

МОДЕЛИ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА НАДЕЖНОСТИ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ОТДАЛЕННЫХ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ

Губий Е. В.¹, Зоркальцев В. И.²
(ФГБУН Институт систем энергетики
им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск)

Рассматриваются математические модели для анализа надежности энерго-снабжения отдаленных населенных пунктов. Предложен трехуровневый комплекс вложенных моделей. Нижний уровень представляет модель функционирования системы энергоснабжения отдаленного населенного пункта в течение рассматриваемого периода времени. Второй уровень представляет модель анализа надежности энергоснабжения. Этот анализ базируется на многократной имитации функционирования системы энергоснабжения в случайно формируемых условиях. В качестве случайных рассматриваются величины потребности и производства энергии, а также величина переходящих запасов энергии в накопителях. Значения величин потребности и производства энергии для имитаций функционирования формируются методом Монте-Карло из заданных законов вероятности этих величин. Случайная величина переходящих запасов энергии формируется по алгоритму, который вырабатывает марковскую последовательность этих запасов. Верхний уровень представляет модель выбора оптимального состава средств обеспечения надежности – резервов мощности в производстве энергии и емкости хранилищ энергии. Минимизируется математическое ожидание суммы приведенных затрат на функционирование системы энергообеспечения и ущербов от дефицита. Значения такой целевой функции при заданном составе средств обеспечения надежности определяются в результате цикла расчетов на модели анализа надежности. Представлены результаты исследований надежности топливоснабжения с энергетической плантации отдаленного населенного пункта в природно-климатических условиях прибрежных районах оз. Байкал.

Ключевые слова: запасы энергоресурсов, метод Монте-Карло, надежность энергоснабжения, резервы мощности, случайный процесс.

1. Введение

В данной статье представлены модели, разрабатываемые для анализа и оптимизации эффективности и надежности энер-

¹ Елена Валерьевна Губий, старший инженер (egubiy@gmail.com).

² Валерий Иванович Зоркальцев, д.т.н., профессор (zorka@isem.irk.ru).

госнабжения отдаленных населенных пунктов из источников, для которых характерны сильные действия случайных факторов. Этим свойством обладают системы энергообеспечения отдаленных населенных пунктов из возобновляемых источников энергии. Это системы топливоснабжения на основе биомассы, выращиваемой на специальных энергетических плантациях, локальные электроэнергетические системы, использующие энергию ветра и солнца. Значительные флуктуации в производстве энергии в этих случаях возникают в основном из-за колебаний природно-метеорологических условий (температуры воздуха, силы ветра, солнечной радиации).

При этом возможны значительные отклонения от средних ожидаемых значений потребности в энергии населенного пункта. Они могут быть вызваны изменениями природно-климатических условий, производственных нужд и др. составляющих потребности.

При возникновении неблагоприятных условий из-за повышенной потребности или пониженного объема вырабатываемой энергии возможны ситуации дефицита, которые могут сопровождаться экономическими ущербами, например из-за необходимости дорогостоящих экстренных поставок дополнительного топлива из удаленных источников в данный населенный пункт или использования электроэнергии из дорогостоящих источников (дизельные электростанции).

Кроме указанных двух случайных экзогенных показателей следует учитывать еще и третий случайный фактор – величину переходящих запасов энергии. Если в какой-то из периодов потребление энергии оказывается ниже среднего значения и (или) объем произведенной энергии оказывается выше среднего ожидаемого значения, то производство энергии в данном периоде может превысить потребность. Тогда разница между объемами производства и потребления переходит в качестве запаса в следующий период. Для локальных систем электроснабжения в качестве таких накопителей энергии могут служить аккумуляторы электроэнергии либо запасы воды в гидроаккумулирующих электростанциях.

При возникновении обратных ситуаций, когда потребление превышает производство, используются имеющиеся запасы. Возможна ситуация, когда эти запасы исчерпаны, тогда возникает ситуация дефицита энергоресурсов, который может покрываться из более дорогих по стоимости поставляемой энергии источников. Для локальных систем электроснабжения в качестве таких дополнительных источников могут служить дизельные электростанции. Для систем снабжения котельно-печным топливом в качестве дополнительного источника можно рассматривать, как отмечалось выше, привлечение дальнепривозного дорогого топлива.

