

Научная статья
УДК 621.311.61
<https://doi.org/10.24143/2073-1574-2022-1-79-84>

Сравнительный анализ энергетических показателей судовой электростанции на базе классических дизель-генераторных установок и электростанции с дизель-генераторной установкой переменной частоты вращения

Олег Станиславович Хватов¹✉, Илья Александрович Тарпанов²

^{1, 2} Волжский государственный университет водного транспорта,
Нижний Новгород, Россия, khvatov_oleg@mail.ru ✉

Аннотация. Обозначена важная научно-техническая задача повышения эффективности эксплуатации дизель-генераторных электростанций. Разработка дизель-генераторных установок, работающих в режиме переменной частоты вращения при долевых нагрузках на электростанцию, является одним из возможных способов решения поставленной задачи. Отмечена возможность внедрения в практику подобных дизельных электростанций в последние десятилетия в связи с появлением необходимого преобразовательного полупроводникового оборудования, а также существенным повышением цен на углеводородное топливо и объективно сформированными требованиями по улучшению экологических показателей работы технических комплексов. Представлен сравнительный анализ энергетической эффективности эксплуатации двух электростанций: на базе классических дизель-генераторных установок и электростанции с дизель-генераторной установкой переменной частоты вращения. Сравнение энергетической эффективности указанных электростанций предлагается проводить на основе расчета удельного и абсолютного расхода топлива. Рассматривается методика определения показателей по расходу топлива. Методика основана на использовании многопараметровой характеристики дизельного двигателя и значений коэффициентов полезного действия элементов силового оборудования установок. Приведены результаты расчета удельного расхода топлива рассматриваемых электростанций при изменении мощности нагрузки с учетом режима работы генераторных установок. Результаты подтверждают энергетическую эффективность электростанции, в состав которой входит дизель-генераторная установка переменной частоты вращения. Эффективность повышается за счет экономии углеводородного топлива. Наибольшая экономия соответствует работе электростанции в диапазоне нагрузок ниже 20 % от номинальной.

Ключевые слова: судовая электростанция, дизель-генераторная установка переменной частоты вращения, коэффициент полезного действия, нагрузка, частота вращения

Для цитирования: Хватов О. С., Тарпанов И. А. Сравнительный анализ энергетических показателей судовой электростанции на базе классических дизель-генераторных установок и электростанции с дизель-генераторной установкой переменной частоты вращения // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2022. № 1. С. 79–84. <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2022-1-79-84>.

Original article

Comparative analysis of energy parameters of ship power plant based on classical diesel generator units and power plants with variable speed diesel generators

Oleg S. Khvatov¹✉, Ilya A. Tarpanov²

^{1, 2} Volga State University of Water Transport,
Nizhny Novgorod, Russia, khvatov_oleg@mail.ru ✉

Abstract. The article highlights an important scientific and technical problem: increasing the operation efficiency of the diesel generator power plants. One of the possible solutions of the problem is developing the diesel generators that operate in a variable speed mode with shared loads on the power plant. Introducing such diesel power plants into practice in recent decades has become possible due to the necessary converting semiconductor equipment, as well as a significant increase in prices for hydrocarbon fuels and objectively formulated requirements to improve the environmental performance of technical complexes. There is presented a comparative analysis of the energy efficiency of two power plants: with classic diesel generators and with a variable speed diesel generator. It has been proposed to

compare the energy efficiency of the power plants by calculating the specific and absolute fuel consumption. The method of determining parameters of fuel consumption is considered. The method is based on using a multi-parameter characteristic of a diesel engine and the values of the efficiency ratios of the elements of the power equipment of plants. The results of calculating the specific fuel consumption of the power plants when changing the load power subject to the operating mode of the generators are presented. The results confirm the energy efficiency of the power plant with a variable speed diesel generator. Efficiency is increased due to saving the hydrocarbon fuels. The maximal savings correspond to the power plant operation under the load 20% less than the nominal.

Keywords: marine power plant, variable speed diesel generator, efficiency factor, load, rotation speed

For citation: Khvatov O. S., Tarpanov I. A. Comparative analysis of energy parameters of ship power plant based on classical diesel generator units and power plants with variable speed diesel generators. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*. 2022;1:79-84. (In Russ.) <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2022-1-79-84>.

