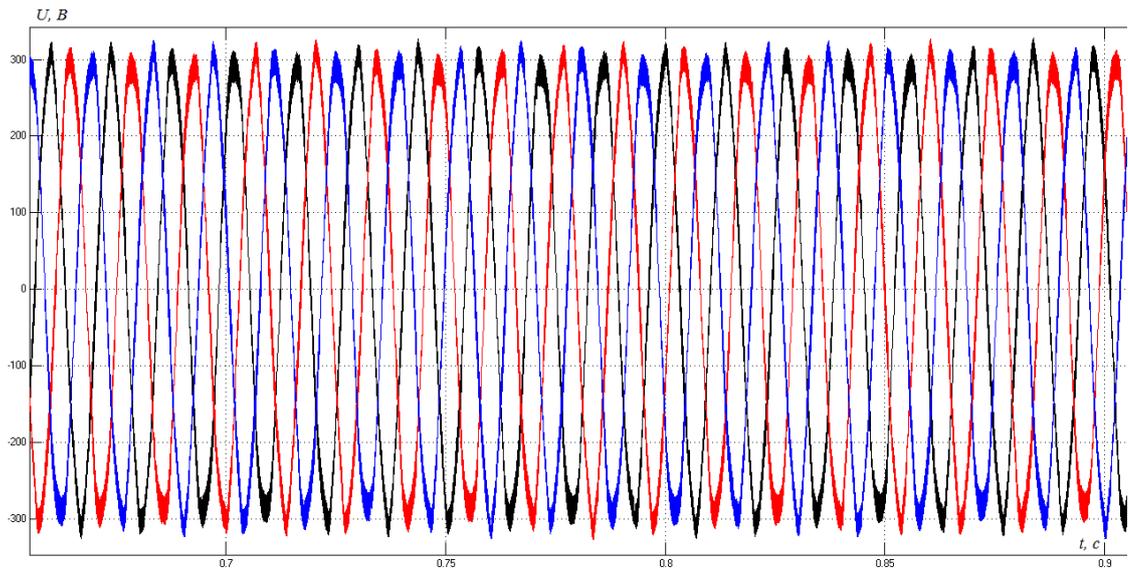


Рисунок 23 – Осциллограмма напряжения на статорной обмотке АСГ

Как видно из рис. 23 напряжение вырабатываемое АСГ стабильно.

Изменим нагрузку и посмотрим, как отреагирует алгоритм управления АСГ на это возмущение.

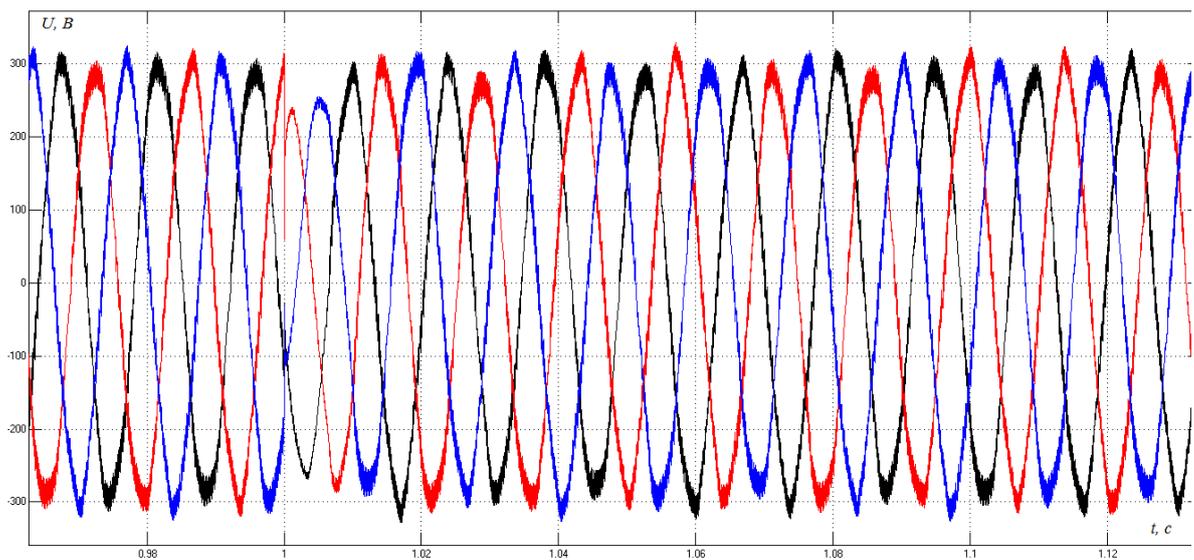


Рисунок 24 – Осциллограмма напряжения на статорной обмотке АСГ при изменении нагрузки

Как видно из рис. 24 просадка напряжения происходит на незначительном промежутке времени и в дальнейшем напряжение стабилизируется.

Это говорит о том, что алгоритм управления АСГ реагирует на возмущения правильно и может использоваться в реальных установках.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной научно – исследовательской работе была рассмотрена достаточно актуальная тема современных систем автономных источников энергии – разработка алгоритмов управления асинхронизированным синхронным генератором. Исследование проводилось в программном комплексе Matlab 2013a / Simulink путем создания имитационной модели, в которой в дальнейшем проводились исследования отработки алгоритма управления АСГ.

Целью работы являлось создание алгоритма управления асинхронизированным синхронным генератором, который будет адекватно обрабатывать внешние возмущения, благодаря чему на выходе генератора мы получали стабильное значение напряжения.

В ходе работы на начальном этапе были сформулирована цель работы и проведен обзор литературы по данной тематике. В процессе анализа теоретического материала были изучены другие сферы применения данных видов электрических машин, как в России, так и за рубежом. Так же при анализе материала были рассмотрены работы некоторых ученых занимающихся этой проблемой.

Далее была создана имитационная модель и проведен ряд экспериментов: работа системы при номинальной нагрузке и при изменении нагрузки.

