

ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОГЕНЕРАЦИОННОЙ УСТАНОВКИ НА БАЗЕ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ НЕРАВНОМЕРНОМ ГРАФИКЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ

EFFICIENCY OF A COGENERATION PLANT BASED ON A DIESEL ENGINE UNDER UNEVEN ELECTRICAL LOAD CONDITIONS

Ю.А. АНТИПОВ, К.Т.Н.
П.Р. ВАЛЬЕХО МАЛБДОНАДО
П.П. ОЩЕПКОВ
И.К. ШАТАЛОВ
И.И. ШАТАЛОВА

Российский университет дружбы народов, Москва,
Россия, rudn-tit@yandex.ru

YU.A. ANTIPOV, PhD in Engineering
P.R. VAL'YEKHO MALBDONADO
P.P. OSHCHEPKOV
I.K. SHATALOV
I.I. SHATALOVA

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN), Moscow,
Russia, rudn-tit@yandex.ru

Особенность электрической энергии состоит в том, что ее нужно производить в данный момент столько, сколько необходимо потребителю. Однако графики потребления энергии имеют весьма неравномерный характер по времени суток. Для покрытия пиковых нагрузок применяется высокоманевренное оборудование, обладающее зачастую меньшей экономичностью. Это оборудование эксплуатируется в режимах частичной мощности, где его эффективность заметно снижается. Одним из реальных способов выхода из этой ситуации может быть использование тепловых насосов (ТН) в схемах с когенерационными установками (КУ) на базе тепловых двигателей. В этом случае появляется возможность использовать тепловой двигатель в экономичном режиме в течение всего времени суток, а излишки электроэнергии в ночные часы направить на привод теплового насоса. В работе рассмотрены два варианта работы когенерационной установки на базе дизельного двигателя в схемах энергообеспечения отдельного потребителя в условиях неравномерного графика электрической нагрузки. В качестве примера взята КУ фирмы Wartsila 12V32. Такие установки эксплуатируются в отдаленных районах РФ. Основные данные КУ в расчетном режиме следующие. Дизель-генератор: электрическая мощность – 6000 кВт, часовой расход топлива – 1080 кг/ч, тепловая мощность – 5240 кВт, температура ОГ – 485 °С, эффективный КПД – 0,46, коэффициент использования теплоты топлива 0,89. В первом варианте КУ работает в стандартном режиме. Таким образом обеспечивается выработка электрической мощности в соответствии с графиком. Во втором варианте КУ используется совместно с ТН для получения дополнительной тепловой мощности. Расчеты показали, что включением теплового насоса в схему когенерационной установки, работающей в режиме неравномерного графика электрической нагрузки, можно обеспечить работу дизеля в течение всего времени суток в режиме максимального КПД и повысить коэффициент использования теплоты топлива на 17–20 %.

Ключевые слова: дизельный двигатель, тепловой насос, когенерационная установка, неравномерный график электрической нагрузки.

Для цитирования: Антипов Ю.А., Вальехо Малбдонадо П.Р., Ощепков П.П., Шаталов И.К., Шаталова И.И. Эффективность когенерационной установки на базе дизельного двигателя при неравномерном графике электрической нагрузки // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2020. № 5. С. 13–17. DOI: 10.31992/0321-4443-2020-5-13-17.

A feature of electrical energy is that it must be produced at a given moment as much as the consumer needs. However, the graphs of energy consumption are very uneven over the time of day. In order to cover peak loads, the highly mobile equipment, which is often less economical, is used. This equipment is operated at partial power modes, where its efficiency is markedly reduced. One of the real ways to get out of this situation can be the use of heat pumps (HP) in circuits with cogeneration units (CU) based on heat engines. In this case, it becomes possible to use the heat engine in an economical mode throughout the day, and direct excess electricity at night to the heat pump drive. The paper considers two options for the operation of a cogeneration plant based on a diesel engine in power supply schemes for an individual consumer under conditions of an uneven electrical load schedule. Wartsila 12V32 is taken as an example of a CU. Such plants are operated in different regions of the Russian Federation. The main data of the CU in the design mode are given. Diesel generator: electric power – 6000 kW, hourly fuel consumption – 1080 kg/h, thermal power – 5240 kW, exhaust gas temperature – 485 °C, effective efficiency – 0,46, fuel heat utilization factor 0,89. In the first version, the CU operates in a standard mode. This ensures the generation of electrical power in accordance with the schedule. In the second version, the CU is used in conjunction with the HP to obtain additional thermal power. Calculations have shown that by including a heat pump in a cogeneration unit operating in an uneven electrical load schedule mode, it is possible to ensure that the diesel engine operates at maximum efficiency during the whole day and to increase the fuel heat utilization rate by 17–20 %.