В качестве средств обеспечения надежности энергоснабжения рассматриваются создание резервов мощности в производстве энергии из анализируемого источника γ и создание накопителей энергии емкостью z для хранения переходящих запасов. Величины γ и z являются оптимизируемыми показателями. Обе эти переменные будут рассматриваться как безразмерные величины, измеряемые в долях от величины математического ожидания потребности в энергии за рассматриваемый единичный период времени.

Пусть \bar{Q} – математическое ожидание потребности в данном виде энергии населенного пункта в рассматриваемую единицу времени, \bar{R} – математическое ожидание производства энергии за единицу времени. Резерв мощностей измеряется в виде относительного превышения математического ожидания производства энергии над математическим ожиданием потребности данного населенного пункта в рассматриваемую единицу времени:

$$(1) \quad \gamma = (\bar{R} - \bar{Q}) / \bar{Q}.$$

2. Система вложенных моделей для анализа и оптимизации средств обеспечения надежности обеспечения топливом отдаленных населенных пунктов с энергетических плантаций

Для анализа и оптимизации средств обеспечения надежности энергоснабжения отдаленных населенных пунктов предложена система из трех последовательно вложенных моделей [2] (см. рис. 1): имитационная модель функционирования системы энергоснабжения в течение одного рассматриваемого периода; модель анализа надежности; модель синтеза надежности энергосистемы (оптимизации состава средств резервирования). Далее рассмотрим эти модели применительно к задаче анализа и выбора оптимального состава средств обеспечения надежности топливоснабжения с энергетических плантаций отдаленного населенного пункта. Конкретно эти исследования производились в целях выбора экологически чистых и экономически эффективных вариантов обеспечения топливом туристическо-рекреационной зоны побережья озера Байкал.

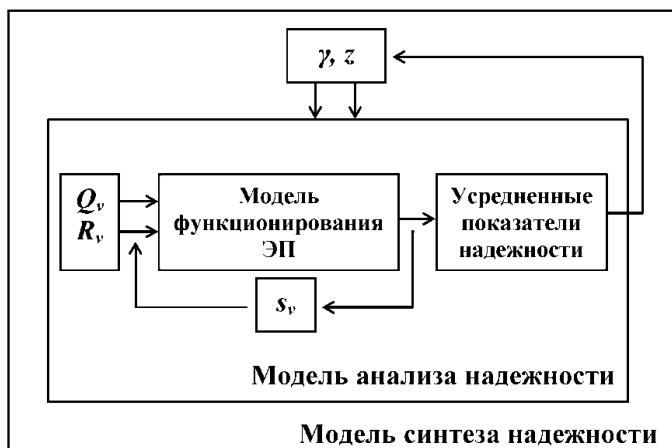


Рис. 1. Система вложенных моделей анализа и синтеза надежности энергоснабжения

В этих моделях рассматриваются три случайные величины: годовая потребность, годовой объем производства и переходящие из года в год (из одного отопительного периода в другой) запасы топлива. Экзогенными для расчетов являются величины математического ожидания годовой потребности в энергии \bar{Q} , удельные ущербы от дефицита топлива μ , удельные потери при хранении α . В качестве экзогенных используются также рассчитываемый на специальной модели [3, 4] прирост затрат $\Delta C(\gamma, z, R_v, s_v)$, связанных с созданием средств обеспечения надежности и со складывающейся в данном году ситуацией с объемами производства и переходящими запасами топлива.

Верхний уровень системы вложенных моделей представляет **модель оптимизации состава средств обеспечения надежности (синтеза надежности) энергоснабжения**. В модели синтеза надежности исследуется и решается двухпараметрическая задача оптимизации

$$(2) \quad F(\gamma, z) \rightarrow \min,$$

$$(3) \quad \gamma \geq 0,$$

$$(4) \quad z \geq 0.$$

Здесь $F(\gamma, z)$ – функция математического ожидания суммы затрат на обеспечение надежности и ущербов от дефицита. Ее значение определяется в результате расчетов на модели анализа надежности энергоснабжения.

Оптимизация осуществляется путем сопоставления значений функции $F(\gamma, z)$ при последовательном варьировании значения каждого из аргументов (например, методом покоординатного спуска). Для решения задачи одномерной оптимизации может применяться метод золотого сечения. В целях анализа последствий объективно имеющейся неопределенности исходных данных используется детальный анализ диапазонов значений переменных путем варьирования с равномерной сеткой аргументов оптимизируемой функции, а также варьирование некоторых экзогенных параметров системы модели.

