

УДК 621.314

DOI 10.46960/2658-6754_2020_2_29

А.Б. Дарьенков, О.С. Хватов

ОЦЕНКА СРЕДНЕЙ ЗА ПЕРИОД ЭКСПЛУАТАЦИИ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ СТОИМОСТИ ВЫРАБАТЫВАЕМОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассматриваются варианты построения дизель-генераторных установок переменной частоты вращения. Проведена оценка средней за период эксплуатации стоимости вырабатываемой ими электроэнергии. Актуальность работы определяется тем, что одним из направлений развития распределенной энергетики России является разработка дизель-генераторных установок переменной частоты вращения. Регулирование частоты вращения вала двигателя внутреннего сгорания в функции мощности нагрузки обеспечивает снижение удельного расхода топлива до 30 % и более.

Ключевые слова: дизель-генератор, дизель-генератор с переменной частотой вращения, преобразователь частоты, синхронный генератор, стоимость электроэнергии

I. Введение

Около десяти миллионов россиян, живущих на Дальнем Востоке и в северных регионах, получают энергию преимущественно от автономных дизельных электростанций. Для энергообеспечения районов России с децентрализованным энергоснабжением используется более 50 тыс. дизель-генераторных установок (ДГУ) суммарной мощностью 17 млн кВт и выработкой электроэнергии около 50 млрд кВт·ч в год. Расход топлива этими электростанциями составляет около 6 млн т в год. [1-3]. Поскольку такие электростанции работают с постоянной частотой вращения вала, у них нет возможности экономии топлива при пониженной нагрузке. В связи с этим актуальной становится разработка дизель-генераторных установок переменной частоты вращения (ДГПЧВ), обеспечивающих значительную экономию топлива (до 30 % и более) [4-12].

Ряд топологий силовых структур ДГПЧВ, в которых основным устройством, обеспечивающим стабилизацию параметров генерируемой электроэнергии, является полупроводниковый преобразователь, уже разрабо-

тан [6-10]. Среди возможных структур построения ДГПЧВ можно выделить следующие основные схемы, наиболее приемлемые для практического применения (рис. 1).

1. ДГПЧВ на основе матричного преобразователя частоты (МПЧ).
2. ДГПЧВ на основе синхронного генератора (СГ) специального типа.
3. ДГПЧВ на основе двухзвенного преобразователя частоты (ПЧ).
4. ДГПЧВ на основе широтно-импульсного преобразователя (ШИП).
5. ДГПЧВ на основе высокочастотного трансформатора.

II. Методика определения средней стоимости энергии, вырабатываемой дизель-генераторными установками

Объективный выбор наиболее приемлемого варианта ДГПЧВ по нескольким критериям (удельная стоимость электростанции, удельный расход топлива, средняя наработка на отказ) представляет собой задачу многокритериального анализа. Сложность данной задачи заключается в том, что вышеуказанные критерии имеют разную физическую природу, разную размерность и разную степень значимости для конкретного применения. Известен целый ряд методов многокритериального анализа. Однако создать единый показатель качества при многокритериальном анализе невозможно. Переход к относительным единицам, весовым коэффициентам, как правило, не позволяет получить объективного результата. Поэтому технико-экономическое сравнение рассматриваемых вариантов и ДГУ постоянной частоты вращения целесообразно проводить по средней за нормативный период эксплуатации стоимости выработанного электростанцией кВт·ч энергии. За нормативный период эксплуатации электростанции целесообразно принять среднюю наработку на отказ T .

В табл. 1 представлены расчетные значения средней наработки на отказ рассматриваемых вариантов электростанций для коэффициента нагрузки K_n , равной 50, 60, 70 и 80 %.

Средняя стоимость кВт·ч энергии за нормативный период эксплуатации определяется по формуле:

$$C_{\text{ср}} = \frac{C_{\text{топ}} \cdot g_e \cdot K_n \cdot P_{\text{ном}} \cdot T + C_{\text{уд}} \cdot P_{\text{ном}}}{T \cdot K_n \cdot P_{\text{ном}}} = C_{\text{топ}} \cdot g_e + \frac{C_{\text{уд}}}{T \cdot K_n}, \quad (1)$$

где $C_{\text{топ}}$ – стоимость 1 кг топлива, руб/кг; $C_{\text{уд}}$ – удельная стоимость электростанции, руб/кВт; g_e – удельный расход топлива, кг/кВт·ч; $P_{\text{ном}}$ – номинальная мощность электростанции, кВт; T – средняя наработка на отказ, ч.

