

УДК 621.314

О.С. Хватов, А.Б. Дарьенков, И.С. Самоявчев, В.В. Соколов

**ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ АВТОНОМНЫХ ОБЪЕКТОВ
НА БАЗЕ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНЫХ УСТАНОВОК
ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
Волжский государственный университет водного транспорта

Обоснована актуальность разработки и исследования электростанций транспортных объектов с электродвижением на базе дизель-генераторных установок переменной частоты вращения.

Приведено описание функциональной и структурной схем единой электростанции судна на базе дизель-генераторной установки переменной частоты вращения. Рассмотрены результаты моделирования режима плавного пуска гребного электродвигателя единой электростанции на базе дизель-генераторной установки переменной частоты вращения мощностью 500 кВт. Описана методика расчета коэффициента полезного действия рассматриваемой единой электростанции. Приведены результаты расчета топливной экономичности единой электростанции мощностью 100 кВт.

Ключевые слова: единая электростанция, электродвижение, дизель-генераторная установка переменной частоты вращения.

На водном, автомобильном и железнодорожном транспорте все большее распространение получают системы электродвижения. При этом тяговые (гребные) электродвигатели могут питаться вместе с другими потребителями от единой электростанции автономного объекта (ЕЭС). Применение ЕЭС позволяет повысить надежность и упростить обслуживание энергосистемы автономного объекта за счет уменьшения количества составляющих ее компонентов. В качестве первичных двигателей ЕЭС широко используются двигатели внутреннего сгорания (ДВС).

Как правило, ЕЭС строится на базе дизель-генераторных установок (ДГУ) постоянной частоты вращения. Повышение экономичности электростанции возможно за счет применения ДГУ переменной частоты вращения. Экономия топлива достигается за счет задания для каждого значения мощности нагрузки оптимальной частоты вращения вала ДВС, соответствующей наименьшему удельному расходу топлива [1].

Исследование и разработка ЕЭС на базе ДГУ переменной частоты вращения является относительно новым техническим направлением в малой энергетике. Работы в данной области проводят ряд известных зарубежных фирм (Fubag, Honda, Hyundai, Kupor, ABB, Wartsila и др.). Известны исследования по данной тематике и в России – ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС» (г.Москва), ОАО "Звезда" (г.Санкт-Петербург), ОАО "Сигма" (г.Ковров), ВГАВТ и НГТУ (г.Н.Новгород). Перечень отечественных и зарубежных научных публикаций, посвященных указанной тематике, достаточно мал. Анализ показал, что особенно это относится к исследованиям динамических режимов работы, разработке математической модели ЕЭС с системой электродвижения на базе ДГУ переменной частоты вращения, синтезу систем регулирования каналов электродвижения, электроснабжения, расчету топливной экономичности ЕЭС на базе ДГУ переменной частоты вращения.

На основании изложенного целью исследования является разработка электростанции автономного объекта с системой электродвижения на базе ДГУ переменной частоты вращения.

Предложена концепция построения электростанций транспортных объектов с электродвижением на базе ДГУ, отличающихся повышенной топливной экономичностью, кото-

рая достигается за счет задания для каждого значения мощности нагрузки оптимальной частоты вращения вала ДВС, соответствующей наименьшему удельному расходу топлива [2].

Разработана структура ЕЭС транспортного объекта (судна) на базе ДГУ переменной частоты вращения, защищенная патентом на изобретение РФ (рис. 1) [3]. ЕЭС построена на базе ДВС 1, приводящего во вращение синхронный генератор (СГ) 2. Гребной винт 6 приводится во вращение синхронным двигателем (СД) 5. Система работает следующим образом. Блок 14 формирования оптимальной частоты вращения (БОЧ) ДВС 1 задает частоту вращения вала, оптимальную с точки зрения потребления топлива. Блок 14 формирует выходной сигнал, согласно заложенной в его памяти многопараметровой характеристике ДВС, в зависимости от выходных сигналов блока 15 вычисления мощности нагрузки (БМН) и датчика 8 частоты вращения ДВС. Многопараметровая характеристика представляет собой зависимость эффективной мощности ДВС от частоты вращения вала дизеля при наименьшем удельном расходе топлива. Блок 15 определяет мощность нагрузки на основе сигналов от датчиков тока 9, 10 и датчиков напряжения 11, 12.

