

УДК 621.311

Исследование адекватности математической модели электроэнергетической системы Республики Йемен

М.С. Аль-Хомиди, А.И. Кулешов, В.А. Шуин
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: shuin@rza.ispu.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Особенности электроэнергетической системы Республики Йемен являются большая протяженность воздушных линий электропередачи системообразующей сети напряжением 132 кВ, относительно небольшая мощность и ограниченное число электростанций в структуре генерирующей части энергосистемы, что создает возможность перегрузки связей, недопустимых отклонений напряжения в узлах, нарушений статической устойчивости, уменьшающих режимную и оперативную надежность электроэнергетической системы. В связи с этим исследование режимов работы электроэнергетической системы Республики Йемен в целях разработки методов и средств повышения надежности ее функционирования является актуальной задачей.

Материалы и методы: Наиболее эффективным методом решения указанной задачи является математическое моделирование. Для разработки математической модели электрической сети 132 кВ электроэнергетической системы Республики Йемен применен программный комплекс «Энергия», предназначенный для расчета и анализа установившихся режимов работы энергосистем.

Результаты: Разработана имитационная модель электрической сети 132 кВ. Адекватность разработанной имитационной модели подтверждена сопоставлением результатов вычислительных экспериментов, выполненных на модели, и параметров реальных режимов работы электроэнергетической системы Республики Йемен.

Выводы: Разработанная имитационная модель обеспечивает возможность расчетов перетоков мощности в линиях электропередачи и напряжений в узлах электрической сети 132 кВ в установившихся режимах работы с погрешностями, не превышающими 5 %, и может быть использована для решения задач управления и развития электроэнергетической системы Республики Йемен.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, режимы работы электроэнергетической системы, имитационное моделирование, адекватность математической модели.

Study of the adequacy of mathematical models in electric power systems of the Republic of Yemen

M.S. Al-Homidi, A.I. Kuleshov, V.A. Shuin
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: shuin@rza.ispu.ru

Abstract

Background: The main distinguishing features of the electrical power system of the Republic of Yemen are: a considerable length of overhead power lines of the 132 kV backbone network, a relatively small capacity and a limited number of power plants in the generating parts of the power system, which may lead to connections overload, unacceptable voltage fluctuations in the nodes, loss of static stability, distortion of the regime and operational reliability of the electric power system. Therefore, research should be made into the modes of the Electrical Power System of the Republic of Yemen in order to develop methods and tools to improve its operation reliability.

Materials and Methods: The most effective method of solving this problem is mathematical modeling. To develop a mathematical model of the Electric Power System of the Republic of Yemen in the given work, we used the software package «Energy» designed to calculate and analyze the steady state operation of electric power systems. The main purpose of this work was to estimate the adequacy and accuracy of the calculations of the steady state operation of the Electric Power System using the developed simulation model.

Results: The adequacy of the developed simulation model of the 132 kV electrical network has been confirmed by comparing the results of the computational model experiments and real operation mode parameters of the Electric Power System of the Republic of Yemen.

Conclusion: The developed simulation model allowed us to calculate the overflows of power in grid lines and voltages at the nodes of the 132 kV electrical network of the Republic of Yemen in steady state modes, with an error not exceeding 5 %, and can be used to solve the management and development problems of the Electric Power System of The Republic of Yemen.

Key words: electric power system, power system operation modes, mathematical model, simulation models, adequacy of mathematical models.

Введение. Характерными особенностями электроэнергетической системы (ЭЭС) Рес-

публики Йемен (РЙ) на данном этапе развития экономики страны являются неравномерность

территориального распределения нагрузки и значительная удаленность генерирующих источников от потребителей.

В структуру генерирующей части ЭЭС входят (рис. 1): 3 ТЭС (Ras Katenib Mukha и Hiswa) с установленной мощностью $P_{\Gamma} = 125\text{--}160$ МВт; 3 дизельные электростанции – ДЭС (Mukha, Sana, Taiz) с $P_{\Gamma} = 14\text{--}100$ МВт. В этих условиях основным источником, обеспечивающим рост электропотребления в стране, является новая парогозовая электростанция (ПГЭС) Marib с установленной на данном этапе мощностью $P_{\Gamma} = 260$ МВт, расположенная на Севере центральной части страны.