Как показали результаты исследований – алгоритм управления четко обрабатывает возмущающие воздействия в виде изменения нагрузки. Это говорит о том, что данный алгоритм можно применять в практических целях при эксплуатации данных видов электрических машин.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

1. Клочков С.Е., Завьялов В.М. Особенности применения асинхронизированного синхронного генератора // Сб. докл. 4-й междунар. научн.-практ. конф. в рамках выстав. «Энергосбережение. Отопление. Вентиляция. Водоснабжение». – г. Екатеринбург: Изд-во УМЦ УПИ, 2015, – С. 145 – 148.

2. Клочков С.Е., Завьялов В.М. Особенности режимов работы асинхронизированного синхронного генератора // Сборник докладов всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири» – г. Иркутск: Изд-во УМЦ УПИ, 2015, – С. 145 – 148.

3. Казаков Е.П., Клочков С.Е. Разработка и моделирование асинхронного электропривода со скалярным управлением для шнекового питателя [Электронный ресурс], режим доступа <http://sci-article.ru/stat.php?i=1463213218>, дата обращения 18.05.2016.

Приложение А

Introduction

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ4А	Клочков Сергей Евгеньевич		

Консультант кафедры _____ ЭПЭО _____ :

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Качин Олег Сергеевич	к.т.н., доцент		

Консультант – лингвист кафедры ИЯ ЭНИН :

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Токмашев Денис Михайлович	к.ф.н., доцент		

INTRODUCTION

The current trend in development of power consists in seeking to balance of power-areas, increase of reliability of power supply of consumers. The important place in strategy of development of power industry is occupied by the autonomous systems of power supply (ASPS).

Need for ASPS arises where it is technically impossible or economically inexpedient to use the centralized electric supply, for example on moving objects. And it is, first of all the remote objects far from large electric systems, and the having own sources of primary energy, for example, gas and oil fields.

In such conditions the solution of problems of management of autonomous power complexes, first of all regarding optimization of processes of power supply of the enterprises, from positions of energy saving and minimization of expenses represents an important task.

For consumers of ASPS of industrial frequency ensuring quality of the electric power has essential value. Obtaining stable frequency with a variable frequency of rotation of the driving engine is one of important tasks for ASPS. There is a problem of ensuring stable parameters of the electric energy received by transformation of mechanical energy from her unstable source, for example, of the wind turbine. The same problem exists also during the work from a stable source of mechanical energy, but at unstable electric loading. An effective way of the solution of this problem is transformation of mechanical energy in electric the asynchronised synchronous generators (ASG) [1].

Studying of parallel work of autonomous sources with a network is important. At the same time there is a number of specific questions of collaboration of autonomous systems with the centralized network.

Big contribution to development of asynchronised synchronous machine, to creation of the modern theory of their management and practical use has been brought by domestic scientists the prof. M. M. Botvinnik under the leadership of

whom these works have been begun in VNIIE in 1955, and his follower prof. Yu.G. Shakaryan. The big contribution to the theory and practice have brought the researches executed by N. N. Blotsky, V. I. Radin, I.A. Labunts, A.P. Lokhmatov, L.G. Mamikonyants, I.M. Postnikov, S. V. Pokrovsky, Z.N. Sazonov, etc. [2]. Practical realization of works on introduction of asynchronized generators began in the sixties, the most significant of which was commissioning of 2 asynchronized hydrogenerators 40 MW of Iovskaya hydroelectric power station (Kolenergo). Among foreign scientists, R were engaged in this subject J.C. Clare, A. Kahn, L.M. Ricardo. Turnip, R.M. Sebastian, etc. [2, 3, 4, 5].

Uninterrupted supply of energy assumes existence of an independent source for power supply of special group of essential load. The choice like a source is defined by his purpose, power consumption, existence or lack of a network of power supply, a geographical position of the consumer and admissible expenses.

The analysis of results of researches of domestic and foreign scientists has shown that application of ASG for ASPS working for various loading are studied insufficiently.

In spite of the fact that ASG possess a number of valuable qualities, now they are least studied. Rather large number of works of national and foreign experts is devoted to research of the theory and practice of management of autonomous power complexes and energy saving. However, at the level of ASPS these researches are separated and not fully promote the solution of this problem. Therefore, research ASG for the autonomous systems working for various loading is an actual task.

The purpose of the thesis is development of control algorithms of the asynchronized synchronous generator, providing the required indicators of quality of output tension with a variable frequency of rotation of the driving engine and change of loading.

Object of research is the electromechanical system: asynchronized synchronous generator; the frequency converter with an independent source of tension; control system; driving mechanism.

Object of research is the control system of the asynchronous synchronous generator.

Scientific novelty:

1. The control algorithm of the asynchronous synchronous generator on the basis of the generalized electrical machine allowing to improve dynamic characteristics and to raise indicators of quality of the electric power in autonomous systems of power supply is developed.

2. The imitating model of research of autonomous system of power supply on the basis of the doubly fed induction generator (DFIG) with the offered system of automatic control is developed.

Practical importance of results of GQW: creation of autonomous systems of power supply on the basis of ASG with the quality indicators meeting requirements of the existing state standard specifications.

Work approbation. Basic findings of the work have been reported and discussed at the All-Russian scientific and practical conference with the international participation "Increase of production efficiency and use of energy in the conditions of Siberia" – 2015 (Irkutsk), at the 4th International scientific and practical conference "Effective and High-quality Supply and Use of the Electric Power" - 2015 (Yekaterinburg).