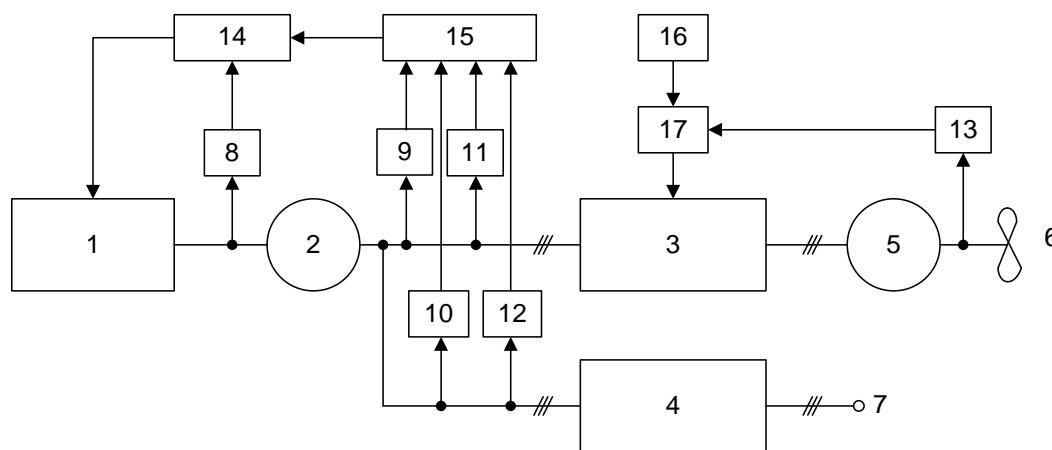


Рис. 1. ЕЭС автономного объекта на базе ДГУ переменной частоты вращения:

1 – ДВС; 2 – синхронный генератор; 3, 4 – преобразователи частоты; 5 – гребной синхронный двигатель; 6 – гребной винт; 7 – выходы для подключения потребителей судовой сети; 8 – датчик частоты вращения ДВС; 9, 10 – датчики тока; 11, 12 – датчики напряжения; 13 – датчик частоты вращения гребного винта; 14 – блок формирования оптимальной частоты вращения; 15 – блок вычисления мощности нагрузки; 16 – задатчик частоты; 17 – блок регулирования частоты

В соответствии с требуемой скоростью движения судна, задатчик частоты 16 формирует сигнал задания частоты выходного напряжения преобразователя частоты (ПЧ) 3, и, тем самым, определяет скорость вращения гребного электродвигателя 5. Блок регулирования частоты 17 формирует сигнал управления частотой ПЧ 3 на основе сигналов от задатчика частоты 16 и датчика 13 частоты вращения гребного электродвигателя.

Таким образом, ПЧ 3 является согласующим элементом между СД 5 и СГ 2, работающими с разными частотами вращения. Для питания электропотребителей судна на выходе СГ включен ПЧ 4, который обеспечивает стабильные значения амплитуды и частоты напряжения бортовой сети. Таким образом, ЕЭС можно условно разделить на два канала: электродвижения и электроснабжения.

Наиболее экономичная частота вращения вала ДВС может быть определена по универсальной (многопараметровой) характеристике. На рис. 2 представлена многопараметровая характеристика двигателя SEMT – «Пилстик» типа РС4-480 мощностью 1100 кВт [4].

Для исследования динамических режимов, разработана математическая модель ЕЭС автономного объекта на базе ДГУ переменной частоты вращения [5].

На основе математической модели разработана структурная схема ЭЭС транспортного объекта (на примере судна) с электродвижением на базе ДГУ переменной частоты вращения.

На рис. 3 представлена структурная схема канала электродвижения вышеуказанной ЭЭС.

На основе математической модели и структурной схемы, в программном пакете MatLab Simulink разработаны имитационные модели, позволяющие производить анализ динамических режимов работы каналов электродвижения и электроснабжения ЭЭС с учетом величины и характера нагрузки, а также формируемой с целью оптимизации расхода топлива скоростной характеристикой дизеля [6].