Разработанный по заданию национальной энергетической компании (Office National de L'Electric ale) проект развития электроэнергетики РЙ предусматривает до 2025 г. электрификацию 40 тыс. населенных пунктов по всей территории страны и рост электропотребления в городах Йемена к 2025 г. в 2–3 раза по сравнению с 2010 г. Удовлетворить указанный рост электропотребления во всех регионах страны в перспективе до 2025 г. можно только за счет увеличения установленной мощности парогозовой электростанции Marib.

Основной системообразующей электрической сетью ЭЭС Республики Йемен в настоящее время является сеть напряжением 132 кВ, связанная через подстанцию (ПС) 400/132 кВ Sana двумя параллельными линиями 400 кВ длиной 230 км с ПГЭС Marib. Главной особенностью электрической сети 132 кВ, оказывающей большое влияние на статическую режимную надежность ЭЭС РЙ, является большая протяженность ее ЛЭП. Практически все ЛЭП электрической сети 132 кВ представляют собой воздушные параллельные двухцепные линии, выполненные проводом сечением 400 мм. Протяженность отдельных ЛЭП 132 кВ достигает значений 150–200 км (табл. 1).

Таблица 1. Наиболее протяженные ЛЭП электрической сети 132 кВ

Наименование ЛЭП	Общая длина, км
ПС Bajil – ПС Damar	152,3
ПС Damar – ПС Hiziaz	102
ПС Bajil – ТЭС Mukha	212,2
ТЭС Mukha – ПС Taiz	105,5
ПС Damar – ПС Taiz	133
ПС Rahida – ПС Hiswa	111,8

С учетом рассмотренных особенностей ЭЭС и системообразующей электрической сети 132 кВ РЙ и перспектив значительного роста электропотребления уже в ближайшие годы можно ожидать проблем с обеспечением режимной статической надежности, надежности оперативного диспетчерского управления, надлежащего качества электроэнергии и экономичности работы системы. Решение указанных задач необходимо при разработке и выборе мероприятий как на этапе прогнозирования и планирования развития ЭЭС, так и на этапе оперативного управления режимами ее работы и базируется на результатах расчетов и анализа установившихся режимов работы [1–3].

В современной российской и зарубежной практике при планировании и прогнозировании развития электрических сетей, а также при управлении текущими и краткосрочными режимами ЭЭС обязательной процедурой является моделирование проектных и эксплуатационных нормальных и послеаварийных статических режимов работы для выявления и устранения возникающих отклонений параметров режима от допустимых значений [4–6]. Поэтому актуальной для энергетики РЙ является задача создания адекватной математической модели для расчета и анализа статических нормальных и послеаварийных режимов.