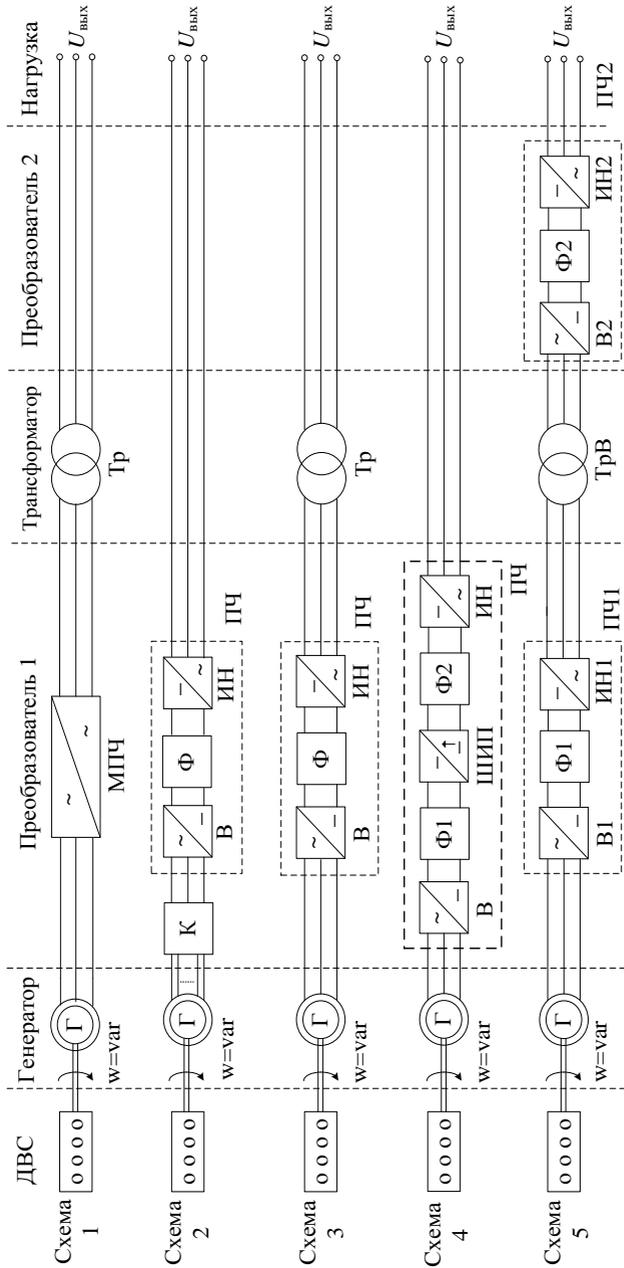


Рис. 1. Структуры силового канала ДГПЧВ:

ДВС – двигатель внутреннего сгорания; Г – генератор; ПЧ – преобразователь частоты;
 МПЧ – матричный преобразователь частоты; В – выпрямитель; Ф – фильтр; ИН – инвертор;
 ШИП – широтно-импульсный преобразователь; К – коммутатор; Тр – трансформатор;
 ТрВ – трансформатор высокочастотный

Таблица 1.
Средняя наработка на отказ ДГУ постоянной частоты вращения и ДГПЧВ при частичной нагрузке

| № п/п | Мощность нагрузки | ДГУ постоянной частоты вращения | ДГПЧВ на основе МПЧ | ДГПЧВ на основе СГ специального типа | ДГПЧВ на основе двухзвенного ПЧ | ДГПЧВ на основе ШИП | ДГПЧВ на основе высокочастотного трансформатора |
|-------|--------------------|---------------------------------|---------------------|--------------------------------------|---------------------------------|---------------------|-------------------------------------------------|
| | % $P_{\text{ном}}$ | $T, \text{ч}$ | $T, \text{ч}$ | $T, \text{ч}$ | $T, \text{ч}$ | $T, \text{ч}$ | $T, \text{ч}$ |
| 1 | 80 | 17 241 | 10 661 | 10 293 | 10 310 | 9 497 | 8 379 |
| 2 | 70 | 17 667 | 13 441 | 12 270 | 12 837 | 11 765 | 10 482 |
| 3 | 60 | 21 186 | 16 935 | 15 129 | 16 026 | 14 993 | 13 937 |
| 4 | 50 | 25 641 | 19 444 | 17 109 | 18 716 | 17 082 | 15 225 |

Показатель $C_{\text{ср}}$ учитывает удельную стоимость электростанции, удельный расход топлива и среднюю наработку на отказ и поэтому может применяться как интегральный для сравнения электростанций, построенных по различным схемам. При расчете средней стоимости кВт·ч энергии за нормативный период эксплуатации $C_{\text{ср}}$ приняты значения удельного расхода топлива g_e (табл. 2), полученные с помощью методики [13].