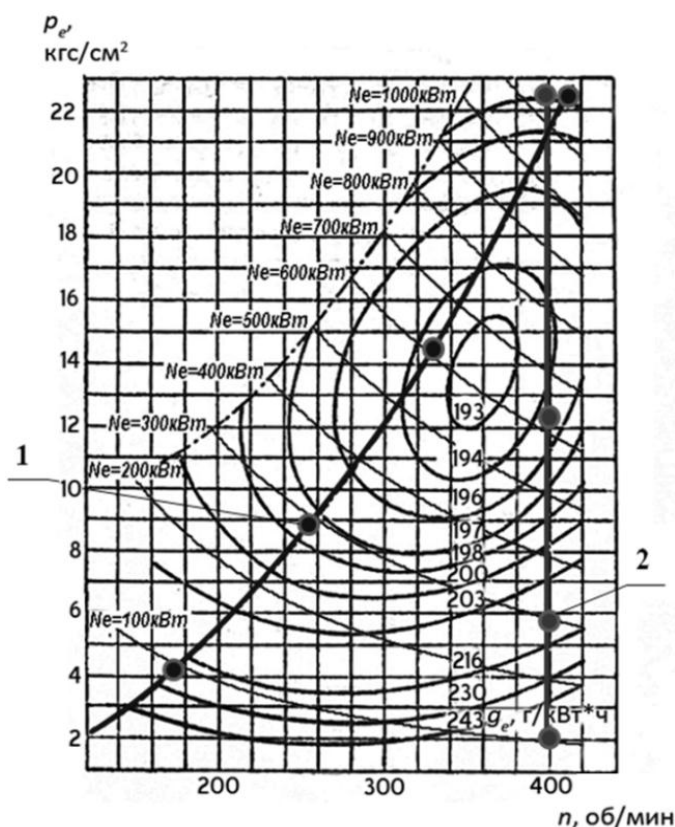


Рис. 2. Многопараметровая (универсальная) характеристика СОД фирмы SEMT – «Пилстик» типа РС4-480:

N_e – мощность дизеля кВт; n – обороты дизеля об/мин; g_e – удельный расход топлива – г/кВт*ч; p_e – среднее эффективное давление на поршень – кгс/см²; кривая 1 – характеристика оптимального регулирования частоты ДВС; кривая 2 – характеристика работы ДВС с постоянной частотой коленчатого вала (неоптимальная)

На основе разработанной имитационной модели, произведен сравнительный анализ результатов моделирования режимов плавного пуска гребного электродвигателя канала электродвижения для ЭЭС мощностного ряда 85-200-500-700-1000 кВт по линейной, S-образной и экспоненциальной характеристикам. Установлено, что наименьшие колебания электромагнитного момента M_{max} и длительность пуска $t_{пуск}$ соответствуют S-образной пусковой характеристике гребного электродвигателя (рис. 4).

Произведено моделирование режимов наброса и сброса нагрузки в канале электродвижения для ЭЭС мощностного ряда 85-200-500-700-1000 кВт. Например, для ЭЭС мощностью 500 кВт максимальная амплитуда колебаний электромагнитного момента при сбросе нагрузки до $M_c=0$ (оголение винта) достигает 1,7 о.е. Также проведено моделирование режимов наброса и сброса нагрузки в канале электроснабжения ЭЭС.

