

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.311.24

Е.Н. Соснина¹, А.В. Шалухо¹, С.А. Анисимов², И.А. Липужин¹, А.А. Смирнов¹

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ С ВЕТРОДИЗЕЛЬНЫМИ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯМИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
ООО «Теком», г. Нижний Новгород²

Рассмотрены особенности электротехнических комплексов с ветродизельными электростанциями с точки зрения устойчивости их работы, а также причины и последствия нарушений статической и динамической устойчивости. Обосновано применение имитационного моделирования для исследования устойчивости в электротехнических комплексах с возобновляемыми источниками энергии. Приведено описание составных блоков, входных переменных с пределами их изменения и исследуемых режимов имитационной модели электротехнического комплекса с ветродизельной электростанцией.

Ключевые слова: электротехнический комплекс, ветродизельная электростанция, имитационная модель, статическая устойчивость, динамическая устойчивость.

Введение

Одной из ключевых задач для России является промышленное и социальное развитие удаленных восточных регионов. Рост численности населения и реализация инвестиционных проектов напрямую связаны с необходимостью увеличения объемов электроэнергии.

Вариант электрификации путем расширения объединенных энергосистем для большинства восточных районов страны является нерентабельным [1]. Низкая плотность населения и значительные ресурсы ветровой и солнечной энергии в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке делают перспективным создание электротехнических комплексов малой мощности с комбинированным использованием энергоустановок на возобновляемых источниках энергии (ВИЭ) и органическом топливе [2, 3].

Для нормального функционирования системы электроснабжения с ВИЭ, как и для любой электроэнергетической системы, еще на стадии проектирования необходимо решить вопросы обеспечения устойчивости.

Обоснование выбора подхода к исследованию устойчивости в электротехнических комплексах с возобновляемыми источниками энергии

Исследованиями в области устойчивости электротехнических комплексов занимаются на протяжении десятков лет многие ученые и специалисты. Разработаны решения по обеспечению и повышению устойчивости крупных энергосистем, систем электроснабжения промышленных предприятий и городов [4, 5]. Технические требования, которым должны удовлетворять электроэнергетические системы в отношении устойчивости, содержатся в специальных методических указаниях [6].

Однако это касается только крупных энергосистем. Электротехнические комплексы с ВИЭ обладают рядом важных особенностей:

- нестабильный график выдачи мощности (вследствие случайного характера изменения скорости и плотности ветра);
- нестабильный график нагрузки при соизмеримых мощностях энергоустановок и потребителей.

Данные особенности приводят к необходимости проведения отдельных исследований и разработке собственных решений по оценке и повышению устойчивости систем электропитания с ВИЭ [7].

Объектом исследования является электротехнический комплекс с ветродизельной электростанцией (ВДЭС). Ветровая энергоустановка (ВЭУ) и дизельная электростанция (ДЭС) сопряжены через шину постоянного тока (рис. 1).

