

регионах Украины. Наиболее эффективно их применение в регионах Украины с высокими среднегодовыми температурами наружного воздуха.

### Список литературы

1. Султангузин И.А., Албул А.В., Потапова А.А., Говорин А.В. Анализ энергетической эффективности использования природного газа для систем теплоснабжения с тепловыми насосами // Science & Technology in Gas Industry. — 2011. — № 1.
2. Мхиторян Н.М. Энергосберегающие технологии в жилищном и гражданском строительстве / Под ред. И.Н.Карпа. — Киев : Наук. думка, 2000. — 412 с.
3. Хайнрих Г., Найрок Х., Нестлер В. Тепловые установки для отопления и горячего водоснабжения. — М. : Стройиздат, 1985. — 351 с.
4. Справочник проектировщика промышленных, жилых и общественных зданий и сооружений. Отопление, водопровод, канализация. Ч. 1 / Под ред. И.Г.Старовойта. — М. : Госстройиздат, 1964. — 450 с.

Поступила в редакцию 14.02.11

## Technical and Economic Efficiency of Air Thermal Pumps with Drive from Gas and Piston Cogeneration Installations of Hot Water Supply Systems

*Nikitin E.E.*

*The Gas Institute of NASU, Kiev*

The comparative analysis of technical and economic efficiency of combined heat sources integrated with heat pumps of «air — water» type with a drive from gas-piston cogeneration units and conventional gas hot-water boilers of hot water supply systems is carried out.

**Key words:** heat pump, gas-piston cogeneration installation, natural gas saving.

Received February 14, 2011

УДК 620.98

## Оптимизация систем локальной электроэнергетики по критериям энергоэффективности и надежности

*Григорьев Р.В.*

*Институт общей энергетики НАН Украины, Киев*

Представлена методика определения оптимальной структуры генерирующих мощностей локальных систем электрообеспечения по критерию минимума цены электрической энергии с учетом фактора надежности. Приведен пример оптимизации типичной системы автономного электроснабжения бытовых потребителей с ненадежным питанием от централизованной сети.

**Ключевые слова:** локальная энергетика, надежность электрообеспечения, энергоэффективность.

Наведено методику визначення оптимальної структури генеруючих потужностей локальних систем електрозабезпечення за критерієм мінімуму ціни електричної енергії з урахуванням фактора надійності. Наведено приклад оптимізації типової системи автономного електропостачання побутових споживачів з ненадійним живленням від централізованої мережі.

**Ключові слова:** локальна енергетика, надійність електрозабезпечення, енергоефективність.

В Украине остро стоит вопрос надежности энергообеспечения отдаленных от сетей населенных пунктов, которые не имеют альтернативных источников энергии. При плановом ремонте или аварийном отключении, в том числе в результате действия стихийных факторов, жители этих населенных пунктов остаются без электроснабжения продолжительное время, что является недопустимым для любой цивилизованной страны.

Решение проблемы надежности электроснабжения возможно с помощью построения новых надежных линий электропередач. Но для многих населенных пунктов, расположенных в тупиковых участках электросети, более целесообразным может оказаться внедрение рассредоточенных установок локальной генерации электрической энергии, которые работают на сетевом газе, местных видах топлива (солома, отходы деревообработки и т.п.), возобновляемых источниках энергии.

Обеспечение достаточного уровня надежности и экономичности электроснабжения от локальных источников энергии возможно за счет их объединения в локальную сеть. При этом необходим рациональный выбор количества и уровня единичной мощности каждого генератора сети.

В данной работе рассмотрены вопросы оптимизации системы локального электроснабжения, исходя из известных технико-экономических характеристик типоразмерного ряда энергетических локальных установок, на примере электрообеспечения отдаленного от сетей населенного пункта, который питается от распределительной подстанции.