Введение

Повышение эффективности эксплуатации дизель-генераторных электростанций является важной научно-технической задачей. Один из возможных способов ее решения связан с разработкой дизель-генераторных установок (ДГУ), работающих в режиме переменной частоты вращения при долевых нагрузках на электростанцию [1]. Обоснование целесообразности принудительного регулирования частоты вращения дизельного двигателя с целью оптимизации расхода потребляемого им углеводородного топлива в зависимости от мощности нагрузки на электростанцию доказано и подтверждено экспериментально профессором А. В. Орловым еще в 70-е гг. XX в. Однако внедрение в практику подобных дизельных электростанций стало возможным только в последние десятилетия, в связи с появлением необходимого преобразовательного полупроводникового оборудования, а также существенным увеличением цен на углеводородное топливо и объективно сформированными требованиями по улучшению экологических показателей работы технических комплексов.

Дизель-генераторные установки являются основными источниками электроэнергии на многих технических объектах, в том числе и на транспортных. На судах морского и речного флота ДГУ работают в составе судовой электростанции (СЭС) как в автономном режиме, так и параллельно с другими ДГУ. Очевидно, что повышение энергетической эффективности эксплуатации ДГУ в составе СЭС позволит оптимизировать расход потребляемого топлива, а также существенно снизить нагрузку на окружающую среду за счет уменьшения объема отработанных газов [2–5].

Расчет энергетической эффективности судовой электростанции

В настоящей работе проведено сравнение энергетической эффективности эксплуатации двух СЭС. Одна из СЭС состоит из двух ДГУ классического типа, каждая из которых работает при постоянной частоте вращения. Другая, наряду с классической ДГУ, имеет в своем составе вентильную ДГУ, частота вращения которой регулируется на долевых режимах нагрузки СЭС. Сравнение энергетической эффективности указанных СЭС проведено на основе

расчета удельного и абсолютного расхода топлива электростанций. Определение показателей по расходу топлива осуществляется по методике, основные положения которой рассмотрим ниже.

На рис. 1 представлена энергетическая диаграмма дизель-генераторной установки переменной частоты вращения (ДГПЧВ), состоящей из дизельного двигателя (ДВС), синхронного генератора (СГ), полупроводникового преобразователя (ПП) и трансформатора (Т).

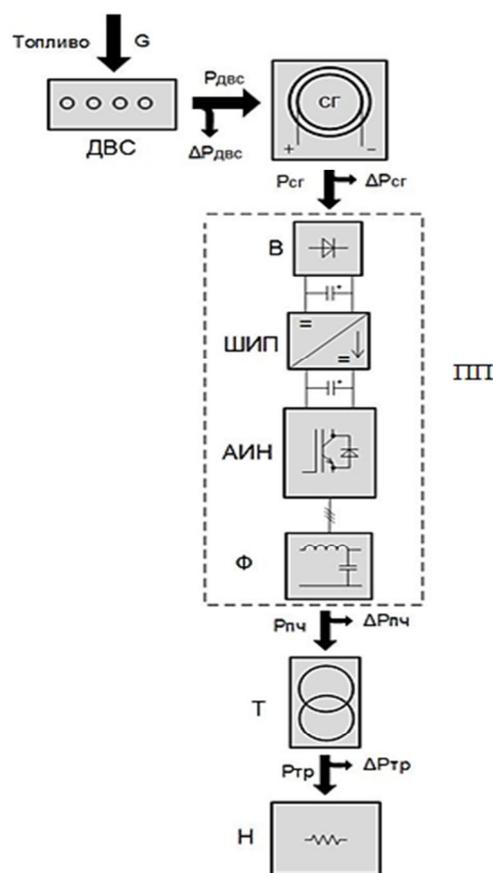


Рис. 1. Энергетическая диаграмма дизель-генераторной установки переменной частоты вращения

Fig. 1. Energy diagram of a variable speed diesel generator

Для определения значений топливных показателей при работе ДГПЧВ используется многопараметровая характеристика ДВС и значения коэффициентов полезного действия (КПД) элементов силового оборудования ДГПЧВ.