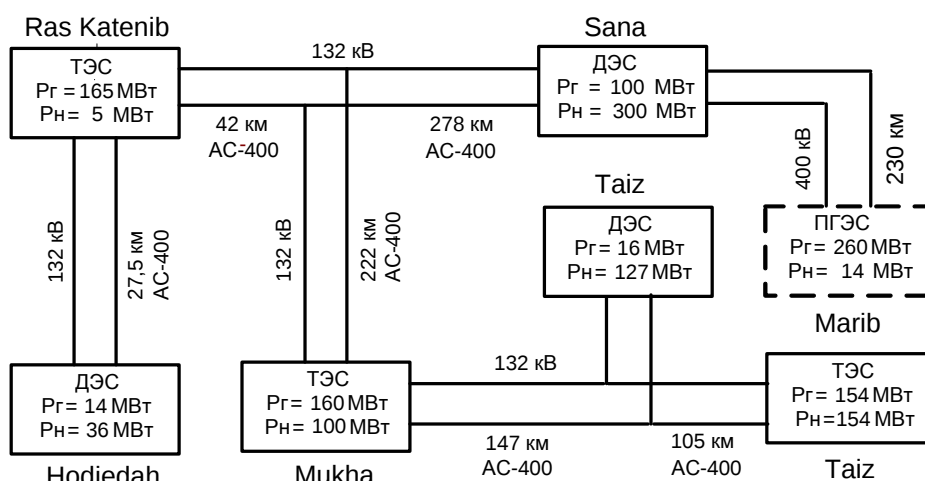


Рис. 1. Структура электрических сетей между электростанциями Республики Йемен

Математическая модель для исследования установившихся режимов работы ЭЭС Республики Йемен. Для разработки математической модели ЭЭС РЙ применен объектно-ориентированный программный комплекс имитационного моделирования «Энергия», предназначенный для расчетов и анализа установившихся режимов работы электрических сетей [7–9]. В программном комплексе «Энергия» реализован принцип структурного моделирования, обеспечивающий возможность «сборки» структурной схемы модели исследуемой электрической сети из типовых блоков, имитирующих источники питания (генераторы, электротехнические системы), ЛЭП, выключатели, трансформаторы, реакторы, синхронные и статические тиристорные компенсаторы, нагрузку в узлах и другие элементы. Формирование математической модели электрической сети в форме уравнений узловых напряжений по уравнениям (математическим моделям) составляющих ее элементов и связей между ними осуществляется автоматически по заданной структурной схеме и параметрам ее элементов. Для решения системы нелинейных уравнений используется метод Ньютона.

Математическая модель ЭЭС РЙ выполнена с соответствии с полной реальной схемой электрических сетей напряжением 132 и 400 кВ (рис. 2). Параметры элементов модели определялись на основе предоставленных по за-

просу ИГЭУ Министерством энергетики РЙ реальных данных генераторов, трансформаторов и ЛЭП, активных и реактивных нагрузок подстанций и электростанций.

Проверка адекватности и оценка точности результатов расчета режимов работы ЭЭС РЙ с использованием разработанной модели. Адекватность разработанной модели и точность полученных на ее основе результатов расчетов установившихся режимов ЭЭС РЙ оценивались их сравнением с реальными данными измерений перетоков мощности по ЛЭП и напряжений в узлах сети 132 кВ на 03.07.2010 г. и 01.08.2012 г.

Для этого было выполнено параметрирование («настройка») модели по нагрузкам подстанций и электростанций и режимам работы ЛЭП сети 132 кВ, имевшим место на указанные выше даты. Необходимые для параметрирования модели исходные данные и результаты реальных измерений параметров режимов работы энергосистемы были предоставлены Министерством энергетики РЙ.

В табл. 2, 3 представлены результаты сравнения расчетных и реальных перетоков активной мощности по ЛЭП сети 132 кВ на 03.07.2010 г. и 01.08.2012 г., в табл. 4, 5 – результаты сравнения расчетных и реальных напряжений в узлах сети 132 кВ на указанные даты.