По данным нескольких областных энергоснабжающих компаний Украины, электрическая мощность потребителей электрической энергии в населенных пунктах, которые питаются от тупиковых участков электросети, составляет около 7 % от общей мощности региональных энергосистем. Исходя из этого, потенциал внедрения систем локальной генерации в этих населенных пунктах с целью повышения надежности электроснабжения оценивается в 3000–3500 МВт.

Потребление электрической энергии в Украине составляет около 750 кВт·ч/чел. в среднем и имеет тенденцию к росту [1]. Поэтому, кроме повышения надежности энергоснабжения, существует необходимость увеличения мощности генерации энергии и пропускной способности распределительных электросетей. Высокая неравномерность потребления электрической энергии населенными пунктами с

преобладанием потребителей группы «Свет, быт и другие непромышленные и мелкомоторные потребители» предопределяет довольно низкую привлекательность соответствующих инвестиций со стороны региональных энергоснабжающих компаний. В связи с этим более привлекательным для них может оказаться вариант децентрализованного электроснабжения сельских населенных пунктов [2].

Высокая суточная неравномерность потребления электрической энергии предопределяет значительную сложность выбора соответствующего электрогенерирующего оборудования, которое должно поддерживать крайне неравномерные суточные графики бытового электропотребления без существенного снижения экономичности. Среди электрогенераторов малой мощности наибольшую маневренность демонстрируют газотурбинные микроустановки (микротурбины), которые имеют достаточно высокие энергетические характеристики на номинальном режиме работы. Однако даже при незначительном падении нагрузки КПД таких установок снижается в несколько раз. Альтернативой могут быть локальные установки на базе газопоршневых двигателей, но такие установки неэффективны при нагрузке ниже 30 % от номинальной [3].

Такие недостатки газопоршневых установок, как и микротурбин, могут устраняться использованием аккумуляторов электрической энергии, но это значительно увеличивает стоимость оборудования и его эксплуатации. Полный комплект оборудования для локального электроснабжения жилых сооружений может достигать 10 тыс. долл. на одно домохозяйство [4]. Такая стоимость практически исключает возможность массового внедрения локальных генераторов энергии, рассчитанных на нужды обычных домохозяйств в условиях Украины.

Высокая стоимость индивидуального энергообеспечения является своеобразным стимулом для объединения локальных потребителей в общую центральноуправляемую сеть или для создания альтернативной электрической станции коллективного пользования мощностью от десятков киловатт до нескольких десятков мегаватт. Такая электростанция может работать совместно с энергосистемой и отдельно, включать в себя центрально размещенные и рассредоточенные генераторы различной мощности. Она может включать в свою структуру генераторы, работающие на нетрадиционных видах энергии и т.п. Внедрение таких систем наиболее актуально в энергодефицитных и ненадежных участках электрических сетей Украины, где потре-

бители имеют электропитание только от одной тупиковой распределительной подстанции.

Экономические, технические и экологические критерии использования локальных установок уже рассматривались в работе [5], выводы которой частично совпадают с результатами проведенных исследований. Однако работа [5] в первую очередь ориентирована на рассмотрение коммерческого использования установок, а не на специфические графики бытовой нагрузки, и в ней не проанализировано влияние необходимого уровня надежности энергообеспечения на себестоимость электрической энергии.

В работе [6] были изложены основы многофакторного анализа и выбора когенерационных установок мощностью от 1 до 25 МВт по критерию минимального срока окупаемости с учетом экологических факторов. Эта работа в первую очередь ориентирована на определение экономических показателей внедрения проектов коммерческого использования генераторов. Расчеты проводились для конкретного оборудования и носят сравнительный с эталонным характер. В ней не были учтены показатели надежности энергообеспечения и не предоставлена полная картина возможных альтернативных вариантов для приведенного примера.

Цель работы — создание математических основ выбора оптимальной структуры системы локальных генераторов с учетом нужного уровня надежности энергообеспечения и предоставление выводов относительно целесообразности использования системы локальных установок как альтернативы централизованному электроснабжению.