Модель анализа надежности основывается на многократной имитации функционирования системы топливоснабжения

в течение одного года, начинающегося и заканчивающегося осенью в начале отопительного периода. Обозначим $v = 0, \dots, V$ – номер итерации имитации.

Выбор для данной итерации величин потребности в топливе Q_v и производства топлива R_v реализуется методом Монте-Карло, исходя из заданных законов вероятности этих случайных величин. Расчетно определяется математическое ожидание потребности в топливе данного населенного пункта. Возможные отклонения потребности от математического ожидания и вероятности их реализаций рассчитываются на основе располагаемых данных [6] многолетних наблюдений температур зимнего периода в данном районе [1, 10]. Математическое ожидание производства топлива является оптимизируемым и, следовательно, варьируемым параметром, поскольку в эту величину \bar{R} , согласно (1), входит искомая величина резерва мощности в производстве топлива с энергетических плантаций. Возможные отклонения производства топлива (вследствие изменчивости природных условий и человеческого фактора) от математического ожидания в представленных ниже результатах расчета описываются в виде усеченного нормального закона распределения с варьируемой экспертно оцениваемой дисперсией.

Выбор случайной величины переходящих запасов осуществляется по специальному алгоритму в рамках имитационной модели функционирования энергосистемы. На имитационной модели рассчитываются показатели, характеризующие функционирование энергосистемы на каждой итерации. После прохождения всех итераций рассчитываются обобщающие показатели надежности и усредненных затрат энергоснабжения. Приведем некоторые из них.

1. Математическое ожидание дефицита

$$(5) \quad MD = \frac{1}{V} \sum_{v=1}^V D_v,$$

где D_v – величина дефицита на итерации v .

2. Оценка вероятности появления дефицитных ситуаций

$$(6) \quad PD = \frac{TD}{V},$$

где TD – количество номеров испытаний, при которых возникает дефицит, рассчитывается по формуле

$$(7) \quad TD = \sum_{v=1}^V \text{sgn}(D_v).$$

Здесь

$$(8) \quad \text{sgn}(D_v) = \begin{cases} 1, & \text{если } D_v > 0, \\ 0, & \text{если } D_v \leq 0. \end{cases}$$

3. Математическое ожидание суммы затрат на обеспечение надежности и ущербов от дефицита

$$(9) \quad F(\gamma, z) = \mu MD + \frac{1}{V} \sum_{v=1}^V \Delta C_v(\gamma, z, R_v, s_v),$$

где μ – удельные ущербы (включают в себя стоимость привозного топлива и стоимость его экстренной транспортировки до места потребления при возникновении дефицита).

Имитационная модель функционирования системы топливоснабжения. Обозначим через u_v остатки запасов энергии после итерации v . Задано значение $u_0 \geq 0$. Величина запасов, переходящих в следующий период, определяется исходя из известной величины остатков предыдущего периода:

$$(10) \quad s_v = \min \{ (1 - \alpha) \cdot u_{v-1}; z \}, \quad v = 0, \dots, V.$$

В этом выражении учитываются потери при хранении энергии α и ограниченность емкости накопителя запасов энергии z .

Величина располагаемых ресурсов определяется как сумма произведенного топлива и запасов, перешедших из предыдущего периода:

$$(11) \quad RR_v = R_v + s_v.$$

Величина дефицита определяется по формуле

$$(12) \quad D_v = (Q_v - RR_v)_+.$$

Согласно этой формуле, в тех случаях, когда потребность превышает располагаемые ресурсы, образуется дефицит. Иначе дефицит равен нулю. Здесь функция $(x)_+$ от вещественного x является неотрицательной срезкой: $(x)_+ = \max\{0, x\}$.

Остаток энергии образуется в случае, когда потребность в энергии меньше располагаемых ресурсов:

$$(13) u_v = (RR_v - Q_v)_+.$$

3. Экспериментальные исследования на моделях анализа и синтеза надежности топливоснабжения

Представим некоторые результаты исследований на моделях анализа и синтеза надежности энергоснабжения на примере теплоснабжения отдаленного населенного пункта на побережье оз. Байкал в Иркутской области биотопливом со специальных энергетических плантаций.