Коэффициент полезного действия СГ определяется по формуле

$$\eta_{\text{СГ}} = \frac{P_{2\text{СГ}}}{P_{1\text{М}}} = \frac{P_{1\text{СГ}} - P_{\Sigma\text{СГ}}}{P_{1\text{М}}} = 1 - \frac{P_{\Sigma\text{СГ}}}{P_{1\text{М}}},$$

где $P_{1\text{М}}$ – подводимая механическая мощность; $P_{\Sigma\text{СГ}}$ – суммарные потери в СГ.

Суммарные потери в СГ определяются по формуле

$$P_{\Sigma\text{СГ}} = P_{\text{с}} + P_{\text{щ}} + P_{\text{эл}} + P_{\text{доб}} + P_{\text{мех}},$$

где $P_{\text{с}}$ – потери в стали; $P_{\text{щ}}$ – потери в переходных контактах щеток; $P_{\text{эл}}$ – электрические потери; $P_{\text{доб}}$ – добавочные потери; $P_{\text{мех}}$ – механические и вентиляционные потери.

При работе на долевых режимах нагрузки СЭС частота вращения ДГПЧВ принудительно регулируется, как следствие, СГ работает при переменных значениях как величины, так и частоты напряжения в обмотках статора (f). При этом меняется величина потерь в стали, которые состоят из потерь от гистерезиса, пропорциональных частоте перемагничивания в первой степени, и потерь от вихревых токов, пропорциональных частоте перемагничивания во второй степени:

$$P_{\text{с}} = K_{P_{1,0/50}} (f / 50)^{\beta} B^2 m.$$

Зависимость суммарных потерь от частоты перемагничивания выражается степенной функцией, показатель которой зависит от свойств стали (ее марки) [6].

На рис. 2 представлена зависимость КПД СГ от мощности нагрузки при разных значениях частоты напряжения в статоре, т. е. при разных частотах вращения ДВС.

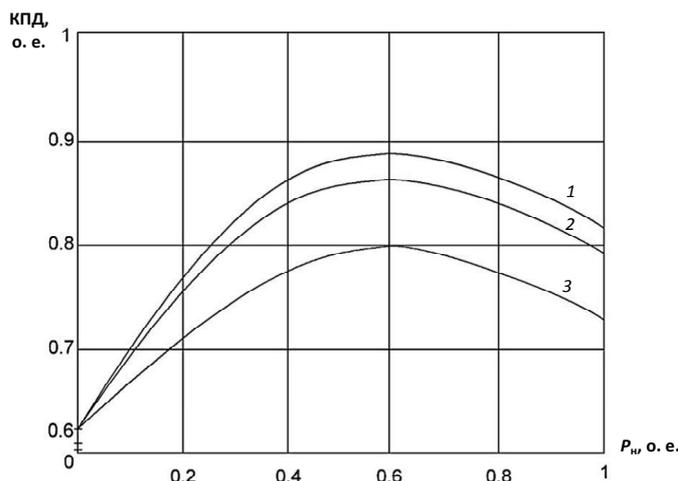


Рис. 2. Зависимость КПД синхронного генератора МСК91-4 от мощности нагрузки:
1 – $f = 50$ Гц; 2 – $f = 35$ Гц; 3 – $f = 25$ Гц

Fig. 2. Dependence of the efficiency of the synchronous generator MSK91-4: 1 – $f = 50$ Гц; 2 – $f = 35$ Гц; 3 – $f = 25$ Гц

Расчет произведен в пакете MathCad. В качестве СГ был выбран МСК91-4 ($P_{\text{ном}} = 75$ кВт, $n_{\text{ном}} = 1500$ об/мин).

Расчет КПД полупроводникового преобразователя и трансформатора производили с учетом долевой нагрузки на СЭС. Коэффициент полезного действия трансформатора определяется по формуле

$$\eta_{\text{T}} = \frac{P_{2\text{T}}}{P_{1\text{T}}} = 1 - \frac{P_{\Sigma\text{T}}}{P_{1\text{T}}},$$

где $P_{\Sigma\text{T}}$ – суммарные потери в трансформаторе.