Рассмотрим локальную систему электрообеспечения, состоящую из ряда параллельно работающих электрогенерирующих установок, рассчитанных на отпуск электрической энергии на протяжении года в потребительскую сеть согласно известному почасовому графику нагрузок  $P(t)$  с определенным уровнем надежности. В качестве показателя надежности электроснабжения, согласно [5], будем использовать коэффициент готовности системы:

$$K_T = \mu / (\lambda + \mu), \quad (1)$$

где  $\mu$  — время безотказного электроснабжения (достоверность трудоспособного состояния);  $\lambda$  — допустимое время отключения от электропитания за определенный период времени (достоверность наработки на отказ).

При проектировании системы генераторов этот коэффициент должен определяться согласно достоверности отказов элементов системы [7]:

$$c_n^m = \sum_{m=0}^n \frac{n!(n-m)!}{m!} (1-q)^m q^{n-m}, \quad (2)$$

где  $n$  — общее количество генерирующих установок в системе;  $m$  — количество отказавших установок;  $q$  — достоверность безотказной работы одного генератора.

Все установки, которые могут могут отказать (согласно уравнению (2)) с достоверностью ниже, чем заданный  $K_T$  системы, должны быть продублированы резервными с уровнем надежности не ниже основных.

Критерием решаемой задачи является минимизация себестоимости производства электрической энергии. Она может определяться, например, методом прямого расчета, который приведен в [8]. Он предусматривает определение приведенной себестоимости продукции делением полных затрат на количество изготовленной продукции:

$$c_e = (C_{об} + C_{экспл} + C_{рем} + C_{топл}) / N_{пер} \rightarrow \min, \quad (3)$$

где  $C_{об}$  — стоимость основного оборудования и резервных установок с учетом всех подготовительных работ (строительство, монтаж и т.п.) (Количество и мощность генераторов определяется по уравнению (2));  $C_{экспл}$  — эксплуатационные затраты;  $C_{рем}$  — затраты на текущие и капитальные ремонты;  $C_{топл}$  — топливные затраты;  $N_{пер}$  — количество электроэнергии, произведенной системой установок за весь период эксплуатации, кВт·ч.

При оценках экономической эффективности инвестиций, растянутых во времени, необходимо учитывать убыток от замораживания капитала. Такой расчет возможен по формуле, полученной из [9], приведенной к виду:

$$C_i^D = C_i + \sum_{t=1}^T (C_i - \frac{C_i}{T} t) p, \quad (4)$$

где  $C_i^D$  — величина дисконтированных затрат;  $C_i$  — затраты без учета дисконтирования;  $C_i t / T$  — объем возвращения инвестиций в зависимости от периода (входит в стоимость продукции);  $T$  — общий срок строительства и использование объекта (лет);  $p$  — ставка дисконта.

С учетом (4) формула (3) может быть приведена к виду:

$$c_e = [C_{об} + \sum_{t=1}^T (C_{об} - \frac{C_{об}}{T} t) p + C_{экспл} + C_{рем} + C_{топл}] / N_{пер} \rightarrow \min. \quad (5)$$

Топливные затраты, присутствующие в (5), определяются режимами работы энергоустановок в течение суток. При этом режимы работы установок оптимизируются по критерию минимума затрат топлива с использованием известных алгоритмов, в частности, алгоритма полилинейной оптимизации [3].

Условие минимума суточных затрат топлива в общем виде записывается:

$$B_d = \int_0^t \sum_{i=1}^n B_i(N_i(t)) dt \rightarrow \min, \quad (6)$$

где  $B_i(N_i(t))$  – ежечасная затрата топлива  $i$ -й установкой, которая задается энергетической характеристикой генератора и зависит от его мощности  $N_i(t)$  в конкретный момент времени;  $t$  – период, за который оптимизируются режимы работы оборудования.

