

10. Твайделл Дж., Уэйр А. Возобновляемые источники энергии: Пер. с англ. - М.: Энергоатомиздат, 1990. - 392 с.
11. Сибикин, Ю.Д. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии / Ю.Д. Сибикин, М.Ю. Сибикин. - М.: КноРус, 2012. - 240 с.
12. Оценка экономической эффективности энергосбережения. Теория и практика. - М.: Теплоэнергетик, 2015. - 400 с.
13. Панич А. Альтернативные источники энергии [Электронный ресурс] - <http://www.nestor.minsk.by/sn/2003/21/sn32118.html> [20.10.18].
14. Семенов, В.С. Основы энергосбережения / В.С. Семенов. - М.: Книга по Требованию, 2013. - 259 с.

УДК 621.31

Коновалов Юрий Васильевич,

*к.т.н., доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий»,
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,
e-mail: yrvaskon@mail.ru*

Садовский Степан Андреевич,

обучающийся группы ЭЭ-15-1, ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет», e-mail: stepan_sadovskii@mail.ru

Кривошеев Максим Евгеньевич,

обучающийся группы ЭЭ-15-1, ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет», e-mail: maks_krivosheev_2017@mail.ru

Тихонова Ангелина Евгеньевна,

обучающаяся группы ЭЭ-18-1, ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет», e-mail: lina_tikhonova@icloud.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ С СИНХРОННЫМИ ГЕНЕРАТОРАМИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДАХ СИНХРОНИЗАЦИИ

Konovalov Y.V., Sadowski S.A., Krivosheev M.E, Tikhonova A.E.

STUDY OF ELECTROMECHANICAL COMPLEXES WITH SYNCHRONOUS GENERATORS WITH DIFFERENT SYNCHRONIZATION MODES

Аннотация. Представлены результаты экспериментальных исследований различных методов синхронизации электромеханических комплексов с синхронными генераторами, возникающих при включении синхронного генератора на параллельную работу с сетью и при самосинхронизации при аварийных режимах короткого замыкания.

Ключевые слова: электромеханический комплекс, синхронный генератор, исследования, метод синхронизации, короткое замыкание, самосинхронизация.

Abstract. The results of experimental studies of various methods of synchronization of electro-mechanical complexes with synchronous generators arising when the synchronous generator is turned on for parallel operation with the network and during self-synchronization during emergency modes of a short circuit are presented.

Keywords: electromechanical complex, synchronous generator, research, synchronization method, short circuit, self-synchronization.

Включение синхронных генераторов (СГ) на параллельную работу с сетью, как правило, производится автоматически, при помощи автосинхронизаторов. Операция

включения синхронных генераторов на параллельную работу весьма сложна и ответственна. Последствием неправильного включения генератора в сеть в лучшем случае может

быть обесточивание шин электростанции, а при известных условиях – повреждение коммутационной аппаратуры и генератора.

При включении синхронных генераторов на параллельную работу в режиме холостого хода применяются три способа синхронизации:

- точная синхронизация, при которой до включения генератора на шины электростанции его напряжение и частота устанавливаются равными напряжению и частоте сети, а в момент совпадения фаз напряжений сети и генератора последний включается в сеть;
- самосинхронизация, при которой до включения генератора на шины электростанции его обмотка возбуждения замкнута. Частота вращения устанавливается приблизительно равной частоте сети, генератор включается в сеть с последующим возбуждением;
- синхронизация через индуктивное сопротивление, при которой генератор с напряжением и частотой, близкими к напряжению и частоте сети, включается в сеть. Последний способ нашел применение в автономных электростанциях [1...3].

При эксплуатации электромеханических комплексов, при возникновении аварийных режимов короткого замыкания (КЗ), возможен режим самосинхронизации после устранения причин КЗ. Вероятность возникновения различных видов КЗ обобщена [4, 5] и представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Вероятность возникновения коротких замыканий

№ п/п	Вид короткого замыкания	Средняя вероятность возникновения данного вида КЗ, %
1	Трехфазное	4
2	Двухфазное	7,5
3	Однофазное	76
4	Двухфазное на землю	12,5

Различные методы синхронизации имеют свои достоинства и недостатки и поэтому применение того или другого из них зависит от назначения электростанции, мощности генераторов, требований стабильности напряжения и частоты сети и т.д. [6...8].