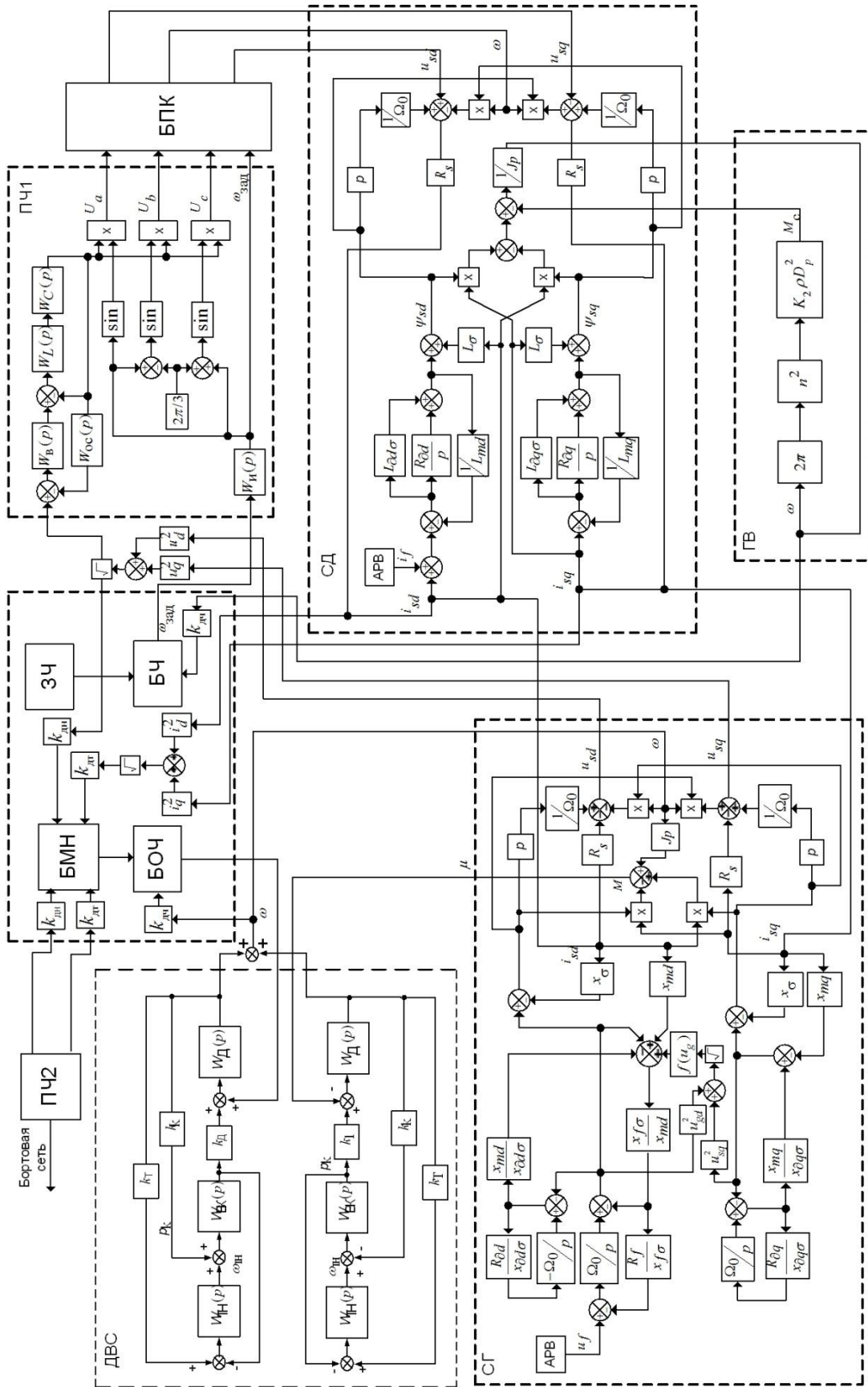


Рис. 3. Структурная схема канала электродвижения ЭЭС автономного объекта на базе ДГУ переменной частоты вращения $W_B(p)$, $W_{oc}(p)$, $W_L(p)$, $W_C(p)$, $W_I(p)$, $W_H(p)$ – передаточные функции выпрямителя ПЧ, обратной связи, индуктивности и емкости фильтра, инвертора; АВР, ПЧ1 (ПЧ2), ГВ – соответственно автоматический регулятор возбуждения, преобразователи частоты, гребной винт; $\omega_{зад}$, M_c – заданная частота вращения СД, момент сопротивления на валу СД