При этом должно выполняться условие обеспечения нужной системной мощности в каждый момент времени:

$$\sum_{i=1}^n N_i(t) = P(t), \quad (7)$$

а также система ограничений на минимальную и максимальную мощность всех локальных установок коллективной сети:

$$N_i \geq N_{i\min}; \quad (8)$$

$$N_i \leq N_{i\max}, \quad (9)$$

где  $P(t)$  – необходимая мощность генерации в заданный момент времени;  $N_i$  – рабочая мощность каждой установки;  $N_{i\min}$ ,  $N_{i\max}$  – минимально и максимально возможные значения мощности каждой установки.

Максимальная мощность установки может считаться равной ее номинальной (единичной) мощности с учетом возможности перегрузки. Минимальная допустимая мощность считается равной мощности технологического минимума нагрузки каждой установки. Для отдельных

установок, которые допускают продолжительную работу в режиме включения-выключения, минимальная допустимая мощность может равняться нулю.

Кроме этого, следует учитывать необходимость «горячего» резерва, которая зависит от времени суток и выражается следующей зависимостью:

$$0 \leq N_i^{GP}(t) \leq (P(t) - \sum_{i=1}^n (N_i^{пик} - N_i^{раб}(t))), \quad (10)$$

где  $N_i^{GP}(t)$  – величина «горячего» резерва, который выделяется из общего резерва системы и зависит от количества работающих генераторов  $n$  в конкретное время суток  $t$ ;  $[N_i^{пик} - N_i^{раб}(t)]$  – разность между пиковой и рабочей мощностями генерирующих установок.

Приведенная выше модель была апробирована на примере электрообеспечения населенного пункта, который питается от трансформаторной подстанции мощностью 600 кВт. Для определенности необходимый коэффициент надежности энергоснабжения принимался равным 0,99 и 0,999, коэффициент готовности электрогенерирующих установок – 0,96. В примере принят фактический суточный график работы трансформаторной подстанции, который характеризовался коэффициентом неравномерности 0,79 и коэффициентом заполнения 0,74.

Поскольку коэффициент готовности электрогенерирующих установок заранее ниже необходимого коэффициента надежности электрообеспечения, в системе необходимо предусмотреть присутствие определенного резерва установленных мощностей. Величина резерва мощности, которая обеспечит необходимый уровень надежности электроснабжения  $K_r$ , может быть определена по формуле (2) в зависимости от количества установок в системе. Результаты соответствующих расчетов предоставлены на рис.1. Линии  $q = \text{const}$  отвечают значениям коэффициентов готовности отдельных генераторов.

Используя эти данные, можно определить возможные варианты крупности элементов системы энергоснабжения с учетом нужного уровня надежности и определить основные энергетические характеристики соответствующих систем, исходя из конкретных зависимостей электрического КПД электрогенераторов от единичной мощности.

Для серийных электростанций малой мощности на базе инжекторных газовых двигателей

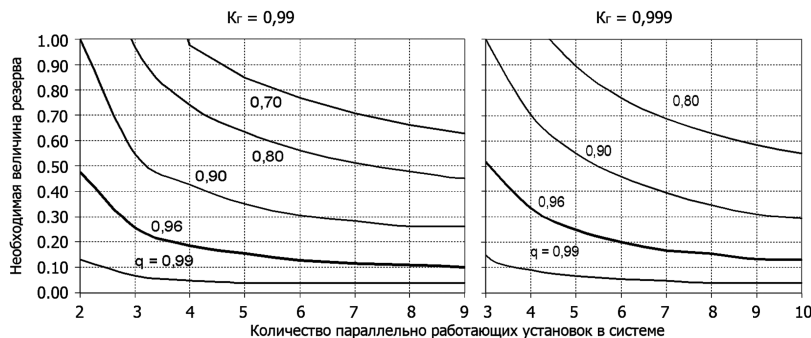


Рис.1. Необходимая доля резерва мощности для обеспечения заданного коэффициента надежности электроснабжения.