Приложение В

1 Literature review

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ4А	Клочков Сергей Евгеньевич		

Консультант кафедры ЭПЭО :

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Качин Олег Сергеевич	к.т.н., доцент		

Консультант – лингвист кафедры ИЯ ЭНИН :

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Токмашев Денис Михайлович	к.ф.н., доцент		

1 Literature review

The theory and practice of asynchronous machine begins the development with works on collector cascades, with V. Zeyts's researches, D. the Hosanna, L. Dreyfus, M. P. Kostenko, V. G. Kasyanov. The big contribution to development of this direction, to creation of the modern theory of asynchronous machine and bases of their use was brought by M. M. Botvinnik, on an initiative and under the direction of which these works have been begun in VNIIE in 1955 [6]

1.1 Device of the asynchronous synchronous machine, basic elements of systems of regulation and excitement

The asynchronous synchronous machine represents the electromechanical complex consisting of actually electrical machine, the activator, the automatic regulator of excitement. The structure of the asynchronous machine is shown in fig. 1 [7].

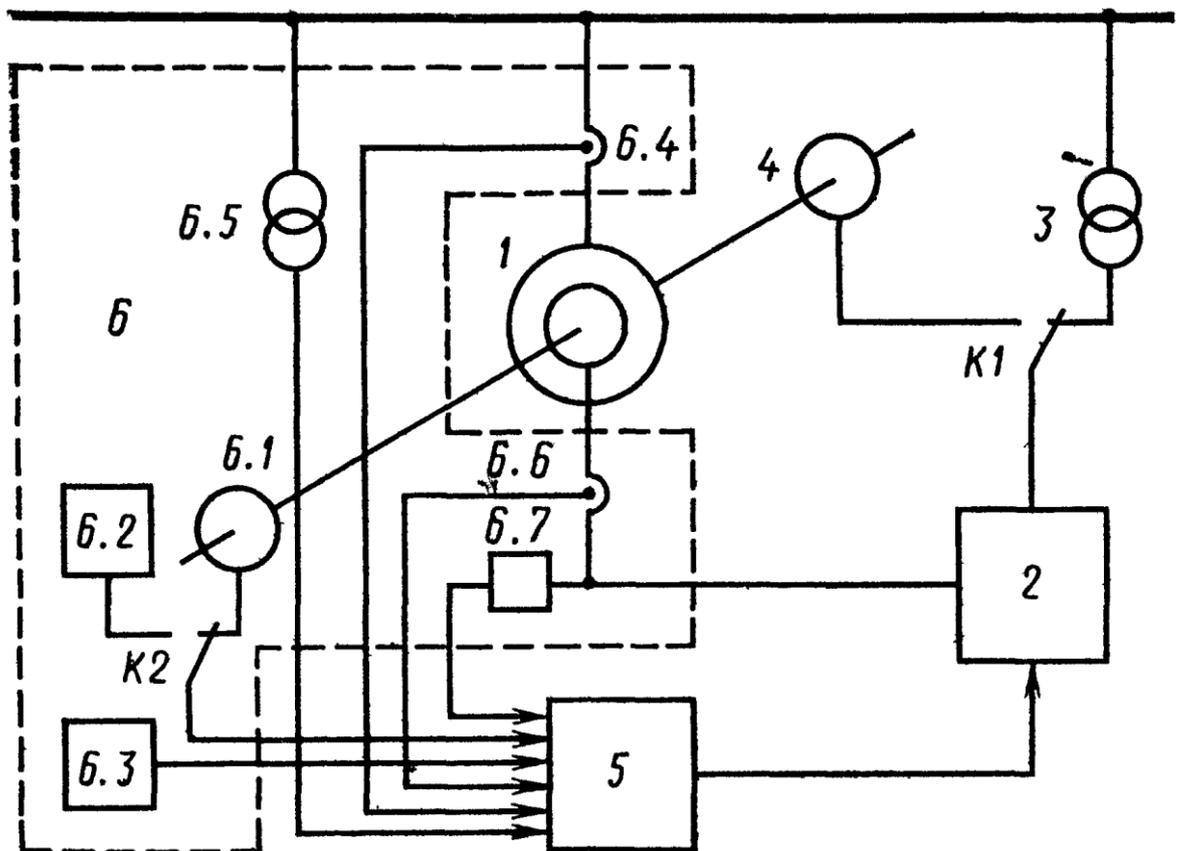


Figure 1 – Structure of the asynchronous synchronous machine

Actually, the electrical machine 1 is not salient pole commutatorless machine of alternating current containing generally m phases on the stator and m_f on a

rotor. For the vast majority of practical cases on the stator the three-phase symmetric winding connected to a three-phase network directly or via the transformer, and on a rotor – symmetric two or the three-phase winding connected through contact rings to the activator settles down. The activator 2, connected to rings of a rotor of the machine 1, receives power supply or from a network via the transformer 3, or from the satellite electrical machine 4 (as the rule, synchronous) located on one shaft with the main machine 1. The option when the machine 4 is a part separate the engine - generating installation is possible.

Voltage frequency at the activator exit (the activator conclusions connected to rotor rings) can change under the required law and is equal in the set mode of a difference of circular frequencies of rotation of the field of the stator and a rotor (sliding frequency) of the machine. It means that the activator of the asynchronized synchronous machine is generally the power supply voltage frequency converter in sliding frequency.

The automatic regulator of excitement 5 serves for formation of the required function of regulation of the machine strengthened by the activator. It is obvious that the number of output signals of the regulator corresponds to number of phases of a rotor of the machine. Function of regulation is formed on the basis of information obtained from this or that variable characterizing an operating mode of the machine. This information is obtained from system of sensors 6, which generally includes the following sensors:

6.1 – sensor of trigonometrical functions of an angle of rotation of a rotor (aiming circle or sensor of angular provision of a rotor);

6.2 – control point adjustment of independent frequency;

6.3 – the sensor of trigonometrical functions of a corner of the representing vector of tension of electric system. This information can be obtained, for example, by means of the device of the telecast of a corner;

6.4 and 6.6 – sensors of currents of the stator and a rotor;

6.5 and 6.7 – sensors of tension of the stator and a rotor.