Keywords: diesel engine, heat pump, cogeneration unit, uneven electrical load schedule.

Cite as: Antipov YU.A., Val'yekho Malbdonado P.R., Oshchepkov P.P., Shatalov I.K., Shatalova I.I. Efficiency of a cogeneration plant based on a diesel engine under uneven electrical load conditions. Traktory i sel'khoz mashiny. 2020. No 5, pp. 13–17 (in Russ.). DOI: 10.31992/0321-4443-2020-5-13-17.

Введение

Особенность электрической и частично тепловой энергии состоит в том, что ее нужно производить в данный момент столько, сколько необходимо потребителю. Если вопросы аккумулирования тепловой энергии как-то решаются [1], то проблема аккумулирования электрической энергии в промышленных масштабах еще далека от своего решения. Графики потребления энергии имеют весьма неравномерный характер по времени суток, по дням, неделям, сезонам. Типичный суточный график электрической нагрузки показан на рис. 1. Его принято делить на три зоны: базовую, полупиковую и пиковую. Здесь: α_n – коэффициент неравномерности (отношение минимальной нагрузки к максимальной), β – коэффициент плотности (отношение средней нагрузки к максимальной), W – электрическая нагрузка.

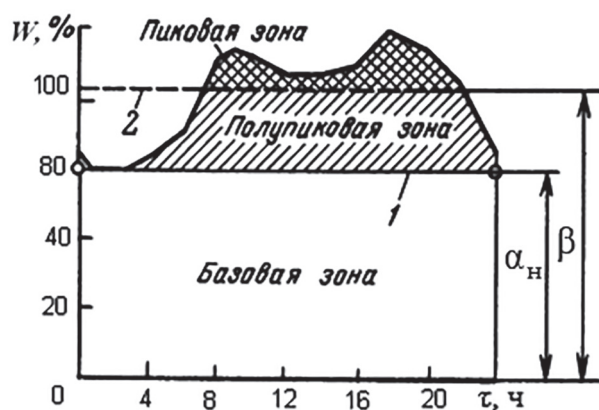


Рис. 1. Основные зоны графика электрической нагрузки:

1 – минимальная нагрузка; 2 – средняя нагрузка

Потребление тепловой энергии также неравномерно в течение суток, но эта проблема может быть решена включением в систему теплоснабжения аккумулятора теплоты. При централизованном энергообеспечении всякая энергосистема должна располагать широким спектром энергетического оборудования для работы в любой части графика. Однако это практически невозможно. Для покрытия пиковых нагрузок применяются высокоманевренное оборудование, обладающее зачастую меньшей экономичностью. Это оборудование эксплуатируется в режимах частичной мощности, где его эффективность заметно снижается.

Цель исследований

Анализ эффективности когенерационной установки на базе дизельного двигателя при неравномерном графике электрической нагрузки.

Материалы и методы

При децентрализованном энергообеспечении для одновременной выработки электрической и тепловой энергии, где чаще всего используются когенерационные установки (КУ), эта проблема еще более усложняется. Одним из реальных способов выхода из такой ситуации может быть использование тепловых насосов (ТН) в схемах с когенерационными установками на базе тепловых двигателей. В этом случае появляется возможность использовать тепловой двигатель на экономичном режиме (номинальной мощности), а излишки электроэнергии в ночные часы направить на привод теплового насоса.

Тепловые насосы широко используются в различных отраслях, чаще всего для теплоснабжения [2]. В США эксплуатируются более 5 млн ТН общей мощностью 5 ГВт. Применяются ТН также для использования вторичных энергоресурсов в промышленности [3, 4]. Наибольшее распространение получили парокомпрессионные ТН.

Эффективность компрессионного ТН оценивается коэффициентом преобразования:

$$\mu = \frac{Q_{\text{ТН}}}{N_{\text{к}}}, \quad (1)$$

где $Q_{\text{ТН}}$ – тепловой поток, вырабатываемый ТН; $N_{\text{к}}$ – мощность, затрачиваемая на привод компрессора ТН.

Результаты и обсуждение

В работе рассмотрены два варианта работы когенерационной установки на базе дизельного двигателя в схемах энергообеспечения отдельного потребителя в условиях неравномерного графика электрической нагрузки. Объектом энергообеспечения может являться отдельный поселок или микрорайон. В качестве примера взят суточный график потребления электрической мощности (рис. 2). Отношение максимальной потребляемой мощности в течение суток к ее минимальному значению составляет 0,56.