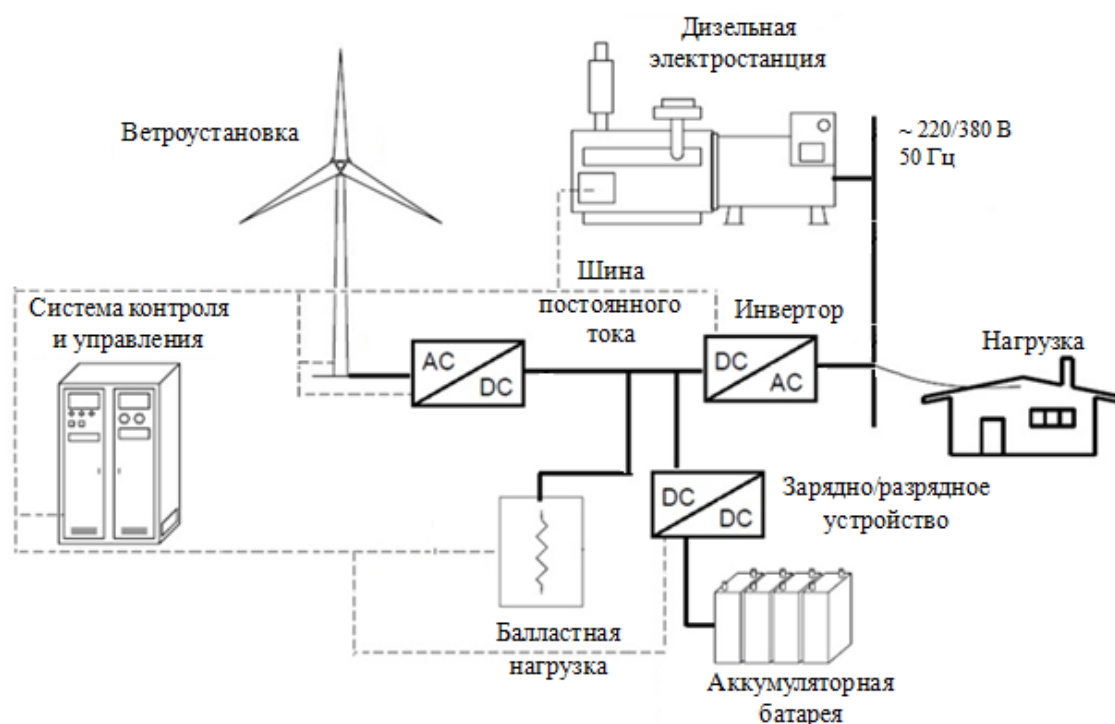


Рис. 1. Структурная схема электротехнического комплекса с ветродизельной электростанцией

Приведенная схема сопряжения источников энергии является наиболее перспективной и распространенной [8]. Электроэнергия от ВЭУ и ДЭС после преобразования поступает на шину постоянного тока, к которой подключены потребители, аккумуляторная батарея и балластная нагрузка. Потребители получают питание через инвертор на переменное напряжение 220/380 В. Аккумуляторная батарея осуществляет отбор мощности в моменты избытка, и отдает ее при нехватке в системе, реализуя, таким образом, функции управления потоками энергии. Не отобранная аккумуляторной батареей мощность в момент избытка рассеивается на балластной нагрузке. Исследуемая система является изолированной, возможность подключения к централизованной сети не рассматривается.

В электротехническом комплексе с ВДЭС, как и в любой электроэнергетической системе, должны обеспечиваться статическая и динамическая устойчивость. Нарушения статической устойчивости связаны с малыми изменениями режима работы системы, при которых отклонения параметров несоизмеримо малы по сравнению со значениями этих параметров. Под динамической устойчивостью понимается способность системы вернуться к установившемуся режиму после нарушений без перехода в асинхронный режим. Причины нарушений устойчивой работы электротехнического комплекса с ВДЭС различны, а последствия могут быть очень серьезными (табл. 1).

Таблица 1

**Причины и последствия нарушения устойчивости электротехнических комплексов
с ветродизельными электростанциями**

Устойчивость	Причины нарушения	Последствия нарушения
Статическая устойчивость	1) изменение генерируемой мощности ветроустановки; 2) незначительное изменение нагрузки	изменение параметров режима работы системы: - напряжение у потребителей; - угол нагрузки; - частота в системе
Динамическая устойчивость	1) неправильный выбор параметров компонентов схемы; 2) нарушения в работе отдельных компонентов; 3) нарушения в работе системы управления; 4) скачкообразные изменения генерируемой мощности ветроустановки и нагрузки	1) недоотпуск электроэнергии; 2) повышенный расход дизельного топлива; 3) нарушение электроснабжения потребителей

Устойчивая работа электротехнического комплекса с ВДЭС должна поддерживаться системой контроля и управления. В последнее время число научных исследований, посвященных управлению режимами электротехнических комплексов с ВИЭ, заметно возросло. Решаются вопросы поддержания баланса токов, обеспечения параллельной работы разнохарактерных энергоустановок, ведения правильного режима заряда/разряда аккумуляторных батарей [9, 10].