In fig. 1 keys of K1 and K2 can be in one of provisions – right or left (in drawing – in right). Really, the activator 2 can be powered either from the transformer 5, or from the satellite machine 4 though in some cases for increase of reliability of the asynchronized synchronous machine power supply of the activator from two independent sources is possible.

If on the regulator 5 signals from the sensor 6.1 arrive (K2 key in the right situation), then as it will be shown below, the output frequency of signals of the regulator is function of frequency of rotation of a rotor and the machine gains asynchronous properties concerning stability; if on the regulator signals from the control point adjustment 6.2 arrive, then the output frequency of signals of the regulator doesn't depend on the frequency of rotation of a rotor, and the machine gains synchronous properties concerning stability.

As the electrical machine which is a part of the asynchronized synchronous machine as appears from considered, the asynchronous machine with a phase rotor as serial production, and specially designed can be used. In the first case some minor changes – strengthening of a bandage of a rotor for work with oversynchronous speed, sometimes a conclusion of six contact rings, etc. will be required. In the second case which, as a rule, takes place during creation of powerful asynchronized synchronous machine, is possible to receive system with the best technical and economic indicators as the machine is designed taking into account properties of all other elements of this electromechanical complex.

The activator of the asynchronized machine can be created on a basis of both electrical machines, and valve devices. The electric machine system of excitement consists of collector machine of alternating current and now isn't applied because of the known shortcomings of such systems.

The modern system of excitement consists of the operated thyristor converter frequency. From a large number of such converters – inverters of current and voltage, cycloconverter with natural commutation (CC) – CC with a sinusoidal form of output current are the most suitable for asynchronized synchronous machine [8, 9].

1.2 Principle of action and main properties of the asynchronized synchronous machine

The normal set mode call such operating mode of the electrical machine at which active and jet capacities the stator and rotor chains don't depend on time and are constants, the angular speed of a rotor at the same time remains also invariable at the constant mechanical moment on a shaft [10].

For any electrical machine the normal set mode exists in case the magnetic fluxes created by stator and rotor currents are in space mutually motionless at any value of angular speed of a rotor. As follows from this condition MMF creating the specified magnetic fluxes or the representing vectors of currents and voltages, and the stator, and a rotor also has to be mutually motionless. This condition registers as follows:

$$\omega_f = \omega - \omega_R = -s\omega, \quad (1)$$

when ω – angular speed of vectors voltage, magnetic fluxes and currents of the stator concerning the stator;

ω_f – angular speed of vectors of voltage, magnetic fluxes and currents of a rotor concerning a rotor;

ω_R – angular speed of a rotor.

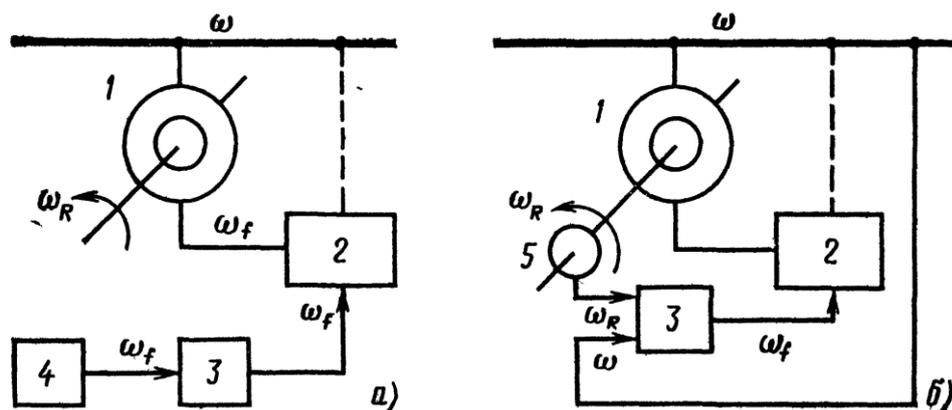


Figure 2 – The block diagram of the machine working in generalized the synchronous and generalized asynchronous modes

Practical realization of a condition (1) can be reached in two essentially various ways: when ω_f is an independent variable, and ω_R speed – function of speeds of

ω and ω_f ; when ω_R is an independent variable, and ω_f – function of speeds of ω and ω_R .

The classification of doubly fed induction generator given in due time still by V. T. Kasyanov and developed later in some other works [11] is based on this principle. The machine of the first type is defined as having synchronous properties, or working in "the mode generalized synchronous". The machine of the second type is defined as having asynchronous properties, or working in "the mode generalized asynchronous". These both modes of the same machine called by the author by the asynchronized synchronous machine can exist for certain conditions, have the features, merits and demerits.

In fig. 2, and, schemes of the asynchronized machine working in "generalized synchronous" and "generalized asynchronous" the modes are shown structural. These schemes differ in the fact that in the first case the system of automatic control of the machine 1 which rotor is connected to the converter of the frequency 2 is opened on the speed as the signal of ω_f arrives on a regulator 3 entrance from the independent control point adjustment 4 (see fig. 1, the control point adjustment 6.2), in the second case the system of automatic control of the machine 1 is closed on speed, on an entrance of the regulator 3 the signal of angular speed of a rotor from the situation 5 sensor arrives (see also fig. 1, the sensor 6.1).

In the first case at change, for example, of the mechanical moment on a shaft and invariable values of speeds of ω and ω_f new set mode will come only in that case when speed $\omega_R = \omega + \omega_f = const$, i.e. rotor speed in the set mode for this case doesn't change at change of loading on a shaft. The perfect analogy of the considered mode of asynchronized and synchronous machine consists in it.

In the second case at change of the moment on a shaft and invariable value of speed ω new set mode will come at any values of speed of a rotor. Speed ω_f will change according to (1). Values ω_R and ω_f which will be established in the new normal set mode, are defined by the mechanical characteristic of the machine and

other factors which will be in detail considered later. Here it is important to note that the normal set operating mode in this case is followed by change of speed of a rotor together with change of loading in the same way as it takes place in asynchronous machines. It is obvious that as in the first case (at invariable ω and ω_f), and in the second case (at invariable ω and ω_R) with change of current of a rotor in the asynchronized synchronous machine it is possible to change the jet power of the stator as well as in the synchronous machine.