Для экспериментального исследования методов синхронизации в лаборатории кафедры ЭПП АНГТУ «Электротехнические комплексы и системы» адаптирован учебный стенд для исследования электромеханического преобразования энергии машинами постоянного и переменного тока. Конструктивно он представляет соединенные между собой и установленные на едином основании машину постоянного тока, машину переменного тока и маховик. Вал машины переменного тока сочленен с преобразователем угловых перемещений. Машина постоянного тока независимого возбуждения может использоваться как двигатель или генератор постоянного тока с независимым или параллельным возбуждением. Концы обмоток машины выведены через гнезда на ее терминальную панель. Машина переменного тока имеет трехфазные обмотки на статоре и роторе. Она может использоваться как классическая трехфазная синхронная машина в режимах генератора, двигателя и синхронного компенсатора, как трехфазная асинхронная машина в режимах генератора, двигателя с короткозамкнутым или фазным ротором и как машина двойного питания в генераторном и двигательном режимах. Исследования методов синхронизации проводились для варианта, когда в качестве приводного механизма использовалась машина постоянного тока, а в качестве генератора – универсальная машина переменного тока в режиме синхронного генератора. Электрическая схема экспериментальной установки, приведена на рисунке 1 и представляет собой модель трехфазной электрической системы, состоящей из автоматических выключателей, двух трансформаторных групп, модели линии электропередачи, СГ с приводным двигателем и контрольно-измерительных приборов. Используемая аппаратура с наименованием узлов приведена в таблице 2.