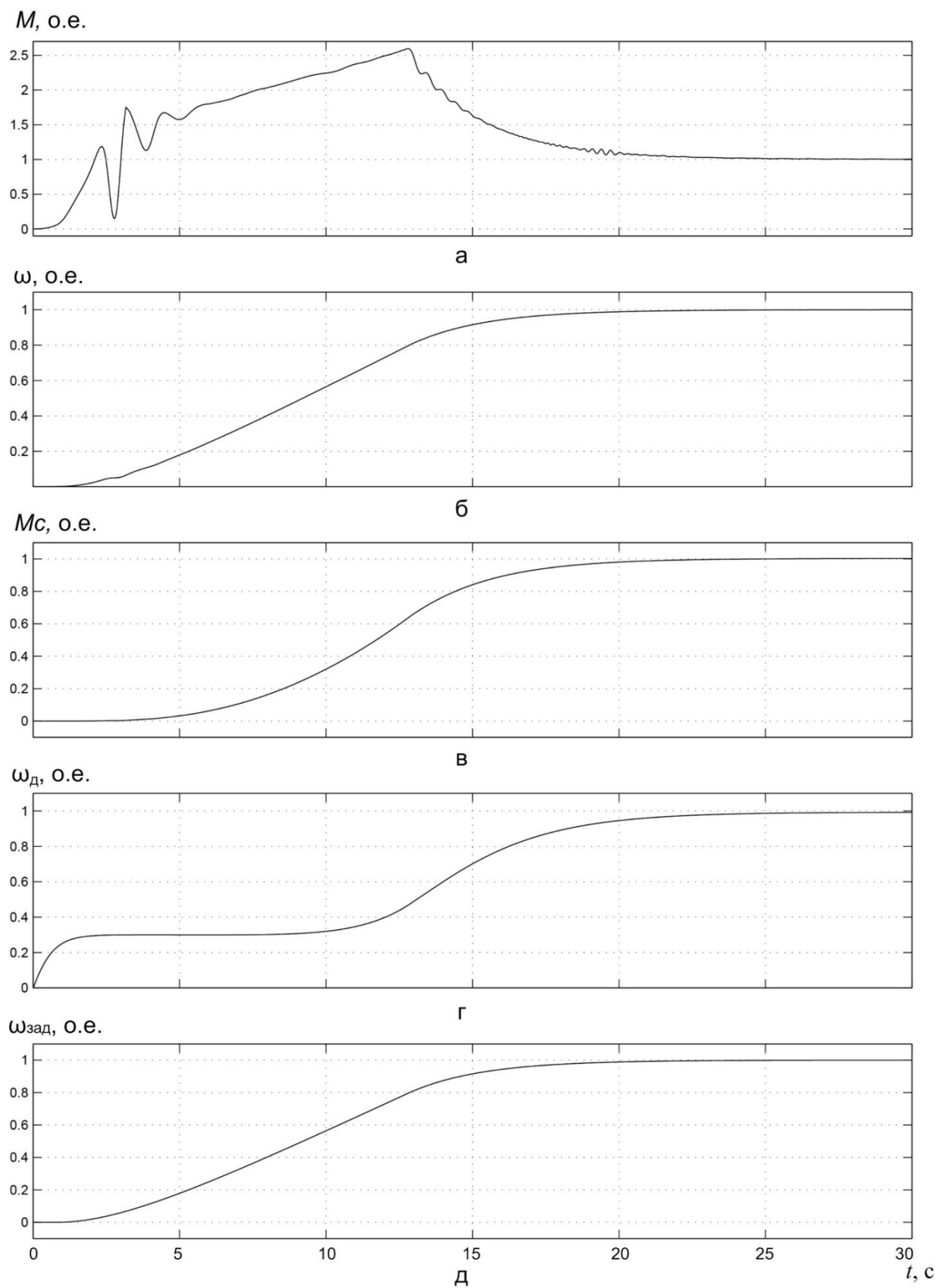


Рис. 4. Моделирование режима пуска СД ЕЭС 500 кВт по S-характеристике:
 а – электромагнитный момент СД M , о.е.; б – частота вращения ротора СД ω , о.е.;
 в – момент нагрузки СД M_c , о.е.; г – частота вращения вала дизеля ω_d , о.е.;
 д – заданная частота СД $\omega_{зад}$, о.е.