So, the asynchronized synchronous machine can work in the generalized synchronous and asynchronous modes – the modes differing from each other in nature of formation of frequency ω_f voltages (currents) of a rotor.

These ways of formation determine also the type of stability of the machine – by a corner or by sliding respectively [12].

The asynchronized machine irrespective of a way of formation of voltages of a rotor allows to regulate jet power and can work in the normal set mode with various frequency of rotation of a rotor. At the same time, we will note that characteristics and static and dynamic properties of the machine are defined by the law and parameters of regulation of amplitude and a phase of a spatial vector of voltage (current) of a rotor.

Ya.B. Danilevich and I.Z. Boguslavsky considered the possibility of use of asynchronized synchronous generators for vtrostantion and small hydroelectric power stations [14].

Level of linear loading of rotors of ASG is about 10 - 15% [15, 16] higher therefore when using the engine with a phase rotor as ASG its rated power should be lowered approximately by 20%, at the same time undertaking additional measures for increase of efficiency of ventilation of a winding of a rotor. It is also necessary to note that at almost identical power factors the level of saturation of a magnetic chain of ASG is 10-15% higher, than at the engine [15].

Induction motor in the nominal mode usually works in the range of slidings ~ with 1%; for ASG this range is much wider – to 20-25%, respectively, in copper and active steel of a rotor of ASG considerably big losses and heatings so additional measures for increase of efficiency of ventilation have to be taken not only in relation to a winding, but also to active steel of a rotor [16].

In ASG generators the frequency converter as it was noted above, turns on in a chain of his rotor; at the same time its power is much less than the power of the converter for the synchronous machine which needs to be included in a stator chain. From the point of view of the ASG operational modes important that the converter in a chain of his rotor can change voltage on contact rings not only on amplitude and frequency, but also on a phase, thereby changing also power factor of ASG [17].

By motors with a phase rotor usually half-closed grooves with the rod winding executed in the form of the semi-sections laid by the narrow party along height of a groove and soldered in front parts are applied. However such design can be applied to ASG only at small ranges of admissible slidings – no more than 2 - 5%. When sliding to 20 – 25% it is necessary to apply the designs considering increase in losses and heating of a winding of a rotor because of the phenomenon of superficial effect [16]. Besides, the design of ASG has to differ in considerable number of rounds in order that voltage on contact rings at the maximum working slidings would make about 350 - 400 V; it is expedient from the point of view of a rational design of the converter.

For machines with a wound rotor the question of decrease in additional losses matters. This issue can be resolved in various ways, one of which – application of a bobbin winding of stators of machines of alternating current. However for technological reasons this design assumes application of an open groove of a rotor, then in a curve of the field of a rotor emergence of the highest grooving harmonicas which cause additional losses in active steel and windings is inevitable. We will note that large asynchronous machines are often carried out with open grooves of a rotor and are reliable; some decrease in losses manages to be reached the choice of opening of a groove of a rotor, machine gap. Other way is application of a random-wound wind-

ing; the half-closed groove of such winding solves a problem, but laying of such winding in grooves of a rotor is more labor-consuming, than bobbin.

The winding of the ASG stator is carried out high-voltage therefore it keeps within open grooves. In this case in a curve of the field of the stator emergence of the highest grooving harmonicas which also cause additional losses in active steel and windings is inevitable. In practice of electric machine industry for the solution of this problem measures similar to measures for open grooves of a rotor are taken, but also additional opportunities appear here: application of magnetic wedges. The highest grooving harmonicas in curves of the stator and a rotor cause distortion of a form of a curve of voltage of ASG which has to meet standards of GOST 183-74 or the international MEK-34 standards. For this purpose grooves are carried out with a bevel. Such practice is widely used in electric machine industry, for example, for diesel generators of low and average power [15, 16].

The highest temporary harmonicas in a curve of current of a rotor are also the reason of distortion of a form of a curve of tension of ASG. This problem is solved by installation of filters in ASG contours.

I.Yu. Seredzninsky and M. V. Chashko have created the ASG simple model for research of a possibility of receiving stable voltage and frequencies from an unstable source of mechanical energy [18].

The model of the device is presented in fig. 3.

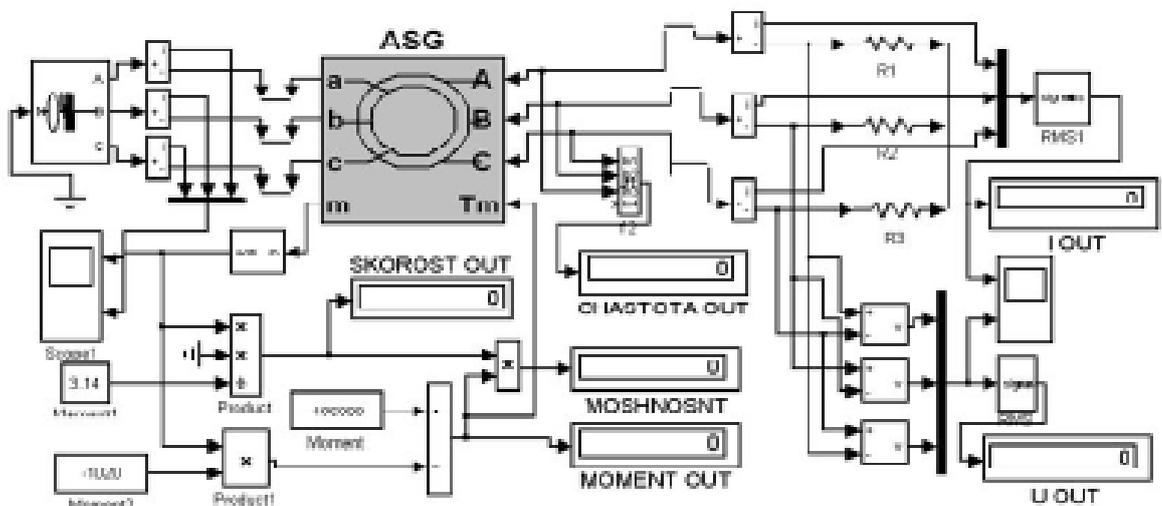


Figure 3 - The ASG model from the library Simulink elements

The virtual stand for definition of characteristics of the generator contains the asynchronized synchronous generator ASG, an excitement voltage source, loading. As ASG the model of the three-phase asynchronous machine with a phase rotor from Simulink library is accepted. As an excitement source – a library source of three-phase voltage, loading it is executed in the form of resistors.