Проведен расчетный анализ энергообеспечения двух вариантов использования коге-

нерационной установки. В качестве примера взята КУ фирмы Wartsila 12V32. Такие установки эксплуатируются в отдаленных районах Российской Федерации. Основные данные КУ в расчетном режиме. Дизель-генератор: электрическая мощность – 6000 кВт, часовой расход топлива – 1080 кг/ч, тепловая мощность – 5240 кВт, температура отработавших газов (ОГ) – 485 °С, эффективный коэффициент полезного действия (КПД) – 0,46.

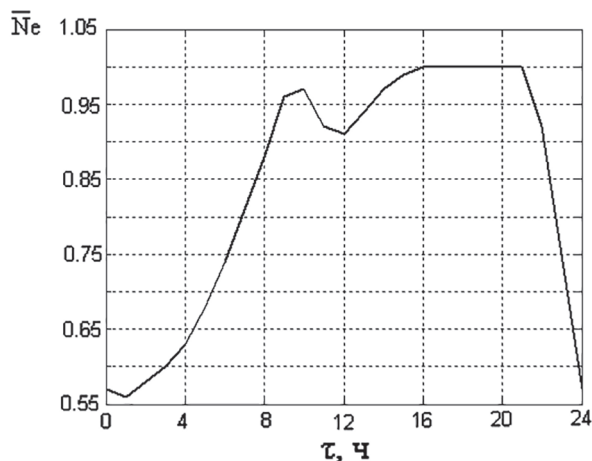


Рис. 2. График потребления электрической мощности в зависимости от времени суток

В первом варианте КУ работает в стандартном режиме и включает в себя: дизель-генератор, теплообменник охлаждающей жидкости, газовой теплообменник, пиковый водогрейный котел, аккумулятор горячей воды. Таким образом обеспечивается выработка электрической мощности в соответствии с графиком $\bar{N}_e = f(\tau)$ (рис. 2). Теплота отработавших газов (ОГ) используется для подогрева сетевой воды, идущей к теплопотребителю. Очевидно, что для обеспечения заданного суточного графика электрической нагрузки дизель значительную часть времени работает в режимах частичной мощности с ухудшенными показателями по экономичности.

Тепловой баланс дизеля в этом случае можно представить в виде:

$$Q_T = \frac{G_T \cdot Q_H^P}{3600} = Q_{N_e} + Q_{OG} + Q_w, \quad (2)$$

где Q_T – химическая теплота топлива; Q_{N_e} – теплота, эквивалентная эффективной мощности дизеля (мощность в каждый момент времени суток по рис. 2); Q_{OG} – теплота отработавших газов; Q_w – теплота, отдаваемая

в охлаждающую воду; G_T – часовой расход топлива дизелем; Q_H^P – теплотворная способность топлива.

Для дизельного двигателя при определении Q_{OG} температура ОГ может быть вычислена, если воспользоваться балансом теплоты, входящей и выходящей из двигателя. Причем поршневой двигатель может быть любого типа, как с наддувом, так и без наддува. Было получено следующее уравнение для вычисления температуры ОГ:

$$t_{gr} = \frac{C_{pv} \alpha \varphi L_0 t_b + Q_H^P (1 - \eta_e - q_w - q_m - q_{ox})}{C_{pg} (1 + \alpha \varphi L_0)}, \quad (3)$$

где t_b – температура на входе в компрессор; t_w , q_m , q_{ox} – относительное количество теплоты, отдаваемое дизелем в охлаждающую воду, масло и получаемое в охладителе наддувочного воздуха; η_e – КПД двигателя; α – коэффициент избытка воздуха; φ – коэффициент продувки; L_0 – стехиометрический коэффициент; C_{pv} и C_{pg} – теплоемкость воздуха и газов при постоянном давлении [5].

Доля теплоты топлива, отдаваемая в охлаждающую жидкость, для дизелей составляет 0,15–0,20, и доля теплоты, отдаваемой в масло, составляет для поршневых двигателей 0,04–0,10 [6].

Во втором варианте когенерационная установка применяется совместно с ТН для получения дополнительной тепловой мощности. Такая КУ на базе дизельного двигателя с включением в схему ТН представлена на рис. 3. Схема включает в себя дизель-генератор, ТН компрессионного типа, теплообменник охлаждающей жидкости, газовой теплообменник, аккумулятор горячей воды. ТН компрессионного типа: рабочий агент – R-134; коэффициент преобразования – 3,9. В этой схеме дизель-генератор все время работает в режиме номинальной мощности, ТН работает в часы минимального потребления электрической энергии (в ночное время).