Разработана методика расчета коэффициента полезного действия ЭЭС автономного объекта с электродвижением на базе ДГУ переменной частоты вращения [7, 8]. Энергетическая диаграмма ЭЭС на базе ДГУ переменной частоты вращения представлена на рис. 5.

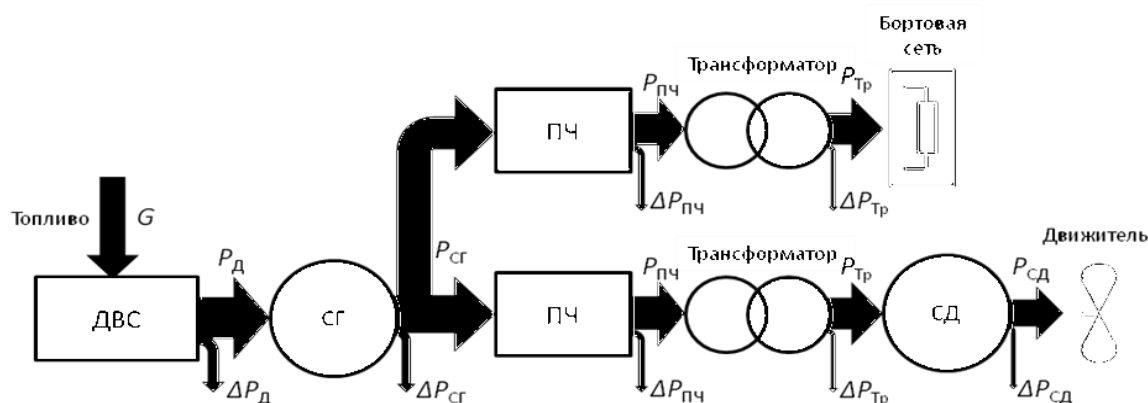


Рис. 5. Энергетическая диаграмма ЭЭС на базе ДГУ переменной частоты вращения:

G – абсолютный расход топлива; P_D , P_{CG} , P_{PC} , P_{Tr} , P_{CD} – выходная мощность соответственно ДВС, синхронного генератора, преобразователей частоты, трансформаторов, тягового синхронного двигателя; ΔP_D , ΔP_{CG} , ΔP_{PC} , ΔP_{Tr} , ΔP_{CD} – потери мощности соответственно ДВС, синхронного генератора, преобразователей частоты, трансформаторов, тягового синхронного двигателя

При изменении мощности нагрузки ЭЭС происходит изменение частоты вращения вала ДВС, момента на его валу, соответственно меняется частота вращения ротора генератора, частота и амплитуда генерируемого напряжения, частота и амплитуда напряжения на входе и выходе (для канала электродвижения) преобразователя частоты, трансформатора, частота и амплитуда питающего напряжения, частота вращения ротора, момент на валу гребного (тягового) двигателя, а также мощность, потребляемая бортовой сетью автономного объекта. Таким образом, методика расчета должна учитывать изменение всех вышеперечисленных параметров.

Каждому значению частоты вращения гребного винта (колеса) соответствует определенный момент и мощность нагрузки на валу гребного (тягового) двигателя. Гребной (тяговый) двигатель является нагрузкой для трансформатора (Тр). ПЧ является нагрузкой для СГ. Согласно разработанной методике, рассчитывается общий КПД цепи СГ – ПЧ – Тр – СД. Алгоритм расчета КПД учитывает, что элементы электрооборудования, входящие в состав ЭЭС на базе ДГУ переменной частоты вращения (СГ, СД, Тр, ПЧ) работают при переменной частоте и амплитуде напряжения. Расход топлива ДВС при конкретных значениях мощности нагрузки и частоты вращения вала определяется по многопараметровым характеристикам ДВС.

Разработана методика расчета КПД (потерь мощности) синхронной машины, преобразователя частоты и трансформатора при переменных мощности нагрузки и частоте напряжения. Построены графики зависимостей КПД от частоты напряжения для синхронной машины (СМ), трансформатора и ПЧ.