The model works the following manner. The moment received as a difference between the set moment and the moment proportional to rotation frequency is put to a rotor. It gives the chance to stabilize rotation frequency at a variation of electric loading of the generator. Voltage from a three-phase source so in a rotor the magnetic flux rotating concerning a rotor which induces in the EMF stator is created is put to a three-phase winding of a rotor. Value and frequency of EMF are proportional to the algebraic sum of frequencies of rotation of a rotor and rotation of a magnetic flux concerning a rotor. Under the influence of EMF through windings of the stator and resistance of loading there passes current by which energy is transmitted from the generator to loading. The magnetic flux created by loading current in a stator winding algebraically develops with a magnetic flux of a rotor so EMF in the stator is created by a total stream.

V. V. Chopik, V. M. Mikhalsky, I.A. Shapovalov and V. M. Sobolev have developed a control algorithm of doubly fed induction generator by means of the two-level matrix converter, which is switched on in a rotor circuit. Unlike the converter where the operated rectifier and the inverter are used, this converter provides direct transformation of energy with sinusoidal entrance currents and the power factor close to unit. Modeling of work of system of generation of electric energy on the basis of doubly fed induction generator is executed [19].

Foreign scientists and students from different universities dealt generally with issues of applicability of asynchronized synchronous generators (the doubly fed induction generator) in the wind power plants (WPP).

Wentao Guo, Feng Liu, Jennie Si, Dawei He, Ronald Harley, Shengwei Mei from universities of the China and the USA have developed the software for additional control of jet power the asynchronized synchronous generator on WPP [20].

Reactive power control of doubly fed induction generators (DFIGs) has been a heated topic in transient stability control of power systems in recent years. By using a new online supplementary learning control (OSLC) approach based on the theory of approximate dynamic programming (ADP), this paper develops an optimal and adaptive design method for the supplementary reactive power control of DFIGs to improve transient stability of power systems. To augment the reactive power command of the rotor-side converter (RSC), a supplementary controller is designed to reduce voltage sag at the common coupling point during a fault, and to mitigate active power oscillation of the wind farm after a fault. As a result, the transient stability of both DFIGs and the power system is enhanced. For the supplementary controller design, an action dependent cost function is introduced to make the OSLC model-free and completely data-driven. Furthermore, a least-squares based policy iteration algorithm is employed to train the supplementary controller with convergence and stability guarantee. By using such techniques, the supplementary reactive power controller can be trained directly from data measurements, and therefore, can adapt to system or external changes without an explicit offline system identification process.

Simulations carried out in Power System Computer Aided Design/ Electro Magnetic Transient in DC System (PSCAD/EMTDC) show that the OSLC based supplementary reactive power controller can significantly improve the transient performance of the wind farm and enhance the transient stability of the power system after sever faults.

The schematic of DFIG wind generator is shown in fig. 4.

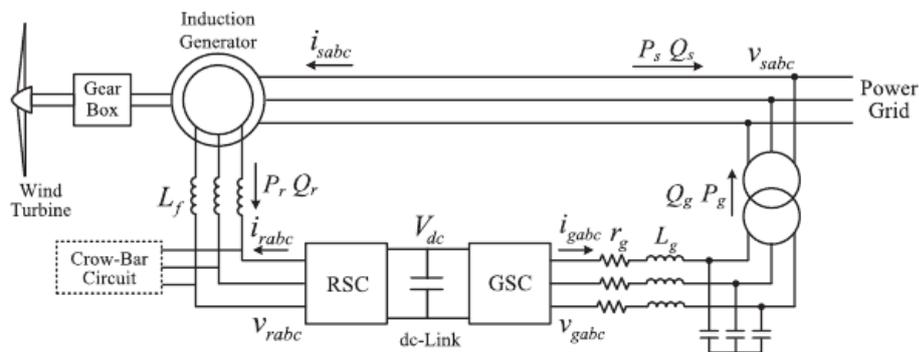


Figure 4 – Schematic of DFIG

Scientists from university the Biskra of Algeria S. Abdeddaim, A. Betka have described in the article optimum control of speed of rotation and robustness regulation of power of the asynchronous synchronous generator for WPP [21].

An optimal operation of a grid-connected variable speed wind turbine equipped with a Doubly Fed Induction Generator (DFIG) is presented. The proposed cascaded nonlinear controller is designed to perform two main objectives. In the outer loop, a maximum power point tracking (MPPT) algorithm based on fuzzy logic theory is designed to permanently extract the optimal aerodynamic energy, whereas in the inner loop, a second order sliding mode control (2-SM) is applied to achieve smooth regulation of both stator active and reactive powers quantities. The obtained simulation results show a permanent track of the MPP point regardless of the turbine power-speed slope moreover the proposed sliding mode control strategy presents attractive features such as chattering-free, compared to the conventional first order sliding technique (1-SM).

The topology of the wind energy conversion system (WECS) under consideration in this paper is depicted in fig. 5.