Таблица 2.
Удельный расход топлива ДГУ постоянной частоты вращения и ДГПЧВ при частичной нагрузке

| № п/п | Номинальная мощность ДГУ, кВт | Мощность нагрузки | ДГУ постоянной частоты вращения | ДГПЧВ на основе МПЧ | ДГПЧВ на основе многообмоточного СГ | ДГПЧВ на основе двухзвенного ПЧ | ДГПЧВ на основе ШИП | ДГПЧВ на основе высокочастотного трансформатора |
|-------|-------------------------------|--------------------|----------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------------|
| | | % $P_{\text{ном}}$ | $g_e, \text{г/кВт}\cdot\text{ч}$ | $g_e, \text{г/кВт}\cdot\text{ч}$ | $g_e, \text{г/кВт}\cdot\text{ч}$ | $g_e, \text{г/кВт}\cdot\text{ч}$ | $g_e, \text{г/кВт}\cdot\text{ч}$ | $g_e, \text{г/кВт}\cdot\text{ч}$ |
| 1 | 160 | 80 | 245 | 218 | 217 | 222 | 220 | 224 |
| 2 | | 70 | 250 | 215 | 214 | 218 | 217 | 219 |
| 3 | | 60 | 255 | 213 | 212 | 215 | 214 | 217 |
| 4 | | 50 | 270 | 214 | 213 | 215 | 215 | 218 |
| 5 | 40 | 80 | 280 | 251 | 248 | 256 | 255 | 259 |

Продолжение таблицы 1.

| № п/п | Номинальная мощность ДГУ, кВт | Мощность нагрузки | ДГУ постоянной частоты вращения | ДГПЧВ на основе МПЧ | ДГПЧВ на основе многообмоточного СГ | ДГПЧВ на основе двухзвенного ПЧ | ДГПЧВ на основе ШИП | ДГПЧВ на основе высокочастотного трансформатора |
|-------|-------------------------------|-------------------|---------------------------------|---------------------|-------------------------------------|---------------------------------|---------------------|-------------------------------------------------|
| | | | | | | | | |
| 6 | 40 | 70 | 290 | 252 | 249 | 256 | 255 | 260 |
| 7 | | 60 | 300 | 251 | 248 | 255 | 254 | 259 |
| 8 | | 50 | 315 | 257 | 255 | 262 | 260 | 265 |
| 9 | 4 | 80 | 343 | 275 | 272 | 283 | 280 | 285 |
| 10 | | 70 | 340 | 290 | 288 | 297 | 294 | 300 |
| 11 | | 60 | 370 | 300 | 298 | 307 | 305 | 310 |
| 12 | | 50 | 390 | 322 | 318 | 327 | 324 | 330 |

Значения удельной стоимости электростанции $C_{уд}$ (рис. 2) рассчитаны на основе экспертных оценок стоимости составляющего их оборудования.

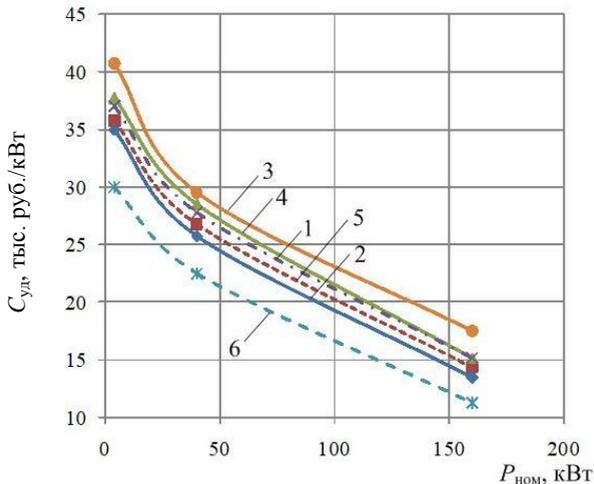


Рис. 2. Зависимости удельной стоимости электростанции от номинальной мощности для вариантов ДГПЧВ и ДГУ постоянной частоты вращения

На рис. 2-10 приняты следующие обозначения: 1 – ДГПЧВ на основе двухзвенного ПЧ; 2 – ДГПЧВ на основе ШИП; 3 – ДГПЧВ на основе

высокочастотного трансформатора; 4 – ДГПЧВ на основе СГ специального типа; 5 – ДГПЧВ на основе МПЧ; 6 – ДГУ постоянной частоты вращения

Цена дизельного топлива $C_{\text{топ}}$ принята равной 54,5 руб/кг. Для рассматриваемых вариантов ДГПЧВ и ДГУ постоянной частоты вращения зависимости расчетных значений $C_{\text{ср}}$ от номинальной мощности электростанции $P_{\text{ном}}$ представлены на рис. 3-6 при частичной нагрузке электростанции, равной соответственно 50, 60, 70 и 80 %.