Произведен расчет коэффициента полезного действия СМ в пакете MathCad. В расчете учитывается закон регулирования $U/f = \text{const}$, т.е. при снижении частоты напряжения, амплитуда напряжения также будет снижаться. На рис. 6, 7 представлены графики зависимости КПД от частоты напряжения и потребляемой мощности для синхронных машин МСК91-4 ($P_H = 75 \text{ кВт}$, $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$), МСК1250-1500 ($P_H = 1000 \text{ кВт}$, $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$). Кривые соответствуют определенным мощностям $P_1 = 0,25, 0,5, 0,75, 1 P_H$. Графики отражают зависимость КПД от частоты напряжения при переменных амплитуде напряжения, токе и постоянной мощности нагрузки. Так как расчет произведен для кривых соответствующих определенной, постоянной мощности нагрузки, при снижении частоты и амплитуды напряжения, ток будет обратно пропорционально увеличиваться.

Таким образом, для кривой, соответствующей номинальной мощности ($P_1 = P_H$), при номинальной частоте напряжения $f=50$ Гц, напряжение и ток статора соответствуют номинальным значениям $U=U_H$, $I=I_H$, при снижении частоты до $f=40$ Гц, $U=0,8*U_H$, $I=I_H/0,8=1,25*I_H$. При превышении номинального значения тока, нагрев электрической машины превышает максимально допустимый для длительного режима работы. Графики зависимости КПД (рис. 6, 7) ограничены кривой, соответствующей току статора $I=1,25*I_H$.

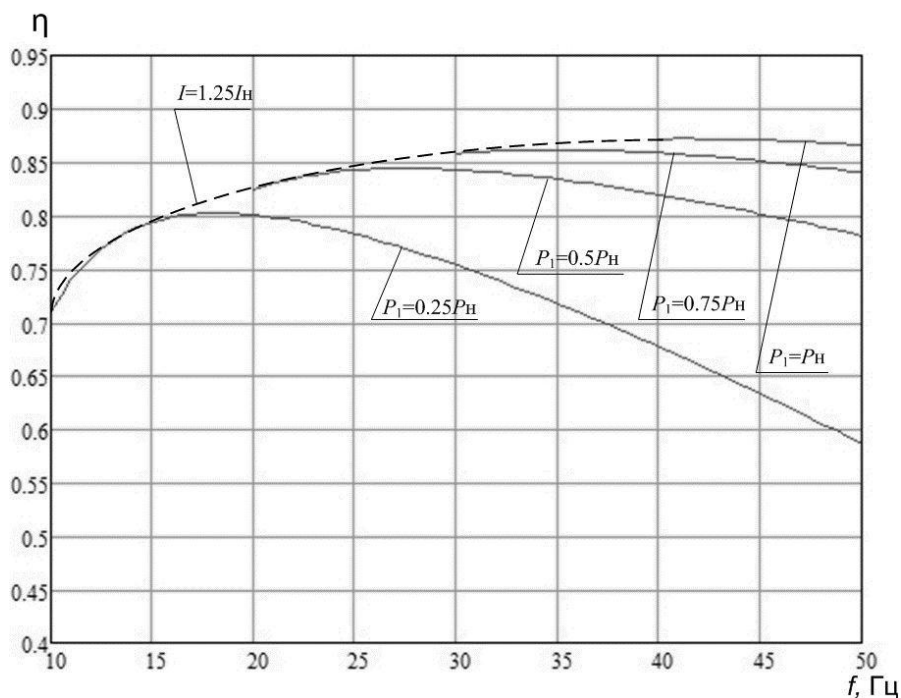


Рис. 6. Зависимость КПД СМ МСК91-4 η от частоты f питающего напряжения при переменной мощности P_1