фирм Ford, Cummins, Lombardini, MAN и других зависимость затрат топлива в номинальном режиме от единичной мощности в диапазоне  $5 \text{ кВт} \leq N_e \leq 400 \text{ кВт}$  удовлетворительно описывается эмпирической формулой:

$$V_e = 0,20655 N_e^{0,8921}, \quad (11)$$

где  $N_e$  — электрическая мощность установки в номинальном режиме работы, кВт.

Топливные затраты определяются согласно режимам работы энергоустановок на протяжении суток соответственно критерию (6) с учетом зависимости затрат топлива от величины нагрузки. Используя данные [5] относительно экономичности работы газопоршневых установок в частичных режимах, можно получить эмпирическую зависимость затрат топлива от номинальной мощности газопоршневой установки и уровня ее относительной нагрузки:

$$V_{об} = 0,249 \varphi^2 - 0,466 \varphi + 1,145) \cdot 497,53 N_e^{-0,0743}, \quad (12)$$

где  $\varphi$  — относительная загрузка установки,  $\varphi = N/N_e$ .

Стоимость генерирующих установок в зависимости от их мощности может быть взята из прайсов снабжающих компаний, которые могут быть представлены уравнениями:

$$\begin{cases} C_{об} = 204 N_e + 7901, \text{ при } N_e \leq 500 \\ C_{об} = 352 N_e + 62740, \text{ при } N_e > 500. \end{cases} \quad (13)$$

В системе существует потребность во вращающемся резерве мощности, так как отказ одной установки должен быть мгновенно компенсирован.

Исходные данные и результаты расчетов затрат топлива и удельной стоимости установок

#### Характеристики системы в зависимости от количества генераторов в ней ( $q = 0,96$ )

Показатель	Рабочие установки						
	1	2	3	4	5	10	15
Единичная мощность установки, кВт	550	275	183	138	110	55	37
Количество резервных установок	2/4	1/3	1/2	1/2	1/2	1/2	2/2
Установленная мощность системы, кВт	<u>1650</u>	<u>825</u>	<u>733</u>	<u>688</u>	<u>660</u>	<u>605</u>	<u>623</u>
Номинальный электрический КПД установки, %	37	37	36	35	34	32	31
Стоимость установки, тыс. долл.	138	67	47	37	31	18	14
Удельная затрата топлива на производство электрической энергии системой установок за сутки, г у.т./кВт.ч	321	307	310	312	321	347	360

Примечание. В числителе — при  $K_r = 0,99$ , в знаменателе — при  $K_r = 0,999$ .

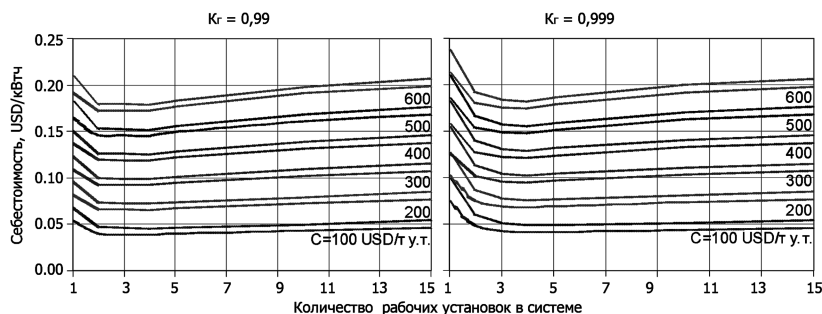


Рис.2. Себестоимость электроэнергетики в зависимости от количества установок системы и стоимости топлива.

для разных вариантов состава системы генерации приведены в таблице.

Эксплуатационные и ремонтные затраты для данного типа установки приняты 15 % от стоимости оборудования, согласно рекомендациям [5], а срок их эксплуатации 15 лет, согласно [3]. Затраты, связанные с установлением оборудования, обустройством помещений, соединением установок в общую сеть, приняты в размере 40 % от стоимости оборудования.