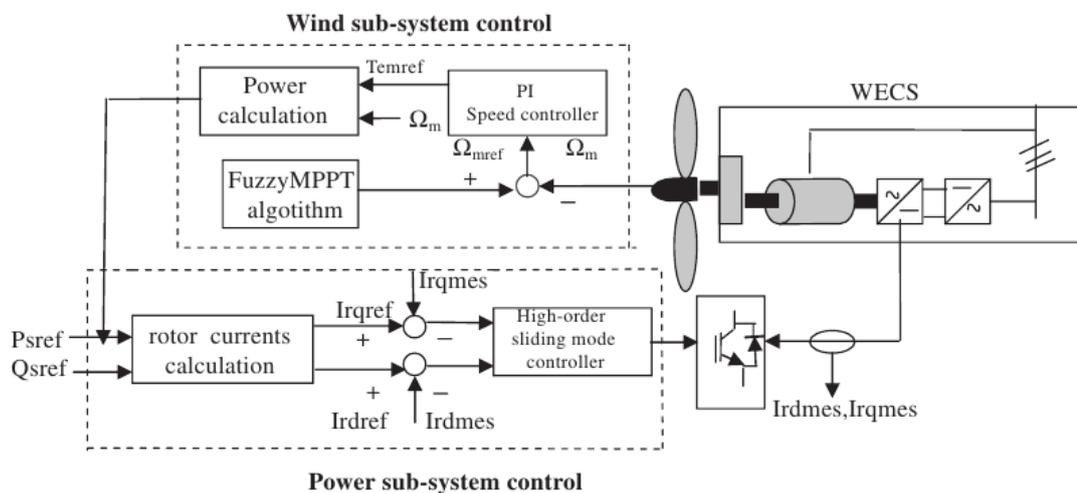


Figure 5 - Block-diagram of the whole system

Control structure.

The wind turbine electric system time responses are much faster than those of the others parts of the WECS. This makes it possible to dissociate the generator and

the aeroturbine control designs and thus define a cascaded control structure around two sub-system control:

- The power sub-system control concerns the electric generator via the power converter.
- The wind sub-system control concerns the aeroturbine that provides the reference inputs of the power sub-system control.

Thereafter, these two control levels will be considered separately as seen in fig. 5.

Scientists from Iran of M. Rahimi and M. Parniani have described in the article a method of improvement of ability of maintenance of the generating mode at a failure of voltage of a network of the asynchronized synchronous generator [22].

This paper proposes a competent and effective scheme to enhance the ride-through capability of DFIG-based wind turbines under unbalanced voltage dip conditions. The proposed method is realized through joint use of the rotor-side converter control and a three-phase stator damping resistor (SDR) placed in series with the stator windings. By means of an asymmetrical SDR idea, during the unbalanced voltage dip the SDR resistors are activated only in phase(s) experiencing low voltage. Then, the rotor current is controlled such that no unbalance voltage appears on the stator voltage. The proposed ride-through approach limits the peak values of the rotor inrush current, electromagnetic torque and DFIG transient response at the times of occurrence and clearing the fault. It also suppresses fluctuation of the electro-magnetic torque and DFIG transient response appeared during unbalanced voltage dips due to negative sequence component.

The scientist from Iran M. Farshadnia and the scientist from Australia of S. A. Taher have described in the article control of the given ASG power at the unstable level of voltage of a power supply system [23].

A novel current-based direct power control (CB-DPC) strategy for a grid-connected doubly-fed induction generator (DFIG) is proposed. The reported control scheme is applicable to DFIG-based variable-speed wind turbines that operate under unbalanced network voltages. The required DFIG rotor voltage for precise regulation

of the stator active and reactive output powers and accurate elimination of their inherent pulsations are directly obtained using a nonlinear integral sliding-mode control (ISMC) scheme.

Compared with other control methods, the proposed strategy is simpler since it is not based on the symmetrical components theory, does not need multiple synchronous coordinate transformations, and only requires DFIG voltage and current values as its inputs. Constant switching frequency of the rotor-side converter (RSC) is achieved by means of space vector pulse-width modulation (SVPWM) technique.

Uncertainties in the parameters of the generator are included in the design. A compensation strategy is also proposed for tracking error mitigation of the powers that occur due to elimination of the chattering phenomena in the ISMC scheme. Simulation results on a 2MW DFIG under different operating conditions are presented to validate the effectiveness and robustness of the proposed method.

Schematic diagram of the controller is illustrated in fig. 6.

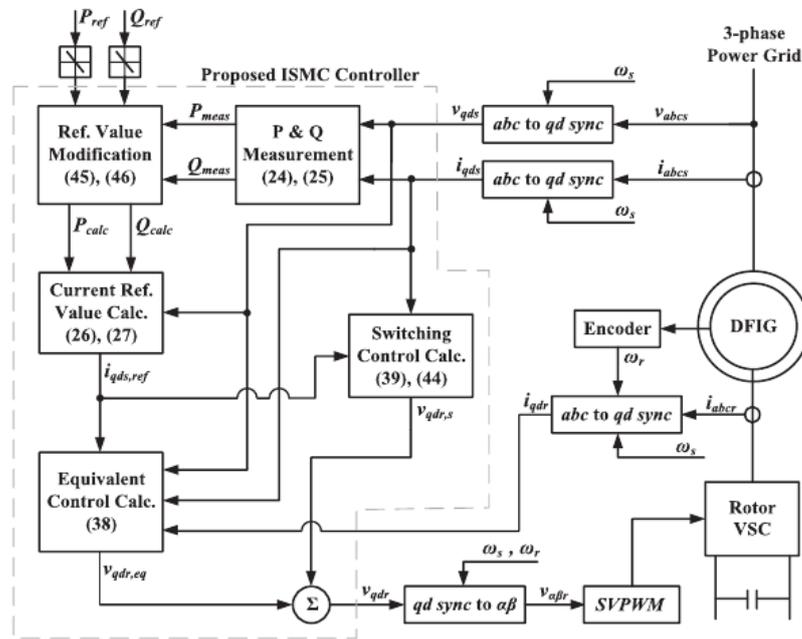


Figure 6 – Schematic diagram of the proposed integral sliding-mode CB-DPC for a grid-connected DFIG

Scientists from India V. R. – R. Rudraraju, C. Nagamani, G. S. Ilango have developed the control circuit of operating efficiency of the asynchronized synchro-

nous generator at a low speed of air stream with use of the converter of frequency [24].