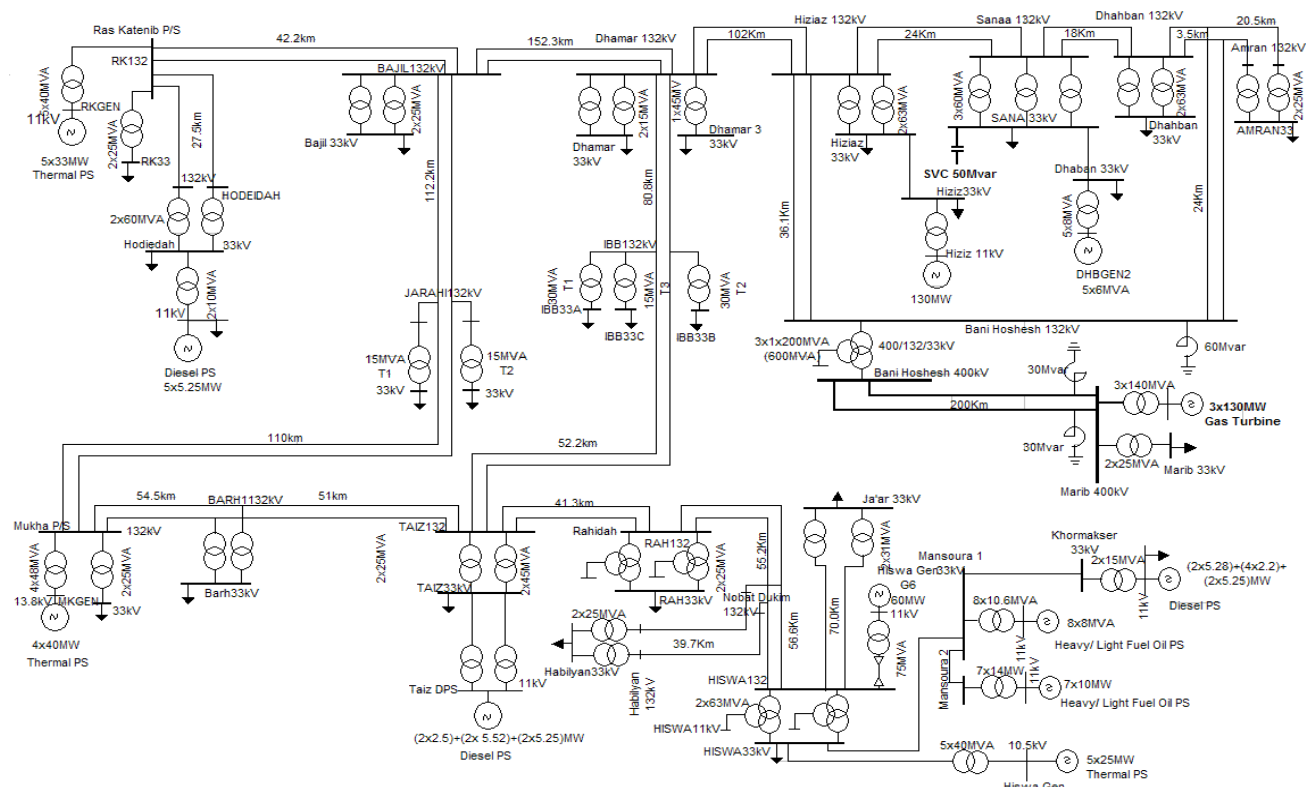


Рис. 2. Схема электрических сетей напряжением 132 и 400 кВ ЭЭС РЙ

Таблица 2. Сравнение реальных и расчетных перетоков активной мощности по ЛЭП 132 кВ ЭЭС РЙ на 03.07.2010 г.

Наименование ЛЭП сети 132 кВ	$P_{изм},$ МВт	$P_{расч},$ МВт	$\Delta P_{\%} =$ $=100 \cdot \Delta P / P_{изм},$ %
Ras Katenib-Bajil	80,00	80,00	0,00
Ras Katenib-Hodiedah	36,00	36,40	-1,11
Bajil-Dhamar	64,00	65,80	-2,81
Bajil-Jarahi	0,00	0,00	0,00
Mukha-Jarahi	18,00	18,70	-3,89
Mukha-Barh	104,00	104,50	-0,48
Barh-Taiz	100,00	98,80	1,20
Taiz-Rahida	38,00	37,20	2,11
Taiz-Ibb	18,00	17,20	4,44
Dhamar-Ibb	17,00	18,17	-6,88
Hiziaz-Dhmar	4,00	4,14	-3,50
Gader-Amran	20,00	20,00	0,00
Marib- Bani hoshesh	203,00	203,00	0,00
Rahida-Nobat Dukim	29,00	29,00	0,00
Nobat Dukim-Habilyan	28,00	28,00	0,00
Nobat Dukim-Hiswa	0,00	0,00	0,00

Таблица 3. Сравнение реальных и расчетных перетоков активной мощности по ЛЭП 132 кВ ЭЭС РЙ на 01.08.2012 г.