Суммарные потери определяются по формуле

$$P_{\Sigma\text{T}} = P_{1\text{T}} + P_{\text{ст}} + P_{2\text{T}},$$

где $P_{1\text{T}}$, $P_{2\text{T}}$ – электрические потери в первичной и вторичной обмотках трансформатора соответственно; $P_{\text{ст}}$ – потери в стали сердечника трансформатора [7].

Коэффициент полезного действия ПП равен произведению КПД неуправляемого выпрямителя (НВ), широтно-импульсного преобразователя (ШИП), фильтра (Ф) и автономного инвертора (АИ):

$$\eta = \eta_{\text{НВ}} \eta_{\text{ШИП}} \eta_{\text{Ф}} \eta_{\text{АИ}}.$$

На рис. 3 представлены зависимости КПД полупроводникового преобразователя и трансформатора от мощности нагрузки.

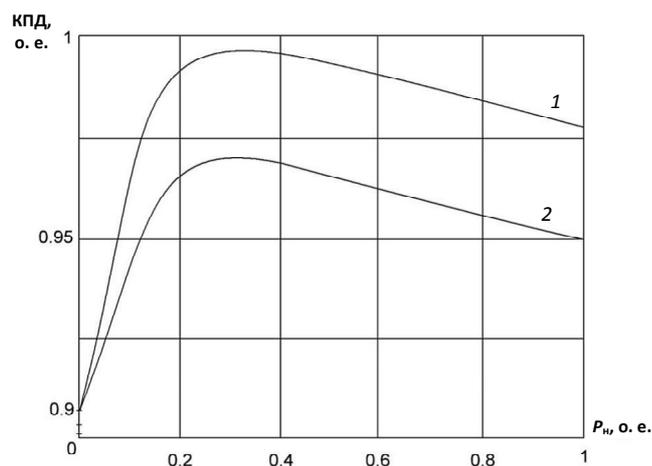


Рис. 3. Зависимости КПД полупроводникового преобразователя (1) и трансформатора (2) от мощности нагрузки

Fig. 3. Dependences of the efficiency of a semiconductor converter (1) and a transformer (2) on the load capacity

С учетом КПД элементов силового электрооборудования ДГПЧВ в пакете MathCad были произведены расчеты удельного потребления топлива для двух вариантов СЭС: классической, состоящей из двух ДГУ постоянной частоты вращения,

и СЭС, которая помимо классической ДГУ имеет в своем составе ДГПЧВ.

В расчетах использовалась многопараметровая характеристика дизельного ДВС (рис. 4) номинальной мощностью 129 кВт (2 100 об/мин).

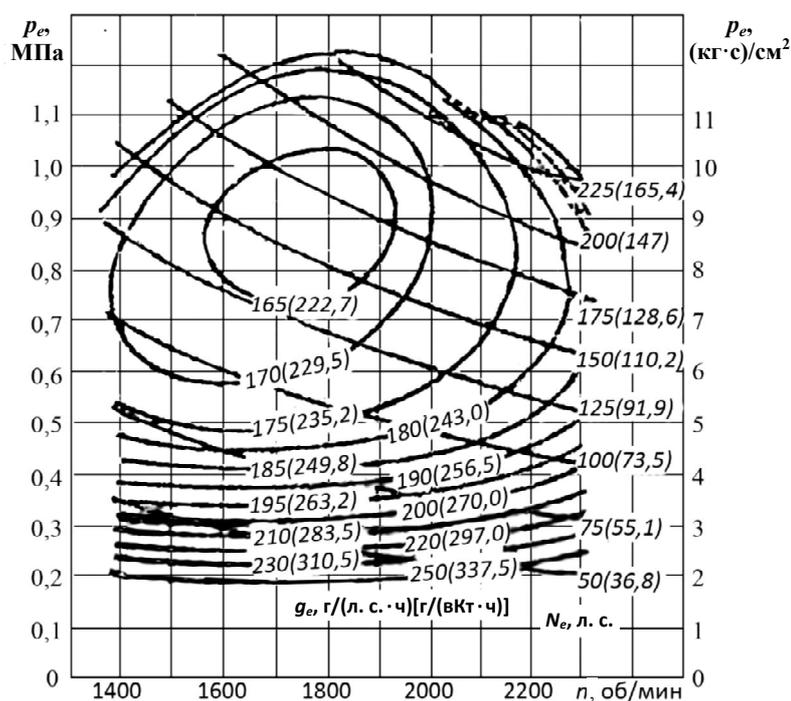


Рис. 4. Многопараметровая (универсальная) характеристика дизеля СМД-62: N_e – мощность дизеля, л. с. (кВт); n – обороты дизеля; g_e – удельный расход топлива, г/(л. с. · ч) [г/кВт · ч]; p_e – среднее эффективное давление на поршень