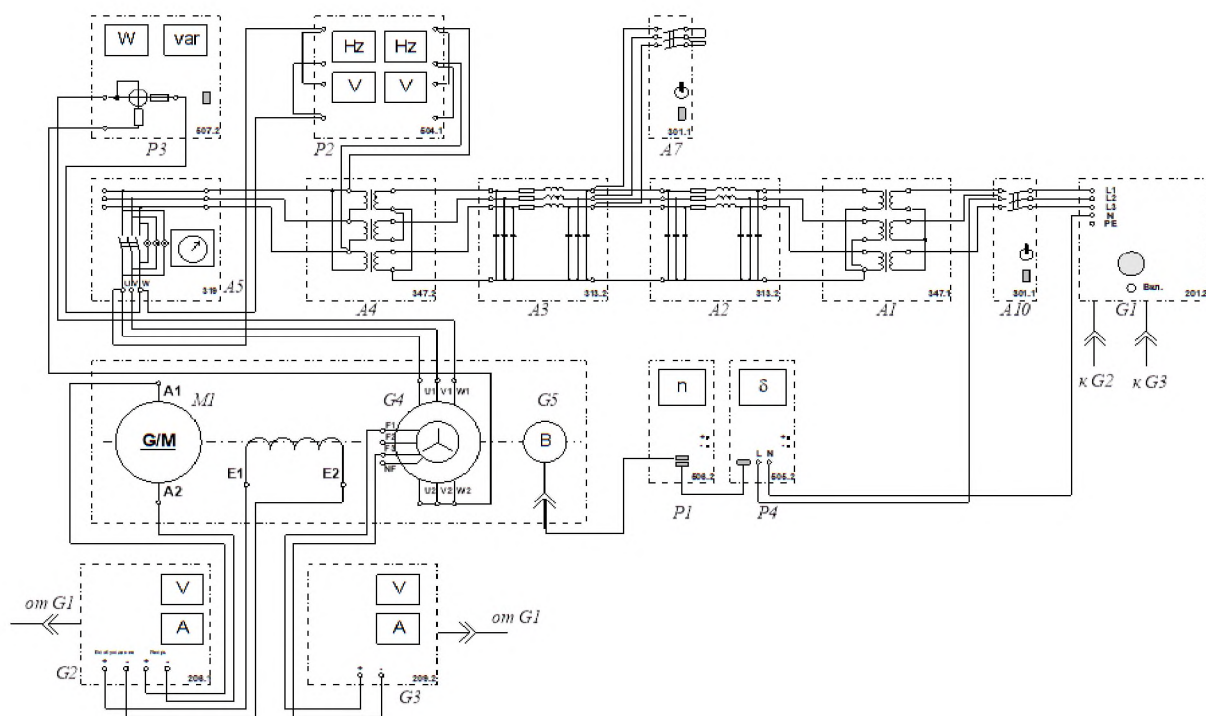


Рисунок 1 – Схема соединений экспериментальной установки

Таблица 2 – Перечень узлов экспериментальной установки

Обозначение	Наименование узла
A1, A7	Трехполюсный выключатель
A2, A4	Трехфазная трансформаторная группа
A3	Модель линии электропередачи
A5	Блок синхронизации
A6	Блок измерительных трансформаторов тока и напряжения
A8	Коннектор
G1	Трехфазный источник питания
G2	Источник питания двигателя постоянного тока
G3	Возбудитель синхронной машины
G4	Машина переменного тока
G5	Преобразователь угловых перемещений
M1	Машина постоянного тока
P1	Измеритель напряжений и частот
P2	Указатель частоты вращения

Для фиксации переходных процессов использовался блок ввода/вывода цифровых сигналов БВВЦС2, предназначенный для обеспечения возможности присоединения

внешних устройств через контактные гнезда к цифровым входам/выходам платы сбора данных, встроенной в коннектор. Функция коннектора заключается в обеспечении возможности присоединения внешних устройств через контактные гнезда к аналоговым входам/выходам встроенной в него платы сбора данных типа NI USB-6212 OEM и далее через кабель USB к персональному компьютеру.

При рассмотрении различных методов синхронизации выполнялась оценка переходного процесса по времени его протекания и ударным токам, возникающим в момент включения на параллельную работу. Результаты исследований показали, что наименьшие колебания напряжения, тока и частоты происходят при включении синхронного генератора методом точной синхронизации на холостом ходу при соблюдении заданных условий синхронизации. Выявлено, что более тяжелым для СГ при трехфазном симметричном коротком замыкании является режим вхождения в синхронизм СГ методом самосинхронизации после устранения КЗ, чем сам режим КЗ. Амплитудное значение токов при этом превышает в полтора раза ток КЗ, а длительность самосинхронизации составляет около 10 с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электроснабжение промышленных предприятий: учебник / Б.И. Кудрин, О.А. Бушуева, А.В. Виноградов, Ю.В. Коновалов [и др.] – М.: Теплотехник, 2017. – 220 с.
2. Крюков А.В., Арсентьев О.В., Арсентьев Г.О. Модельные исследования несимметрии в трехфазных электрических сетях / А.В. Крюков, О.В. Арсентьев, Г.О. Арсентьев // Сборник научных трудов Ангарской государственной технической академии: Изд-во АГТА, г. Ангарск. – 2015. Т. 1. № 1. С. 122-131.
3. Buyakova N., Zakarukin V., Kryukov A. Imitative Modelling of Electromagnetic Safety Conditions in Smart Power Supply Systems // Advances in Intelligent Systems Research. Vol. 158. Vth International workshop “Critical infrastructures: contingency management, intelligent, agent-based, cloud computing and cyber security” (IWCIS2018), 2018. С. 20-25.
4. Полднева О.И., Садовский С.А., Алафьева М.А. Анализ возможностей современных систем управления электротехническими комплексами с машинами переменного тока / Вестник АнгТУ, 2017 г., № 11. – С. 60-64.
5. Садовский С.А., Алафьева М.А. Исследование переходных процессов при включении синхронных генераторов на параллельную работу / Сборник научных трудов АнгТУ, - Ангарск: Издательство АнгТУ, 2017 г. – С. 208-215.
6. Коновалов Ю.В., Абрамович Б.Н., Устинов Д.А. Электромеханические комплексы с синхронными двигателями. Моделирование, выбор и реализация энергоэффективных режимов / LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2013. – 121 с.
7. Арсентьев М.О., Крюков А.В., Арсентьев О.В. Показатели качества электроэнергии в системах электроснабжения железных дорог с установками распределенной генерации // Иркутск: Вестник ИрГТУ. 2015. № 12(107). С. 170-177.
8. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 2005. 273 с.