III. Результаты расчета

Как видно из рис. 3-6, средняя стоимость кВт·ч энергии за период эксплуатации зависит от мощности нагрузки электростанции. При мощности нагрузки электростанции, равной 80 % от номинальной, средняя стоимость кВт·ч энергии ДГПЧВ на основе высокочастотного трансформатора, двухзвенного ПЧ и ШИП выше, чем у ДГУ постоянной частоты вращения. Средняя стоимость кВт·ч энергии ДГПЧВ на основе СГ специального типа и на основе МПЧ ниже, чем у ДГУ постоянной частоты вращения при номинальных мощностях электростанции более 80-100 кВт.

При мощности нагрузки электростанции, равной 70, 60, 50 % и, очевидно, меньшей 50 %, средняя стоимость кВт·ч энергии рассматриваемых вариантов ДГПЧВ ниже, чем у ДГУ постоянной частоты вращения во всем диапазоне рассматриваемых номинальных мощностей электростанций. Наименьшая средняя стоимость кВт·ч характерна для ДГПЧВ на основе МПЧ.

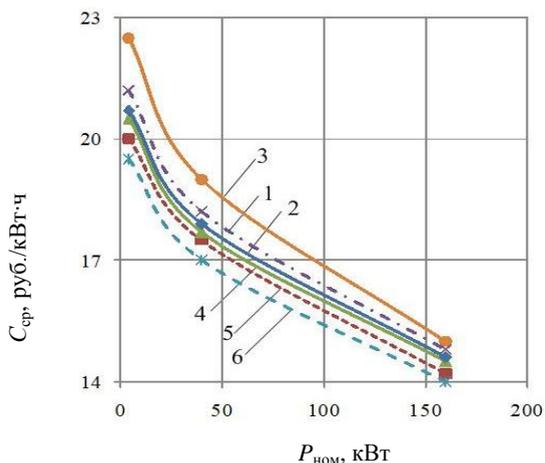


Рис. 3. Зависимости средней стоимости кВт·ч энергии за нормативный период эксплуатации от номинальной мощности электростанции при частичной нагрузке (80 % номинального значения)

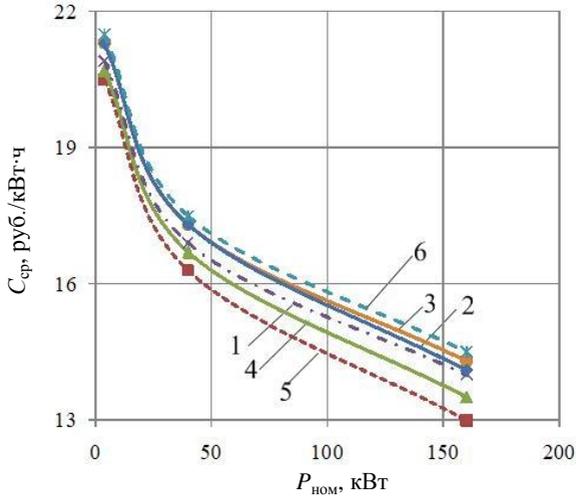


Рис. 4. Зависимости средней стоимости кВт·ч энергии за нормативный период эксплуатации от номинальной мощности электростанции при частичной нагрузке (70 % номинального значения)

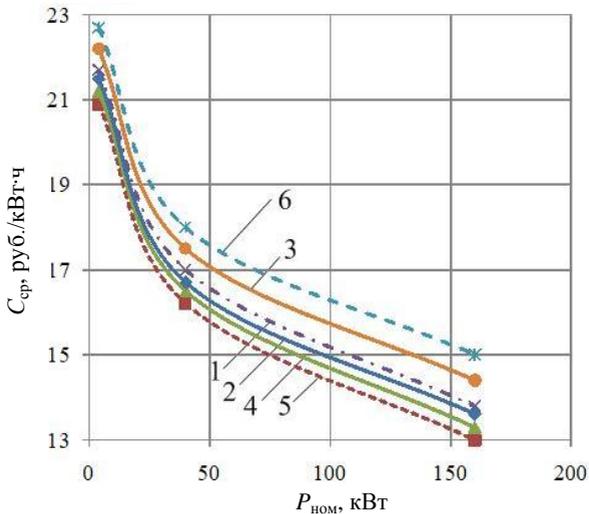


Рис. 5. Зависимости средней стоимости кВт·ч энергии за нормативный период эксплуатации от номинальной мощности электростанции при частичной нагрузке (60 % номинального значения)