Баланс теплоты когенерационной установки с тепловым насосом ТН:

$$Q = Q_{теп} + Q_w + Q_{N_e} + Q_{тн}. \quad (4)$$

Так как дизель-генератор в схеме с ТН работает в режиме расчетной мощности, то $Q_{теп}$ – теплота газовой теплообменника – и Q_w – теплота, отдаваемая в охлаждающую жидкость, остаются постоянными и равными расчетным значениям. Q_{N_e} – теплота, экви-

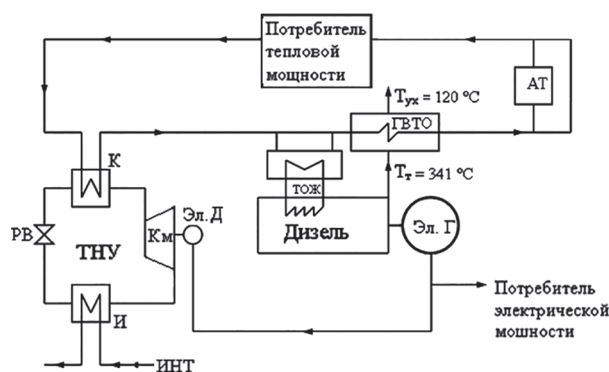


Рис. 3. Схема энергообеспечения отдельного потребителя на базе дизеля, работающего совместно с ТНУ:

ГВТО – газоводяной теплообменник;
ТОЖ – теплообменник охлаждающей жидкости;
Эл. Г – генератор; Эл. Д – электродвигатель;
Км – компрессор; К – конденсатор; И – испаритель;
РВ – регулирующий вентиль; ИНТ – источник низкопотенциальной теплоты;
АТ – аккумулятор теплоты

валентная эффективной мощности дизеля, отданной потребителю, определяется следующим образом:

$$Q_{N_e} = \overline{N_e} \cdot N_{co},$$

где N_{co} – мощность дизеля на расчетном режиме; N_e – относительная доля электрической мощности, идущей потребителю (из рис. 2).

Количество теплоты, полученное в ТН, определяется в зависимости от мощности, затрачиваемой на привод его компрессора, КПД компрессора ТН и коэффициента преобразования ТН:

$$Q_{TH} = \mu \cdot N_K \cdot \eta_m,$$

где η_m – механический КПД компрессора ТН; $N_K = (1 - \overline{N_e}) \cdot N_{co}$ – мощность, затрачиваемая на привод компрессора ТН в данный момент времени (определяется по рис. 2).

Коэффициент использования теплоты топлива (КИТ) с учетом ТН можно определить по формуле:

$$K_T = \frac{Q}{Q_T}.$$

Результаты расчета основных параметров когенерационной установки, по приведенным выше формулам, в течение суток с интервалом в 1 час представлены на рис. 4 и 5. Как следует из рис. 4, при работе КУ совместно с ТН количество тепловой энергии в ночные часы,

отдаваемой теплопотребителю, существенно увеличивается. Коэффициент использования теплоты топлива в ночные часы достигает 1,4 (рис. 5), среднесуточный КИТ равен 1,04–1,07, что превышает КИТ когенерационной установки, работающей без теплового насоса.

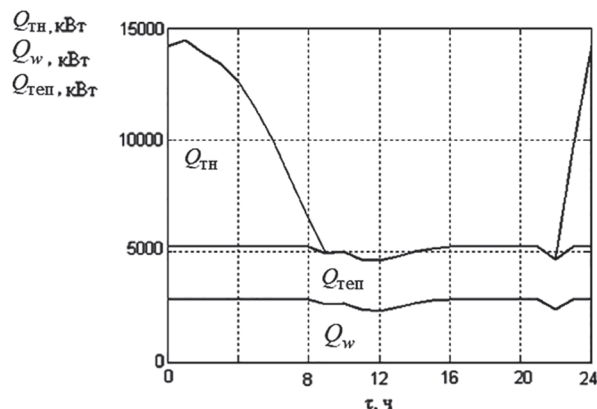


Рис. 4. Количество полученной тепловой мощности в зависимости от времени суток:

Q_{TH} – тепловая мощность ТН; Q_w и $Q_{теп}$ – тепловая мощность, полученная за счет утилизации теплоты охлаждающей жидкости и отработавших газов

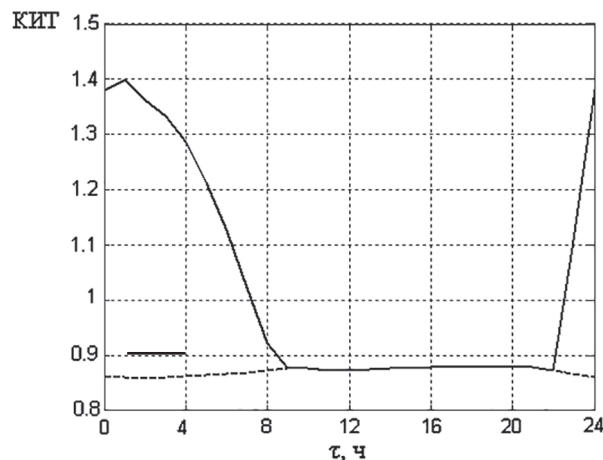


Рис. 5. Зависимость коэффициента использования теплоты топлива (КИТ) от времени суток:

--- без использования ТН;
— с использованием ТН

Заключение

Посредством включения теплового насоса в схему когенерационной установки, работающей в режиме неравномерного графика нагрузки, можно: 1) обеспечить работу дизеля в течение всего времени суток в режиме максимального КПД; 2) увеличить выработку тепловой мощности в ночные часы; 3) повысить коэффициент использования теплоты топлива на 17–20 %

Литература

1. Данилов О.В. и др. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях: учебник для вузов: под ред. А.В. Клименко М.: Изд. дом МЭИ, 2010, 424 с.
2. Хайнрик Г., Найрок Х., Нестоер В. Теплонасосные установки для отопления горячего водоснабжения: перевод с нем / под ред. Б.К. Явнеля М.: Стройиздат, 1985. 136 с.
3. Lambauer J. Large Scale Industrial Heat Pumps – market analysis, potentials, barriers and Best-Practice examples // 9th International IEA Heat Pump Conference 20–22 May 2008 г. Zurich, Switzerland.
4. Shatalov I.K., Shatalova I.I., Antipov Yu.A., Sobennikov E.V. Utilization of Secondary Energy Resources of Metallurgical Enterprises Using Heat Pump // Journal of Fundamental and Applied Sciences. Vol 9, No 7S. 2017, 342–352 p.
5. Шаталов И.К., Антипов Ю.А. Утилизация вторичных энергоресурсов тепловых двигателей с использованием тепловых насосов. М.: РУДН, 2015, 173 с.
6. Кавтарадзе Р.З. Теория поршневых двигателей. Специальные главы: учебник для вузов. 2-е изд. М: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016, 589 с.

References

1. Energoberezheniye v teploenergetike i teplotekhnologiyakh [Energy saving in heat power engi-

neering and heat technologies]: uchebnik dlya vuzov. Danilov O.V. i dr.; pod red. Klimenko A.V. Moscow: Izd. dom M·EI Publ., 2010, 424 p.

2. Khaynrik G., Nayrok KH., Nestoyer V. Teplonasosn-yye ustanovki dlya otopleniya goryachego vodosnabzheniya [Heat pump units for heating hot water supply]: perevod s nem Pod red. Yavnelya B.K. Moscow: Stroyizdat Publ., 1985. 136 p.
3. Lambauer J. Large scale industrial heat pumps – market analysis, potentials, barriers and Best-Practice examples // 9th International IEA Heat Pump Conference 20–22 May 2008 g. Zurich, Switzerland.
4. Shatalov I.K., Shatalova I.I., Antipov Yu.A., Sobennikov E.V. Utilization of secondary energy resources of metal-lurgical enterprises using heat pump. Journal of Fundamental and Applied Sciences. Vol 9, No 7S. 2017, 342–352 p.
5. Shatalov I.K., Antipov YU.A. Utilizatsiya vtorichnykh energoresursov teplovykh dvigateley s ispol'zovaniyem teplovykh nasosov [Utilization of secondary energy resources of heat engines using heat pumps]. Moscow: RUDN Publ., 2015, 173 p.
6. Kavtaradze R.Z. Teoriya porshnevykh dvigateley. Spetsial'n-yye glavy [The theory of piston engines. Special chapters]: uchebnik dlya vuzov. 2-e izd. Moscow: Izd. MGTU im. N.E. Bauman Publ., 2016, 589 p.