Наименование ЛЭП сети 132 кВ	$P_{изм},$ МВт	$P_{расч},$ МВт	$\Delta P_{\%} =$ $=100 \cdot \Delta P / P_{изм},$ %
Ras Katenib-Bajil	4,00	4,18	-4,50
Ras Katenib-Hodiedah	50,00	49,80	0,40
Bajil-Dhamar	24,00	23,80	0,83
Bajil-Jarahi	0,00	0,00	0,00
Mukha-Jarahi	17,68	17,56	0,68
Mukha-Barh	69,00	69,20	-0,29
Barh-Taiz	68,00	67,80	0,29
Taiz-Rahida	88,00	87,80	0,23
Taiz-Ibb	66,00	66,00	0,00
Dhamar-Ibb	106,00	105,40	0,57
Hiziaz-Dhmar	152,00	151,80	0,13
Gader-Amran	25,20	25,20	0,00
Marib- Bani hoshesh	298,00	298,00	0,00
Rahida-Nobat Dukim	40,00	40,00	0,00
Nobat Dukim-Habilyan	17,00	17,00	0,00
Nobat Dukim-Hiswa	63,00	63,40	-0,63

Анализ данных табл. 2–5 показывает, что расхождение расчетных и реальных значений перетоков мощности и напряжений в узлах не превышает нескольких процентов, что является подтверждением адекватности модели и достоверности получаемых на ее основе расчетных результатов. Это обеспечивает возможность применения разработанной модели для исследования установившихся режимов работы ЭЭС РЙ и разработки на их основе методов и средств повышения ее режимной надежности.

Таблица 4. Сравнение реальных и расчетных значений напряжений в узлах сети 132 кВ ЭЭС РЙ на 03.07.2010 г.

Наименование узла (ПС сети 132 кВ)	$U_{изм},$ кВ	$U_{расч},$ кВ	$\Delta U_{\%} =$ $=100 \cdot \Delta U / U_{изм},$ %
Ras Katenib	136,00	137,00	-0,74
Hodiedah	132,00	135,00	-2,27
Bajil	134,00	135,00	-0,75
Jarahi	136,00	135,00	0,00
Mukha	136,00	136,00	0,00
Barh	133,00	130,00	2,26
Taiz	126,00	124,00	1,59
Rahida	124,00	123,00	0,81
Ibb	125,00	126,00	-0,80
Dhamar	131,00	129,00	1,53
Hiziaz	132,00	131,00	0,76
Amran	132,00	132,00	0,00
Bani hoshesh	134,00	134,00	0,00
Nobat Dukim	122,00	122,00	0,00
Habilyan	122,00	120,00	1,64
Hiswa	120,00	122,00	-1,67
Sana	132	131	0,76
Dhahban	132	132	0,00

Таблица 5. Сравнение реальных и расчетных значений напряжений в узлах сети 132 кВ ЭЭС РЙ на 01.08.2012 г.

Наименование узла (ПС сети 132 кВ)	$U_{изм},$ кВ	$U_{расч},$ кВ	$\Delta U_{\%} =$ $=100 \cdot \Delta U / U_{изм},$ %
Ras Katenib	128,00	128,00	0,00
Hodiedah	125,00	127,00	-1,60
Bajil	127,00	127,00	0,00
Jarahi	134,00	134,00	0,00
Mukha	136,00	136,00	0,00
Barh	128,00	128,00	0,00
Taiz	114,00	119,00	-4,39
Rahida	112,00	115,00	-2,68
Ibb	116,00	119,00	-2,59
Dhamar	122,00	124,00	-1,64
Hiziaz	131,00	131,00	0,00
Amran	132,00	132,00	0,00
Bani hoshesh	134,00	134,00	0,00
Nobat Dukim	112,00	110,00	1,79
Habilyan	109,00	109,00	0,00
Hiswa	110,00	106,00	3,64
Sana	132	131	0,76
Dhahban	132	132	0,00

Заключение

Разработанная с использованием программного комплекса «Энергия» модель ЭЭС Республики Йемен для исследования установившихся режимов ее работы, прошедшая проверку на адекватность и точность результатов расчетов перетоков мощности по ЛЭП и напряжений в узлах системообразующей сети 132 кВ, может быть использована для решения задач развития и управления ЭЭС Республики Йемен.