Одним из способов получения древесной биомассы является создание искусственных плантаций быстрорастущих растений. Плантации энергетических растений представляют собой участки искусственных насаждений, разделенные на секторы. Количество секторов равно сроку созревания древесины, выраженному в годах. Посадки на энергетических плантациях на каждом секторе производятся осенью с помощью специальных посадочных машин. Заготовительные работы производятся в весенний период. Древесные породы растений для энергетических плантаций должны быть быстро растущими, устойчивыми к биотическим и абиотическим стрессам, иметь пригодное для переработки качество древесины. Как правило, для создания энергетических плантаций рекомендуется в зоне умеренного климата использовать растения семейства ивовых (*Salicaceae*). Не имея надежных данных о продуктивности энергетических плантаций в условиях Сибири, в данном исследовании эта величина принята равной 5 т у.т./га за 6 лет (что в 2 раза меньше продуктивности в центральной части России [8] и в Республике Беларусь [7] и в 6 раз ниже, чем в Швеции [9, 11]). Можно считать, что используемое в данном исследовании значение продуктивности энергетических плантаций является вполне достижимым в условиях Восточной Сибири. В настоящее время в Иркутске в СИФИБР СО РАН работают над выведением культур, которым свойственны такие качества как ускоренный рост, устойчивость к вредителям и др. [12]. Однако пока исследования находятся на начальном этапе, и данных о приросте биомассы взрослых деревьев нет. Можно предположить, что развитие работы в этом направлении

и применение эффективных агротехнологий должны привести к более высокому значению урожайности, чем используемое в представленном здесь исследовании.

На основании Приказа Минэкономики РФ от 06.05.1999 N 240 «Об утверждении Методических рекомендаций по формированию нормативов потребления услуг жилищно-коммунального хозяйства» [5] рассчитано математическое ожидание потребности в топливе на отопление. Для поселка с численностью населения около 6000 человек в природно-климатических условиях южных районов Иркутской области оно составляет около 6350 т у.т./год. Удельные ущербы от дефицита приняты равными 9000 руб./т у.т. Прирост затрат, связанный с созданием и эксплуатацией резервов мощности в производстве биотоплива, был определен на основе специальной модели [3, 4] и составил примерно 2600 руб./т у.т., коэффициент потерь при хранении топлива в течение года – 0,1.

Оптимальный состав средств резервирования. В результате оптимизации состава средств обеспечения надежности установлено, что при среднеквадратическом отклонении математического ожидания производства топлива на 15% от математического ожидания производства топлива оптимальный резерв мощности равен 0,05, оптимальная емкость складов – 0,6 от математического ожидания годовой потребности в топливе.

Проведено детальное исследование изменения некоторых показателей надежности при варьировании объемов средств резервирования. В таблице 1 представлены основные показатели надежности топливоснабжения при резервах мощности от 0,02 до 0,07 от математического ожидания потребности в топливе, емкости складов – 0,6, величине среднеквадратического отклонения случайной величины производства топлива 15%.

С увеличением резерва мощности повышается надежность теплоснабжения. Вероятность дефицита снижается с 0,25 до 0,05. С увеличением резерва мощности математическое ожидание ущербов от ситуации дефицита снижается, в то время как математическое ожидание затрат на обеспечение надежности топливоснабжения возрастают (см. рис. 2).

Таблица 1. Зависимость основных показателей надежности топливоснабжения от величины резерва мощности при емкости складов 0,6 от математического ожидания годовой потребности и величине среднеквадратического отклонения в производстве топлива 15 %

	Резерв мощности, доля от математического ожидания потребности в топливе					
	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08
Математическое ожидание затрат на обеспечение надежности, млн руб./год	0,75	0,91	1,03	1,24	1,39	1,57
Математическое ожидание ущербов от дефицита, млн руб./год	0,99	0,79	0,62	0,48	0,36	0,27
Математическое ожидание суммы затрат и ущербов от дефицита, млн руб./год	1,73	1,70	1,69	1,71	1,76	1,84
Вероятность дефицита	0,15	0,12	0,10	0,08	0,06	0,05
Математическое ожидание переходящих запасов, т у.т.	1773	1941	2111	2277	2436	2585
Математическое ожидание располагаемых ресурсов, т у.т.	8314	8546	8779	9008	9231	9444

С ростом резерва мощности сначала происходит сокращение математического ожидания суммы затрат на обеспечение надежности и математического ожидания ущербов от дефицита за счет снижения последней составляющей. Затем математическое ожидание суммы затрат на обеспечение надежности и ущербов от дефицита начинает возрастать вследствие превалирования в ней затрат на обеспечение надежности топливоснаб-

жения (см. рис. 3). Как видно из рис. 3, в точке минимума суммы двух функций (математического ожидания затрат на обеспечение надежности и математического ожидания ущербов от дефицита) резерв мощности составляет 0,05. С ростом резерва мощности математическое ожидание запасов и, следовательно, располагаемых ресурсов топлива возрастает.