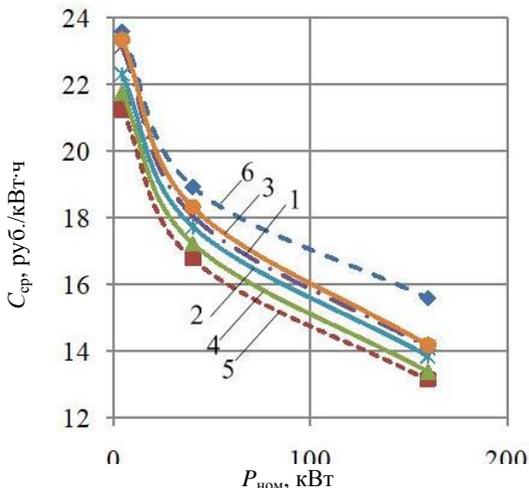


Рис. 6. Зависимости средней стоимости кВт·ч энергии за нормативный период эксплуатации от номинальной мощности электростанции при частичной нагрузке (50 % номинального значения)

На рис. 7-10 представлены зависимости снижения стоимости электроэнергии, вырабатываемой рассматриваемыми вариантами ДГПЧВ по сравнению с ДГУ постоянной частоты вращения при частичной нагрузке, от номинальной мощности электростанции $P_{\text{ном}}$. Зависимости представлены соответственно для частичной нагрузки электростанции, равной 50, 60, 70 и 80 % номинального значения.

Снижение стоимости энергии, вырабатываемой ДГПЧВ:

$$\mathcal{E} = \frac{C_{\text{срДГПЧВ}} - C_{\text{срДГУ}}}{C_{\text{срДГУ}}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где $C_{\text{срДГПЧВ}}$ – средняя стоимость кВтч энергии за нормативный период эксплуатации для ДГПЧВ; $C_{\text{срДГУ}}$ – средняя стоимость кВтч энергии за нормативный период эксплуатации для ДГУ постоянной частоты вращения.

Как видно из рис. 7, при мощности нагрузки ДГПЧВ, составляющей 80 % номинального значения, снижение стоимости кВт·ч выработанной энергии по сравнению с ДГУ постоянной частоты вращения наблюдается только у ДГПЧВ на основе МПЧ в диапазоне номинальных мощностей электростанций менее 3 кВт и более 70 кВт и при мощности $P_{\text{ном}} = 160$ кВт достигает 3,5 %.

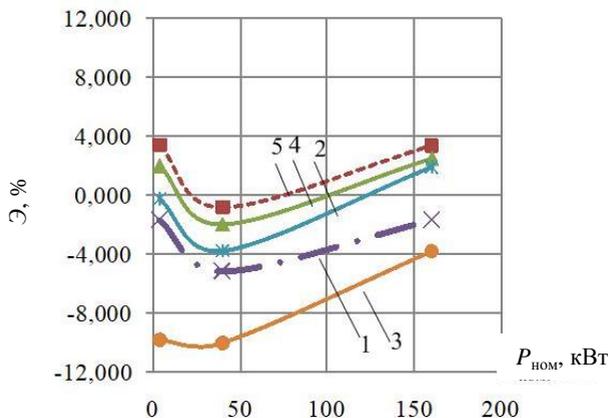


Рис. 7. Зависимости снижения стоимости электроэнергии ДГПЧВ по сравнению с ДГУ постоянной частоты вращения от номинальной мощности электростанции при частичной нагрузке (80 % номинального значения)

При нагрузке ДГПЧВ, составляющей 70 % номинального значения, снижение стоимости кВт·ч выработанной энергии по сравнению с ДГУ постоянной частоты вращения (рис. 8) наблюдается у всех вариантов ДГПЧВ во всем рассматриваемом диапазоне номинальных мощностей электростанций. Причем с увеличением номинальной мощности электростанции стоимость кВт·ч снижается. Наибольшее снижение стоимости кВт·ч наблюдается у ДГПЧВ на основе МПЧ ($\mathcal{E} = 9\%$ при $P_{\text{ном}} = 160$ кВт), наименьшее – у ДГПЧВ на основе высокочастотного трансформатора ($\mathcal{E} = 3,5\%$ при $P_{\text{ном}} = 160$ кВт).