Тем не менее, задачи в области повышения устойчивости ВДЭС считать полностью решенными нельзя. В частности, отсутствуют подробное описание взаимосвязи между причинами и последствиями нарушений устойчивости и методика расчета количественных показателей устойчивости. Решение этих задач способствовало бы совершенствованию алгоритмов управления электротехнических комплексов с ВИЭ.

Для оценки устойчивости крупных энергосистем в инженерных расчетах применяются методики практической и математической оценок. Практические критерии основаны на физических представлениях о механизме нарушения устойчивости и позволяют установить предельный режим и границу устойчивости при выбранном способе воздействия на систему электроснабжения. Математическая оценка заключается в исследовании уравнений движения, записанных в виде уравнений малых колебаний [5]. Однако корректное использование классических методик для оценки устойчивости электротехнических комплексов с ВДЭС невозможно. Практические критерии оценки предполагают ряд допущений (напряжение приемной системы постоянно; частота системы постоянна; скорость вращения ротора синхронной машины изменяется в малых пределах от синхронной скорости), которые не правомерны для систем электроснабжения с ВДЭС. При математической оценке возникают проблемы, связанные с невозможностью введения количественных показателей для оценки устойчивости и необходимостью разработки большого числа математических моделей для отдельных компонентов комплекса.

**Имитационная модель электротехнического комплекса
с ветродизельной электростанцией**

Данные недостатки в значительной степени устраняются при использовании имитационного моделирования. В пакете Matlab Simulink разработана имитационная модель электротехнического комплекса с ВДЭС, в котором ВЭУ и ДЭС сопряжены через шину постоянного тока. Блок-схема модели представлена на рис. 2.

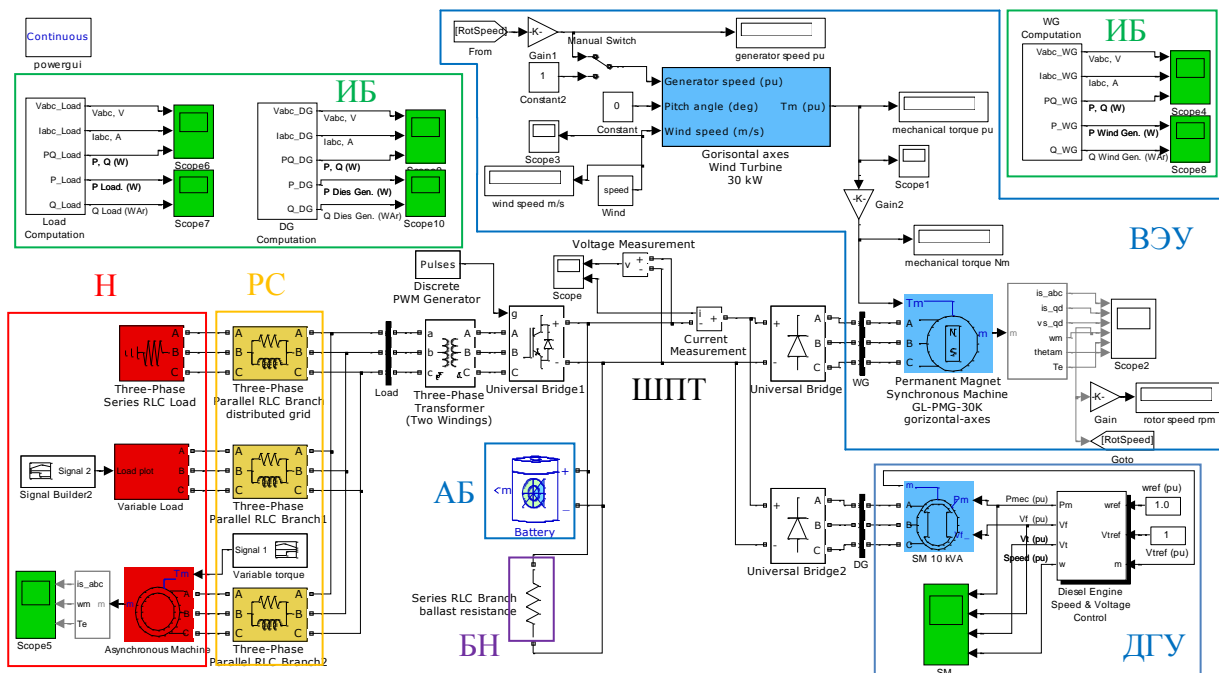


Рис. 2. Имитационная модель электротехнического комплекса с ветродизельной электростанцией:

АБ – аккумуляторная батарея; БН – балластная нагрузка;
 ВЭУ – ветроэлектроустановка; ДГУ – дизель-генераторная установка;
 ИБ – измерительные приборы; Н – нагрузка; РС – распределительная сеть

Имитационная модель включает восемь взаимосвязанных блоков:

- 1) ВЭУ, состоящую из ветротурбины с горизонтальной осью вращения (без редуктора) и синхронного генератора на постоянных магнитах GL-PMG-30K мощностью 30 кВт;
- 2) ДГУ с переменной частотой вращения, состоящую из дизельного двигателя с системой управления и синхронного генератора мощностью 10 кВт;
- 3) блок нагрузки, позволяющий моделировать потребителей электроэнергии тремя различными способами: комплексной активно-индуктивной нагрузкой, графиком нагрузки и с помощью асинхронного двигателя с переменной нагрузкой на валу;
- 4) блок, моделирующий распределительную электрическую сеть (кабельные линии);
- 5) шину постоянного тока, выпрямители, автономные инверторы и коммутационную аппаратуру;
- 6) аккумуляторную батарею;
- 7) балластную нагрузку, заданную активным сопротивлением;
- 8) измерительные приборы для контроля основных электрических величин.

Основными входными переменными имитационной модели являются: скоростной напор ветра и мощность нагрузки. Граничные значения переменных выбраны исходя из поставленных задач по исследованию устойчивости. Для электротехнического комплекса с ВДЭС к нарушению статической устойчивости могут привести незначительные изменения мощности, генерируемой ветроустановкой и/или потребляемой нагрузкой. К нарушению динамической устойчивости приводят аналогичные нарушения, но скачкообразного характера. Поэтому для обеспечения возможности исследования устойчивости при различных режимах работы электротехнического комплекса в имитационной модели предусмотрены возможности изменения скорости ветрового потока от 0 до 10 м/с и мощности нагрузки от 0 до 50 кВт.

В зависимости от соотношения входных переменных моделируемые режимы разделены на три группы:

- 1) потребители получают электроэнергию от ВЭУ, при этом $S_{ВЭУ} \geq S_H$:

- если $S_{ВЭУ} > S_H$, то избыток мощности расходуется на зарядку АБ;
- если $S_{ВЭУ} > S_H$ и заряд батареи максимален $U_{АБ} > \max$, то не использованная мощность рассеивается в балластной нагрузке.

2) питание потребителей осуществляется от ДГУ, при этом $S_{ВЭУ} = 0$ (штиль или ВЭУ отключена);

3) ВЭУ и ДГУ работают параллельно на нагрузку при нехватке мощности ВЭУ ($S_{ВЭУ} \leq S_H$); если $S_{ВЭУ} = S_H$ и заряд АБ ниже минимального значения, то ДГУ включается для заряда АБ.

Построение модели основано на методе итерационных последовательных усложнений. На каждом этапе будет происходить оценка целевых свойств модели, ее верификация и калибровка, т.е. коррекция имитационной модели с целью приведения в соответствии с предъявляемыми требованиями и усложнением [11, 12].

По завершении итерационных усложнений модель будет проверена на корректность. По результатам проверки будут внесены исправления и корректировки до приемлемого уровня. Оценка адекватности разрабатываемой модели будет осуществляться путем ее экспертизы на тестовых данных. Это является неотъемлемым этапом имитационного моделирования, поскольку отсутствие строгой математической модели, как и при любом численном методе, может привести к частному виду результата моделирования.