Fig. 4. Multi-parameter (universal) characteristic of the СМД-62 diesel engine: N_e - diesel power, hp (kW); n - diesel rotations; g_e - specific fuel consumption, g / (hp · h) [g / kW · h]; p_e - average effective pressure on the piston

На основании произведенных расчетов построены графики (рис. 5) удельного расхода топлива рассматриваемых электростанций при изменении мощности

нагрузки в диапазоне от 10 до 100 % номинальной мощности, с учетом режима работы генераторных установок (автономный или параллельный).

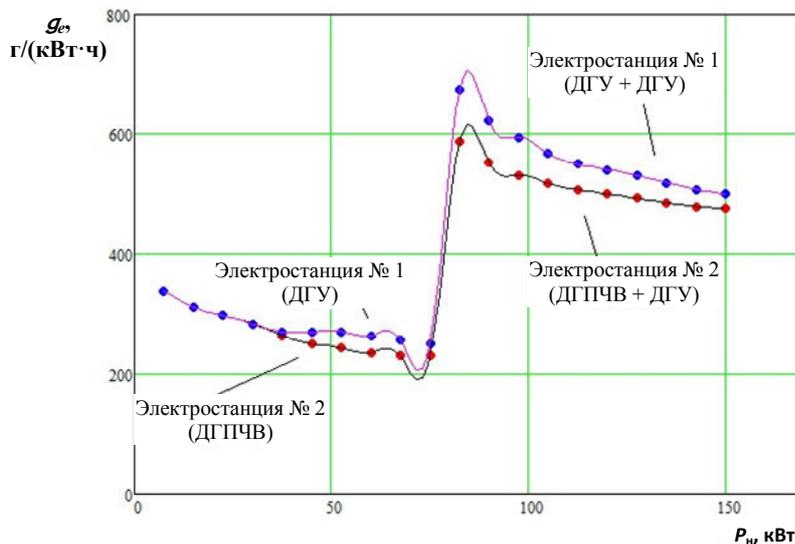


Рис. 5. Удельный расход топлива двух электростанций при изменении мощности нагрузки

Fig. 5. Specific fuel consumption of two power plants with changing load capacity

Согласно рис. 5 использование ДГПЧВ позволит существенно повысить энергетическую эффективность СЭС за счет экономии углеводородного топлива. Наибольшая экономия соответствует работе СЭС в диапазоне нагрузок ниже 20 % от номинальной и составляет 10–16 %.

Заключение

Предложена методика расчета, позволяющая определить показатели потребления топлива, и представлены результаты сравнительного анали-

за энергетической эффективности эксплуатации двух СЭС: одна из которых состоит из двух ДГУ классического типа, другая – наряду с классической ДГУ – имеет в своем составе ДГПЧВ, частота вращения которой регулируется в зависимости от мощности нагрузки СЭС. Сравнение энергетической эффективности указанных СЭС проведено на основе расчета удельного и абсолютного расхода топлива. Результаты расчета демонстрируют очевидную экономию топлива при использовании электростанции, в состав которой входит ДГПЧВ.

Список источников

1. Хватов О. С., Бурда Е. М., Тарпанов И. А., Дарьенков А. Б., Кобяков Д. С. Параллельная работа дизель-генераторных установок постоянной и переменной частоты вращения // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология. 2018. № 1. С. 93–99.
2. Хватов О. С., Тарпанов И. А., Кузнецов П. В. Судовая электроэнергетическая система с обратной валогенераторной установкой по схеме машины двойного питания и дизель-генератора переменной частоты вращения // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология. 2021. № 3. С. 93–100.
3. Хватов О. С. Электротехнические генераторные комплексы переменной частоты вращения на основе машины двойного питания: моногр. Н. Новгород, 2015. 276 с.