При нагрузке ДГПЧВ, составляющей 60 % и 50 % номинального значения, снижение стоимости кВт·ч выработанной энергии по сравнению с ДГУ постоянной частоты вращения (рис. 9 и 10) наблюдается также у всех вариантов ДГПЧВ во всем рассматриваемом диапазоне номинальных мощностей электростанций. Также с увеличением номинальной мощности электростанции стоимость кВт·ч снижается. Наибольшее снижение стоимости кВт·ч наблюдается у ДГПЧВ на основе МПЧ (при нагрузке, равной 60 % номинального значения, $\mathcal{E} = 12\%$ при $P_{\text{ном}} = 160$ кВт; при нагрузке, равной 50 % номинального значения, $\mathcal{E} = 16\%$ при $P_{\text{ном}} = 160$ кВт), наименьшее – у ДГПЧВ на основе высокочастотного трансформатора (при нагрузке, равной 60 % номинального значения, $\mathcal{E} = 6\%$ при $P_{\text{ном}} = 160$ кВт; при нагрузке, равной 50 % номинального значения, $\mathcal{E} = 9\%$ при $P_{\text{ном}} = 160$ кВт).

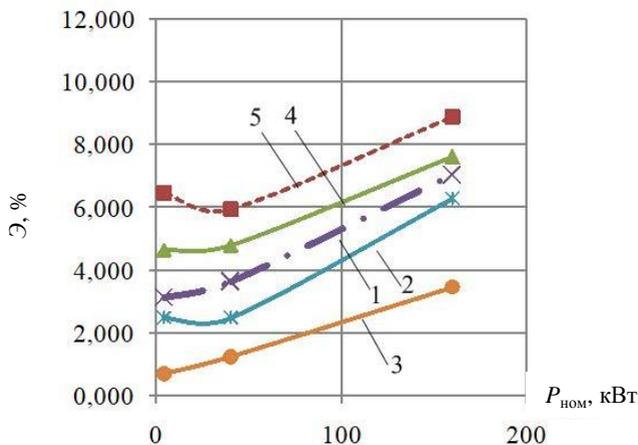


Рис. 8. Зависимости снижения стоимости электроэнергии ДППЧ по сравнению с ДГУ постоянной частоты вращения от номинальной мощности электростанции при частичной нагрузке (70 % номинального значения)

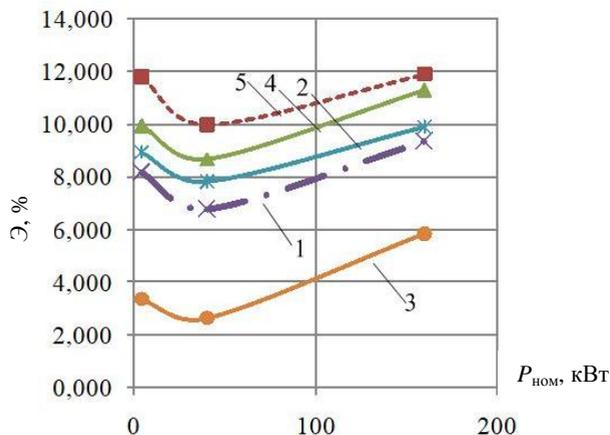


Рис. 9. Зависимости снижения стоимости электроэнергии ДППЧ по сравнению с ДГУ постоянной частоты вращения от номинальной мощности электростанции при частичной нагрузке (60 % номинального значения)

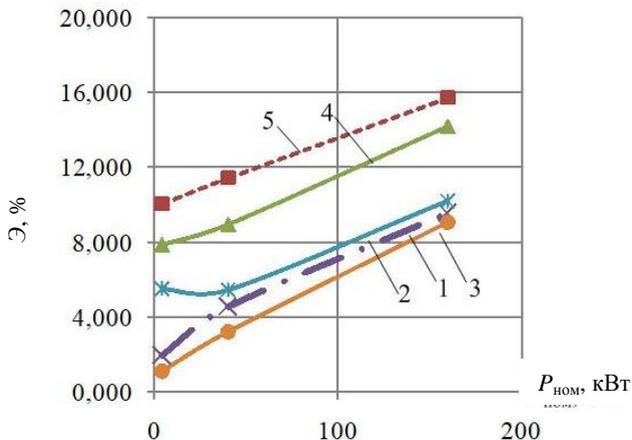


Рис. 10. Зависимости снижения стоимости электроэнергии ДГПЧВ по сравнению с ДГУ постоянной частоты вращения от номинальной мощности электростанции при частичной нагрузке (60 % номинального значения)

Таким образом, для ДГПЧВ большей номинальной мощности характерна более низкая стоимость вырабатываемой энергии.

IV. Выводы

1. Техничко-экономическое сравнение различных вариантов ДГПЧВ и ДГУ постоянной частоты вращения целесообразно проводить по средней за период эксплуатации стоимости кВт·ч электроэнергии, вырабатываемой электростанцией.