Выводы

Таким образом, исследование имитационной модели электротехнического комплекса с ВДЭС позволит установить взаимосвязь между причинами и последствиями нарушения устойчивости; оценить устойчивость системы при переходе от одного режима работы к другому. Изменяя величины входных переменных (скоростной напор ветра и мощность нагрузки) в режиме параллельной работы ВЭУ и ДЭС, представляется возможным установить допустимые пределы параметров режима, что позволит скорректировать алгоритмы управления ВДЭС. Система управления, учитывающая контроль параметров устойчивости электротехнического комплекса, повысит надежность и бесперебойность электроснабжения потребителей. Также результаты исследований могут быть использованы при разработке методических указаний по расчету устойчивости в системах с ВИЭ и для создания единых технических требований по подключению ВИЭ к сети.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение №14.574.21.0009 о предоставлении субсидии от 17.06.2014). Уникальный идентификатор проекта RFMEFI57414X0009.

Библиографический список

1. Схемы и программы перспективного развития ЕЭС // Системный оператор Единой энергетической системы [Электронный ресурс]. URL: <http://so-ups.ru> (дата обращения: 10.11.2014)
2. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года // Утверждена Расп. Прав. РФ от 13 ноября 2009 года № 1715-р. – М., 2009.
3. **Филиппов, С. П.** Перспективы применения электрогенерирующих установок малой мощности / С. П. Филиппов // Атомная энергия. 2011. №5.
4. **Веников, В.А.** Переходные электромеханические процессы в электрических системах / В.А. Веников. – М.: Высш. шк., 1985. – 536 с.
5. **Жданов, П.С.** Вопросы устойчивости электрических систем / под ред. Л.А. Жукова. – М.: Энергия, 1979. – 456 с.
6. СО 153-34.20.576-2003. Министерство энергетики Российской Федерации. Методические указания по устойчивости энергосистем. Правила и инструкции. Утв. 2003-06-30. – М.: НЦ ЭНАС, 2004. – 15 с.
7. **Sosnina, E.** Research of static stability of autonomous power supply system with wind-diesel power

- plant / E. Sosnina., A. Shalukho, I. Lipuzhin // The challenges of contemporary science. Theory and applications. – Warsaw, 2014. P. 61–62.
8. **Обухов, С.Г.** Сравнительный анализ схем автономных электростанций, использующих установки возобновляемой энергетики / С.Г. Обухов, И.А. Плотников // Промышленная энергетика. 2012. Вып. 7. С. 46–51.
 9. **Сарсикеев, Е.Ж.** Математическая модель ветротурбины малой мощности в MATLAB SIMULINK // Альтернативная энергетика и экология: Международный научный журнал. 2012. №2. С. 42–48.
 10. **Куфтин, Д.С.** Повышение устойчивости систем внутреннего электроснабжения с собственной генерацией при соизмеримой с нагрузкой мощностью: дисс. ... канд. техн. наук / Куфтин, Д.С. – М., 2013. – 181 с.
 11. **Замятина, О.М.** Компьютерное моделирование: учеб. пособие / О.М. Замятина. – Томск: ТПУ, 2007. – 121 с.
 12. **Евдокунин, Г.А.** Принципы имитационного моделирования процессов в электроэнергетических системах / Г.А. Евдокунин, Е.Н. Попков // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. Т5(181). С. 46–49.

*Дата поступления
в редакцию 12.02.2015*

E.N. Sosnina¹, A.V. Skalukho¹, S.A. Anisimov², I.A. Lipuzhin¹, A.A. Smirnov¹

RESEARCH OF STABILITY OF ELECTROTECHNICAL COMPLEXES WITH WINDDIESEL POWER PLANTS

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev¹,
LLC «Tecom»², Nizhny Novgorod

Purpose: Research of questions of stability of an electrotechnical complex with winddiesel power plant.

Methodology: Authors proposed approach to evaluating the sustainability of the electrotechnical complex with wind-diesel power plant based on simulation.

Results: The article presents the stages of development of a simulation model of electrotechnical complex with wind-diesel power plant. Block diagram of the modeled system is shown, model parts and their parameters are described, the range of variation of values proved and modeled modes are listed. The advantages and disadvantages of using simulation to solve the problem noted in the conclusions.

Key words: Electrotechnical complex, winddiesel power plant, imitating model, static stability, dynamic stability.