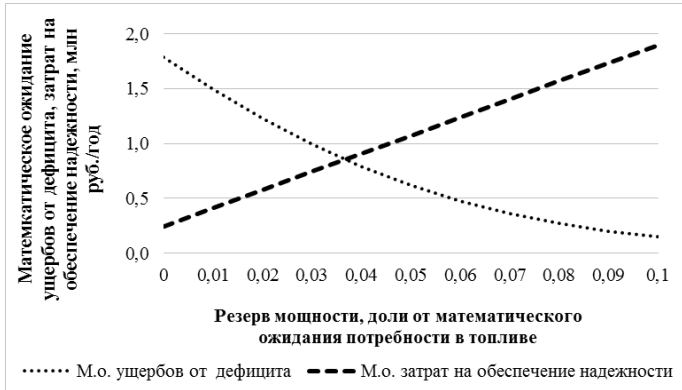


Рис. 2. Зависимость математического ожидания ущербов от дефицита и математического ожидания затрат на обеспечение надежности топливоснабжения от величины резерва мощности

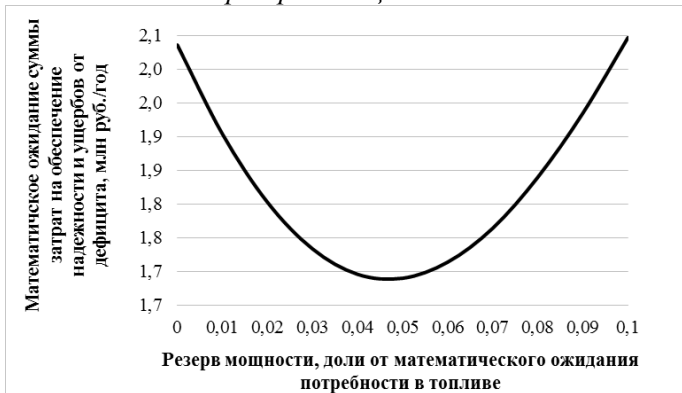


Рис. 3. Зависимость математического ожидания суммы затрат на обеспечение надежности и ущербов от дефицита от величины резерва мощности

При оптимальном составе средств резервирования вероятность дефицита составляет 0,1, математическое ожидание запасов – 2111 т у.т., математическое ожидание располагаемых ресурсов – 8779 т у.т./год, математическое ожидание суммы затрат на обеспечение надежности и математического ожидания ущербов от дефицита составляет 1,69 млн руб./год.

В настоящее время изложенный комплекс моделей используется для экономического анализа конкретных технологических решений по топливообеспечению прибрежных районов Байкала, в частности г. Байкальска. Осуществляется разработка модификаций этого комплекса моделей для исследований экономической эффективности и надежности электроснабжения отдаленных населенных пунктов побережья оз. Байкал (в том числе с. Онгурены, м. Котельниковский.) и других отдаленных районов Восточной Сибири на базе ветряных и солнечных электростанций. В этих случаях в качестве единицы времени рассматривается электроснабжение в течение одного часа с учетом сезонных и суточных регулярных колебаний в производстве и потреблении электроэнергии.

Литература

1. ВЕЛИКАНОВ М.А., НЕКРАСОВ А.С., РЕЗНИКОВСКИЙ А.Ш. *Оценка асинхронности многолетних колебаний расхода топлива под действием геофизических факторов* // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1988. – №2. – С. 151–157.
2. ГУБИЙ Е.В. *Математическая модель анализа надежности топливоснабжения отдаленных населенных пунктов biomassой с энергетических плантаций* // Вестник ИрГТУ. – 2018. – Т. 22, №7. – С. 102–113.
3. ГУБИЙ Е.В., ЗОРКАЛЬЦЕВ В.И. *Эффективность энергетических плантаций.* – Новосибирск: Наука, 2018. – 96 с.
4. ГУБИЙ Е.В., ЗОРКАЛЬЦЕВ В.И. *Эффективность энергетических плантаций* // Эко. – 2018. – №7. – С. 96–110.