2. При мощности нагрузки ДГПЧВ, составляющей менее 70 % номинального значения, средняя за период эксплуатации стоимость кВтч энергии исследуемых вариантов ДГПЧВ ниже, чем у ДГУ постоянной частоты вращения во всем диапазоне рассматриваемых номинальных мощностей электростанций.

3. Наибольшее снижение стоимости кВт·ч наблюдается также у ДГПЧВ на основе МПЧ, наименьшее – у ДГПЧВ на основе высокочастотного трансформатора.

Библиографический список

- [1] Хватов О.С., Дарьенков А.Б., Тарасов И.М. Дизель-генераторная электростанция с переменной частотой вращения вала // Вестник ИГЭУ. 2010. № 2. С. 53-57.
- [2] Дарьенков А.Б., Хватов О.С. Автономная дизельная электростанция с нейросетевым задатчиком экономичного режима // Промышленная энергетика. 2013. № 12. С. 26-29.
- [3] Хватов О.С., Дарьенков А.Б. Электростанция на базе дизель-генератора переменной частоты вращения // Электротехника. 2014. № 3. С. 28-32.
- [4] Орлов А.В., Путятинский В.А., Сапожников В.В. Перспективы создания дизель-электрических установок с переменной частотой вращения // Судостроение. 1976. № 10. С. 28-29.
- [5] Алешков О.А. Повышение топливной экономичности первичного дизеля в составе многофункционального энерготехнологического комплекса оптимизацией скоростного режима: автореф. дис. канд. техн. наук, АлтГТУ, Барнаул, 2009. – 16 с.
- [6] Лукутин Б.В., Климова Г.Н., Обухов С.Г., Шутов Е.А., Парников Н.М. Формирование энергоэффективных режимов дизельной электростанции инверторного типа // Известия вузов. Электромеханика. 2009. № 6. С. 80-82.
- [7] Лукутин Б.В., Климова Г.Н., Обухов С.Г., Шутов Е.А., Парников Н.М. Исследование работы инверторной дизельной электростанции на частичных характеристиках дизеля // Электричество. 2009. № 12. С. 36а-40.
- [8] Малоземов А.А. Повышение эффективности многофункциональных энерготехнологических комплексов совершенствованием двигатель-генераторных установок: автореф. дис. докт. техн. наук, ЮУрГУ, Челябинск, 2011. – 34 с.
- [9] Обухов С.Г. Повышение эффективности комбинированных автономных систем электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии: дисс. докт. техн. наук, ТПУ, Томск, 2013. – 392 с.
- [10] Шакарян Ю.Г., Долуденко А.Н., Жораев Т.Ю., Новиков А.Н., Новиков Н.Л. Разработка многофункционального энергетического комплекса на основе гибридной ветродизельной установки с накопителем энергии. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ras.ru/FSStorage/download.aspx?id=20f0999e-e0cc-4660-a775-7f8ff0e7adbс> (дата обращения 21.04.2020).
- [11] Dar'enkov A.B., Guzev S.A., Fedorov O.V. Autonomous power plant with variable speed based on multi-windings generator // Int. Conf. on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2017», Май 16-19, 2017, Челябинск, Россия. 2017. № 8076250. P. 1-5.
- [12] Dar'enkov A., Samoyavchev I., Khvatov O., Sugakov V. Improving energy performance power station of ship with integrated electric propulsion // Int. Conf. «International Conference on Mechanical, Aeronautical and Automotive Engineering, ICMAA», Февраль 25-27, 2017, Малакка, Малайзия. МАТЕС Web of Conferences, 2017. Vol. 108. № 14002.
- [13] Хватов О.С., Дарьенков А.Б., Самоявчев И.С. Топливная экономичность единой электростанции автономного объекта на базе двигателя внутреннего сгорания переменной скорости вращения // Эксплуатация морского транспорта. 2013. № 1 (71). С. 47-50.

A.B. Dar'enkov, O.S. Khvatov

EVALUATION OF AVERAGE COST OF GENERATED ELECTRICITY FOR OPERATION PERIOD OF VARIABLE SPEED DIESEL GENERATOR SET

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. One of the directions of development of distributed energy in Russia is the development of variable speed diesel generator sets. Adjusting the speed of the internal combustion engine shaft in the function of load power reduces the specific fuel consumption by more than 30 %. The paper discusses options for constructing variable speed diesel generator sets. The average cost of generated electricity for the operation period of variable speed diesel generator sets have been estimated.

Keywords: cost of electricity, diesel generator, frequency converter, variable speed diesel generator, synchronous generator.