Результаты расчетов себестоимости электрической энергии от стоимости топлива (природного газа) в зависимости от количества генераторов в системе для двух фиксированных уровней надежности электрообеспечения представлены на рис.2. Для каждого шага стоимости условного топлива изображены две кривые, которые отвечают предельным значениям дисконтной ставки 0 и 20 %.

Приведенные данные указывают на существование оптимума состава системы, который обеспечивает минимальную стоимость производства электрической энергии. Оптимальное количество рабочих генераторов в системе — 4 рабочих единицы. Уменьшение количества установок в системе до менее 2–3 единиц приводит к значительному увеличению себестоимости электроэнергии.

Экономически целесообразное максимальное количество рабочих установок в системе со-



ставляет для стоимости 1000 м<sup>3</sup> газа 200 долл. — 9 единиц, для 400 долл. — 7 единиц, для 600 долл. — 5 единиц. В локальных сетях, в которых находится больше 15 генераторов, себестоимость электрической энергии при обеспечении  $K_T = 0,99$  или 0,999 почти одинакова.

### Выводы

Разработана методика технико-экономического обоснования оптимальной структуры системы локальных генераторов с учетом фактора надежности электроснабжения.

Определена себестоимость электрической энергии при разном количестве генераторов в системе в зависимости от стоимости топлива, учитывая потери от «замораживания» капитала.

Существует необходимость дальнейших исследований, в которых нужно учесть особенности территориального размещения локальных генераторов, их влияние на экологию, возможность использования когенерационных установок.

### Список литературы

1. Паливно-енергетичні ресурси України : Статист. зб. — Київ : Держ. ком. статистики України, 2008.
2. Иванова Е.В., Ратнер В.М., Иванова Е.В. Инвестиционная целесообразность развития электросетей сельского хозяйства по схеме децентрализованного электроснабжения // Энергетика та електрифікація. — 2010. — № 10.
3. Свейнекэмп Р. Пути развития рассредоточенного производства электроэнергии // Мировая электроэнергетика. — 1998. — № 1. — С. 33–37.
4. Slowe J. Micro-CHP : Global industry status and commercial prospects. — Delta Energy & Environment, UK.
5. Мамонов А.М. Критерии использования мини-ТЭЦ // Главный энергетик. — 2009. — Окт.
6. Дубовський С.В., Туваржієв В.К., Лінчевський Є.А., Кобернік В.С. Багатофакторний аналіз і вибір когенераційних теплоелектростанцій потужністю до 5 МВт для інвестиційних проєктів // Праці Ін-та електродинаміки НАНУ. — 2004. — № 1.
7. Диллон Б. Инженерные методы обеспечения надежности систем. — М. : Мир, 1984. — 318 с.
8. Кочетов. В.В., Колобов А.А., Омельченко И.Н. Инженерная экономика. — М., 2005. — 192 с.
9. Нагорная В.Н. Экономика энергетики : Учеб. — Владивосток : Изд-во Дальневост. гос. техн. ун-т, 2007. — 157 с.
10. Simader G.R., Krawinkler R., Trnka G. Micro-CHP systems : State-of-the-art // Europ. Comm., Federal Ministry of Economics and Labour, 2006.

Поступила в редакцию 14.02.11

## The Optimization of Local Electric Power Industry Systems by Energy Efficiency and Reliability Criteria

**Grigoriev R. V.**

*The Institute of General Energetic of NASU, Kiev*

The method of generating capacities optimal structure of local electricity supply systems by criterion of minimal electric energy price taking into account reliability factor is introduced. The example of typical autonomous electricity supply for domestic consumers with an unreliable electric power from a centralized energy system is conducted.

**Key words:** local energetics, electricity supply reliability, energy efficiency.

Received February 14, 2011