Список литературы

1. **Маркович И.М.** Режимы энергетических систем. – М.: Энергия, 1969.
2. **Справочник** по проектированию электроэнергетических систем / под ред. С.С. Рокотяна и И.М. Шапиро. – М.: Энергия, 1977.
3. **Надежность** электроэнергетических систем. Справочник. Т. 2 / под ред. М.И. Розанова. – М.: Энергоатомиздат, 2000.
4. **Reability** standards for the bulk electric systems of North America. NERC, 2007 // URL: <http://www.nerc.com>.
5. **Operation** handbook. – UCTE, 2006 // URL: <http://www.ucte.org>.
6. **On line** power system security analysis / N. Balu, T. Bertran, A. Bose et. al // Proceedings of the IEEE. – Feb., 1992. – Vol. 80, № 2. – P. 262–280.
7. **Полуботко Д.В., Чукреев Ю.Я.** Методические подходы к анализу статической режимной надежности региональной ЭЭС с использованием средств параллельных вычислений // Электро. – 2010. – № 2. – С. 9–13.
8. **Кулешов А.И., Прахин Б.Я.** Расчет и анализ установившихся режимов электроэнергетических систем на персональных компьютерах: учеб. пособие / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2005.
9. **Аль-Хомиди М.С., Кулешов А.И., Шуйн В.А.** Математическая модель для исследования режимной надежности электроэнергетической системы Республики Йемен // Тезисы докл. Междунар. науч.-техн. конф. «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XVI Бенардосовские чтения). – Иваново, 2011. – С. 115.
2. **Spravochnik po proektirovaniyu elektroenergeticheskikh system** [Guide for the design of electrical power systems]. Moscow, Energiya, 1977.
3. **Nadezhnost' elektroenergeticheskikh sistem. Spravochnik** [The reliability of electric power systems: Reference guide]. Moscow, Energoatomizdat, 2000.
4. Reability standards for the bulk electric systems of North America. NERC, 2007. URL: <http://www.nerc.com>.
5. Operation handbook. – UCTE, 2006. URL: <http://www.ucte.org>.
6. Balu, N., Bertran, T., Bose, A. On line power system security analysis. Proceedings of the IEEE, Feb., 1992, Vol. 80, no. 2, pp. 262–280.
7. Polubotko, D.V., Chukreev, Yu.Ya. Elektro, 2010, no. 2, pp. 9–13.
8. Kuleshov, A.I., Prakhin, B.Ya. Raschet i analiz ustannovivshikhsya rezhimov elektroenergeticheskikh sistem na personal'nykh komp'yuterakh [Calculation and analysis of steady-state modes of electric power systems on personal computers]. Ivanovo, 2005.
9. Al'-Khomidi, M.S., Kuleshov, A.I., Shuin, V.A. Matematicheskaya model' dlya issledovaniya rezhimnoy nadezhnosti elektroenergeticheskoy sistemy Respubliki Yemen [Mathematical model for the investigation the reliability of the modes of the power system of The Republic of Yemen]. Tezisy dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Sostoyanie i perspektivy razvitiya elektrotekhnologii» (XVI Benardosovskie chteniya) [Abstracts of the international scientific conference «State and prospects of development of electrotechnology» (XVI Benardosovskie reading)]. Ivanovo, 2011, p. 115.

References

1. Markovich, I.M. *Rezhimy energeticheskikh sistem*. [Modes of energy systems]. Moscow, Energiya, 1969.

Марван Саид Аль-Хомиди,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
аспирант кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами,
телефон (4932) 26-99-05,
e-mail: maroan_2008@mail.ru

Кулешов Анатолий Иванович,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры электрических систем,
телефон (4932) 26-19-21,
e-mail: es@es.ispu.ru

Шуйн Владимир Александрович,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами,
телефон (4932) 26-99-05,
e-mail: shuin@rza.ispu.ru