References

- [1] O.S. Khvatov, A.B. Daryenkov and I.M. Tarasov, «Diesel-generator power plant with shaft frequency rotation», *Vestnik IGEU*, vol. 2, pp. 53-57, 2010.
- [2] A.B. Dar'enkov and O.S. Khvatov, «Avtonomnaya dizel'naya elektrostanciya s nejrosetevym zadatchikom ekonomichnogo rezhima [Autonomous diesel power station with an economy mode setting device based on a neural network]», *Industrial Power Engineering*, no. 12, pp. 26-29, 2013 (in Russian).
- [3] O.S. Khvatov and A.B. Dar'enkov, «Power plant based on a variable-speed diesel generator», *Russian Electrical Engineering*, vol. 85, no. 3, pp. 145-149, 2014.
- [4] A.V. Orlov, V.A. Putyatinsky and V.V. Sapozhnikov, «Perspektivy sozdaniya dizel'-elektricheskikh ustanovok s peremennoj chastotoj vrashcheniya [Prospects for the creation of diesel electric sets with variable rotation speed]», *Sudostroenie [Ship-building]*, № 10, pp. 28-29, 1976 (in Russian).
- [5] O.A. Aleshkov, «Povyshenie toplivnoj ekonomichnosti pervichnogo dizelya v sostave mnogofunktional'nogo energotekhnologicheskogo kompleksa optimizaciej skorostnogo rezhima [Improving the fuel economy of a primary diesel engine as part of a multifunctional energy technology complex by optimizing the speed mode]», Cand. of Tech. S. thesis, Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia, 2009 (in Russian).
- [6] B.V. Lukutin, G.N. Klimova, S.G. Obukhov, E.A. Shutov, N.M. Parnikov, «Formirovanie energoeffektivnyh rezhimov dizel'noj elektrostancii invertornogo tipa [Formation of energy-efficient modes of an inverter-type diesel power station]», *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Elektromekhanika (Russian Electromechanics)*, no. 6, pp. 80-82, 2009 (in Russian).

- [7] B.V. Lukutin, G.N. Klimova, S.G. Obukhov, E.A. Shutov, N.M. Parnikov, «Issledovanie raboty invertornoj dizel'noj elektrostancii na chastichnyh karakteristikah dizelya [The study of the inverter diesel power plant on the partial characteristics of a diesel engine]», *Elektrichestvo*, no. 12, pp. 36a-40, 2009 (in Russian).
- [8] A.A. Malozyomov, «Povyshenie effektivnosti mnogofunktional'nyh energotekhnologicheskikh kompleksov sovershenstvovaniem dvigatel'-generatornyh ustanovok [Improving the efficiency of multifunctional energy technology complexes by improving engine-generator sets]», Doctor of Tech. S. thesis, South Ural State University (national research university), Chelyabinsk, Russia, 2011 (in Russian).
- [9] S.G. Obukhov, «Povyshenie effektivnosti kombinirovannyh avtonomnyh sistem elektroobzheniya s vozobnovlyaemyimi istochnikami energii [Improving the efficiency of combined autonomous power supply systems with renewable energy sources]», Doctor of Tech. S. thesis, Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia, 2013 (in Russian).
- [10] Yu.G. Shakaryan, A.N. Doludenko, T.Yu. Zhoraev, A.N. Novikov and N.L. Novikov, «Razrabotka mnogofunktional'nogo energeticheskogo kompleksa na osnove gibridnoj vetrodizel'noj ustanovki s nakopitelem energii [Development of a multifunctional energy complex based on a hybrid wind-diesel engine with energy storage]», [Online]. Available at: <http://www.ras.ru/FStorage/download.aspx?id=20f0999e-e0cc-4660-a775-7f8ff0e7adbc> [Accessed: Apr. 21, 2020] (in Russian).
- [11] A.B. Dar'enkov, S.A. Guzev and O.V. Fedorov, «Autonomous power plant with variable speed based on multi-windings generator», in proc. *2017 Int. Conf. Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2017*, May 16-19, 2017, Chelyabinsk, Russia, no. 8076250, pp. 1-5.
- [12] A. Dar'enkov, I. Samoyavchev, O. Khvatov and V. Sugakov, «Improving energy performance power station of ship with integrated electric propulsion», in proc. *Int. Conf. on Mechanical, Aeronautical and Automotive Engineering, ICMAA*, 2017, Feb. 25-27, Malacca, Malaysia. MATEC Web of Conferences, 2017. Vol. 108. № 14002.
- [13] O.S. Khvatov, A.B. Darienkov and I.S. Samoiaevchev, «The fuel profitability of unified electric power station of ship based on a explosion engine by alternating frequency rotation of shaft», *Jekspluatacija morskogo transporta*, no. 1, pp. 75-50, 2013.