This study proposes a scheme for extending the low speed range of operation of a Doubly Fed Induction Generator (DFIG) without down grading the efficiency. Also, only fractional rated converters are employed. The technique involves two operational modes for the generator. When the rotor speed is between 70% and 130% of the synchronous speed, the machine is operated in the normal Doubly Fed Induction Generator (DFIG) mode and when the rotor speed falls below 70%, it is operated in Stator Short Circuited (SSC) mode. The switch-over from the DFIG mode to the SSC mode is carried out at a threshold speed to maintain the efficiency of generator with the same fractional rated converters. The computer simulations on a typical DFIG (250 kW) in Matlab/Simulink environment illustrate that the range of efficiency improvement is from zero to 15%. Further, the experimental results on a 2.3 kW DFIG set up are also illustrated to demonstrate the efficacy of the scheme.

Scientists from different universities of Algeria: T. Ghennam, K. Aliouane, F. Akel, E.M. Berkouk and the scientist from France – B. Francois have in common developed an advanced control system of the asynchronized synchronous generator for development of jet power and integrated in dispatching offices on WPP [25].

Power dispatching of a wind farm is described while focusing on the local power management and controller units of a wind generator. The wind farm dispatching system sends out the appropriate power references to each individual wind generator in order to control the power production of the entire wind farm. A local power management algorithm is proposed for the reactive power production in each wind generator. In fact, this algorithm ensures the management of power references between the Grid Side Converter (GSC) and the DFIG stator circuit by taking into account three modes of the wind farm operating. This algorithm takes also into account the maximum reactive power capability of the DFIG as well as the GSC. The DFIG control system provides the desired power, which is asked by the wind farm dispatching. The proposed reactive power management algorithm and the real and reactive power control for each individual wind generator have been implemented on a

dSPACE DS 1104 board. The performance of the reactive power distribution algorithm and the entire DFIG controller are verified through experimental results.

In order to control the grid, the TSO has to manage wind farms as classical large power generators. The power system for the study has various loads and a wind farm, which is connected to the 20 kV bus via a 20 kV/690 V transformer (fig. 7).

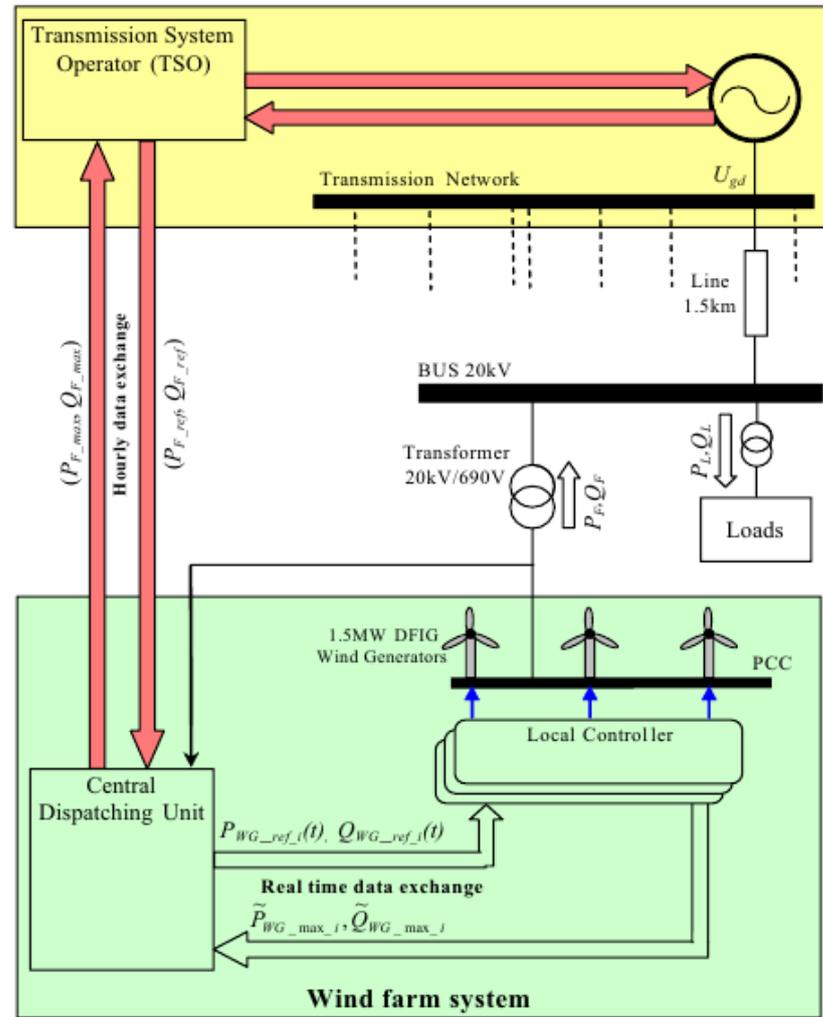


Figure 7 – Schematic diagram of the power system

Scientists from China Zh. Song, Ch. Xia, T. Shi considered in the work transition process of ASG at disappearance of voltage of WPP [26].

With increasing wind power penetration, transient responses of doubly-fed-induction-generator (DFIG) based wind turbines gain attentive focus. Accurate prediction of transient performance of DFIG under grid faults is required with increasing wind power penetration. Taking into account the main flux saturation and deep-bar effect, this paper concentrates on transient responses and stability of the DFIG system

under symmetrical grid faults. Their roles played in the enhancement of system transient stability are clarified. The analyses proposed contribute greatly to proper selection, design and coordination of protection devices and control strategies as well as stability studies.