5. *Методические рекомендации по формированию нормативов потребления услуг жилищно-коммунального хозяйства* [Электронный ресурс]: Приказ Минэкономки РФ от 06.05.1999 N 240 «Об утверждении Методических рекомендаций по формированию нормативов потребления услуг жилищно-коммунального хозяйства». СПС КонсультантПлюс.
6. *Описание массива данных суточной температуры воздуха и количества осадков на метеорологических станциях России и бывшего СССР (TTTR)*: база данных, свидетельство о государственной регистрации № 2014620942 [Электронный ресурс] / Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Александрова Т.М. <http://meteo.ru/it/178-aisori> (дата обращения: 4.09.2018).
7. РОДЬКИН О.И., ИВАНЮКОВИЧ В.А., ШАБАНОВ А.А. *Планирование производства биотоплива из древесины быстрорастущей ивы на основе интерактивной модели* // Вестник Витебского аграрного университета. – 2014. – №2(80). – С. 39–44.
8. *Энциклопедия систем жизнеобеспечения. Знания об устойчивом развитии* / Под ред. Е.Е. Демидова [и др.]. – М.: МАГИСТР-ПРЕСС, 2005. – Том 2. – 1208 с.
9. ARONSSON P., ROSENQVIST H., DIMITRIOU I. *Impact of nitrogen fertilization to short rotation willow coppice plantations grown in Sweden on yield and economy* // Bioenergy Research. – 2014. – Vol. 7(3). – P. 993–1001.
10. GUBIY E.V. *Analysis long-term of variation of air temperature for the purpose of energy reliability* // The Int. Conference «Advanced Mathematics, Computations and Applications – 2014». – Novosibirsk: Academizdat, 2014. – P. 56–57.
11. PRADE T., SVENSSON S., ANDERSSON A., MATTSSON J. *Biomass and energy yield of industrial hemp grown for biogas and solid fuel* // Biomass and Bioenergy. – 2011. – Vol. 35(7). – P. 3040–3049.
12. VOINIKOV V.K., GAMBURG K.Z. *Application of somaclonal variability to production of fast-growing trees as a raw material for biofuel* // Journal of Stress Physiology & Biochemistry. – 2012. – Vol. 8, №3. – P. 24.

MODELS AND METHODS FOR RELIABILITY ANALYSIS OF THE ENERGY SUPPLY OF REMOTE SETTLEMENTS

Elena Gubiy, Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk, senior engineer (egubiy@gmail.com).

Valeriy Zorkaltsev, Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk, Doctor of Science, professor (zork@isem.irk.ru).

Abstract: The mathematical models for the reliability analysis of energy supply of remote settlements are considered. The three-level complex of nested models is proposed. The lower level represents the model of functioning of the energy supply system of a remote settlement during a unit of time. The second level is a model of energy supply reliability analysis. This analysis is based on a multiple-fold imitation of the functioning of the energy supply system in randomly formed conditions. The values of energy demand and energy production, as well as the values of carryover energy reserves in storage devices are considered as random. The values of the demand and energy production for the imitations of functioning are formed by the Monte Carlo method from the given laws of probability of these quantities. The random value of the carryover energy reserves is formed by an algorithm that generates a Markov sequence of these reserves. The upper level represents the model for selecting the optimal composition of the means of ensuring reliability (power reserves in energy production and the capacity of energy storages). The mathematical expectation of the sum of the reduced costs for the operation of the energy supply system and the losses from the deficit is minimized. The values of such an objective function for a given means of ensuring reliability are determined as a result of a cycle of calculations on the model of reliability analysis. The results of studies of the reliability of biofuel supply from the energy plantation to a remote settlement, in the natural-climatic conditions of the coastal of the Baikal Lake are presented.

Keywords: energy resource reserves, Monte Carlo method, power reserves, power supply reliability, random process.

УДК 51.74

ББК 22.1

DOI: 10.25728/ubs.2019.78.9

Статья представлена к публикации членом редакционной коллегии Г.А. Угольником.

Поступила в редакцию 06.02.2019.

Опубликована 31.03.2019.