4. Delgado C., Dominguez-Navarro J. A. Optimal design of a hybrid renewable energy system ecological vehicles and renewable energies // Ninth international conference on publication year (EVER). 2014. P. 1–8.
5. Хватов О. С., Дарьенков А. Б., Самоявчев И. С., Поляков И. С. Автономные генераторные установки на основе двигателей внутреннего сгорания переменной частоты вращения: моногр. Н. Новгород, 2016. 172 с.
6. Кислицин А. Л. Синхронные машины: учеб. пособие. Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2000. 108 с.
7. Вольдек А. И. Электрические машины. СПб.: Питер, 2008. 320 с.

References

1. Khvatov O. S., Burda E. M., Tarpanov I. A., Dar'enkov A. B., Kobiakov D. S. Parallel'naia rabota dizel'-generatornykh ustanovok postoiannoii i peremennoi chastoty vrashcheniia [Parallel operation of diesel generators of con-

- stant and variable rotation frequency]. Vestnik Astrakanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaiia tekhnika i tekhnologiia, 2018, no 1, pp. 93-99.

2. Khvatov O. S., Tarpanov I. A., Kuznetsov P. V. Sudovaya elektroenergeticheskaya sistema s obratimoi valogeneratornoii ustanovkoi po skheme mashiny dvoynogo pitaniia i dizel'-generatora peremennoi chastoty vrashcheniia [Marine power system with reversible shaft-driven generator by scheme of dual-feed machine and variable speed diesel generator]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaiia tekhnika i tekhnologiia*, 2021, no. 3, pp. 93-100.

3. Khvatov O. S. *Elektrotekhnicheskie generatorynye komplekсы peremennoi chastoty vrashcheniia na osnove mashiny dvoynogo pitaniia: monografiia* [Electrotechnical generator complexes of variable frequency of rotation on basis of double power supply machine: monograph]. Nizhnyi Novgorod, 2015. 276 p.

4. Delgado C., Dominguez-Navarro J. A. Optimal design of a hybrid renewable energy system ecological vehicles and renewable energies. *Ninth international conference on publication year (EVER)*, 2014. Pp. 1-8.

5. Khvatov O. S., Dar'nikov A. B., Samoivchev I. S., Poliakov I. S. *Avtonomnye generatorynye ustanovki na osnove dvigatelei vnutrennego sgoraniia peremennoi chastoty vrashcheniia: monografiia* [Autonomous generator installations based on internal combustion engines of variable speed: monograph]. Nizhnyi Novgorod, 2016. 172 p.

6. Kislitsin A. L. *Sinkhronnye mashiny: uchebnoe posobie* [Synchronous machines: tutorial]. Ulianovsk, Izd-vo UIGTU, 2000. 108 p.

7. Vol'dek A. I. *Elektricheskie mashiny* [Electric machines]. Saint-Petersburg, Piter Publ., 2008. 320 p.

Статья поступила в редакцию 03.12.2021; одобрена после рецензирования 13.12.2021; принята к публикации 30.12.2021
The article was submitted 03.12.2021; approved after reviewing 13.12.2021; accepted for publication 30.12.2021

Информация об авторах / Information about the authors

Олег Станиславович Хватов – доктор технических наук, профессор; заведующий кафедрой электротехники и электрооборудования объектов водного транспорта; Волжский государственный университет водного транспорта; Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5; khvatov_oleg@mail.ru

Oleg S. Khvatov – Doctor of Technical Sciences, Professor; Head of the Department of Electric Engineering and Electric Equipment of Water Transport; Volga State University of Water Transport; Nizhny Novgorod, Nesterova St., 5; khvatov_oleg@mail.ru

Илья Александрович Тарпанов – кандидат технических наук; доцент кафедры электротехники и электрооборудования объектов водного транспорта; Волжский государственный университет водного транспорта; Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5; Fillin2003@mail.ru

Ilya A. Tarpanov – Candidate of Technical Sciences; Assistant Professor of the Department of Electric Engineering and Electric Equipment of Water Transport; Volga State University of Water Transport; Nizhny Novgorod, Nesterova St., 5; Fillin2003@mail.ru