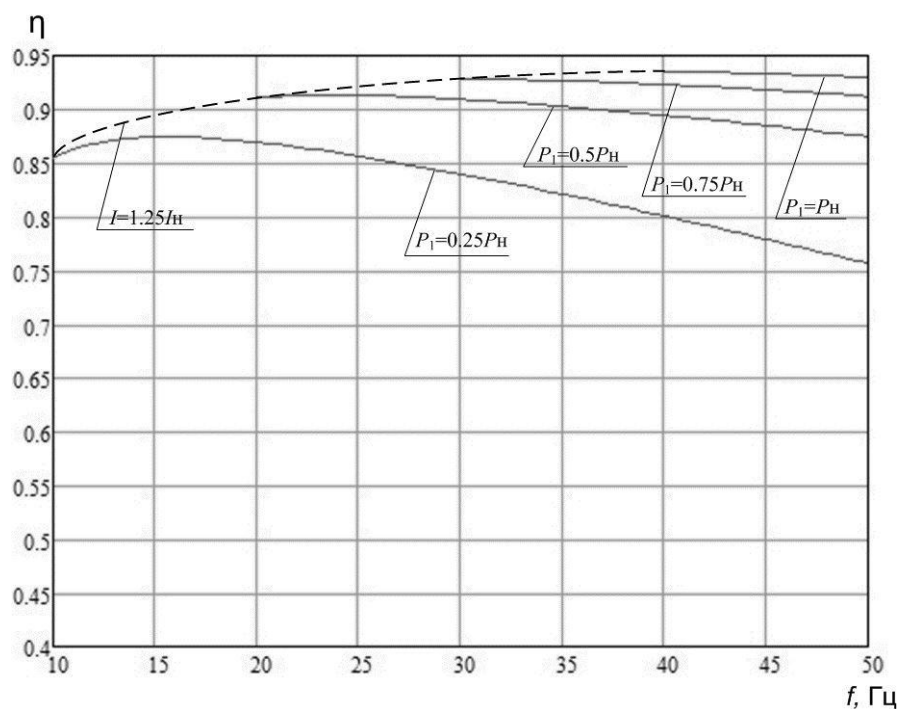


Рис. 7. Зависимость КПД СМ МСК1250-1500 η от частоты f питающего напряжения при переменной мощности P_1

С помощью разработанной методики произведен расчет топливной экономичности ЭЭС на базе ДГУ переменной частоты вращения на примере ЭЭС мощностью 100 и 1000 кВт. На основании результатов расчета, построены сравнительные характеристики удельного и абсолютного расходов топлива для двух режимов работы: с регулированием частоты вращения ДГУ в зависимости от мощности нагрузки и с постоянной частотой вращения ДГУ. Например, для ЭЭС мощностью 100 кВт экономия топлива достигает 31% по абсолютному расходу (рис. 8, 9).

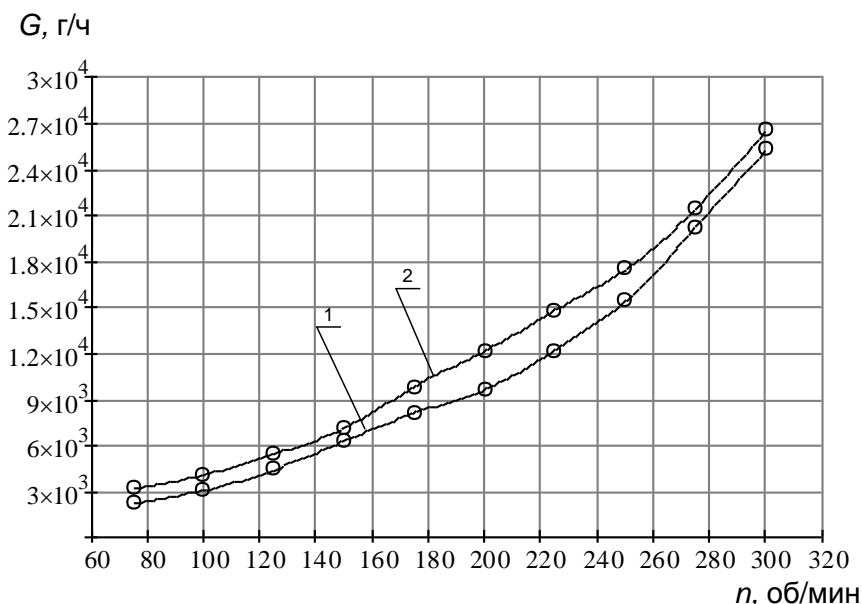


Рис. 8. Абсолютный расход топлива G ДВС ЭЭС мощностью 100 кВт с регулированием (1) и без регулирования (2) частоты ДГУ в зависимости от частоты вращения гребного винта n

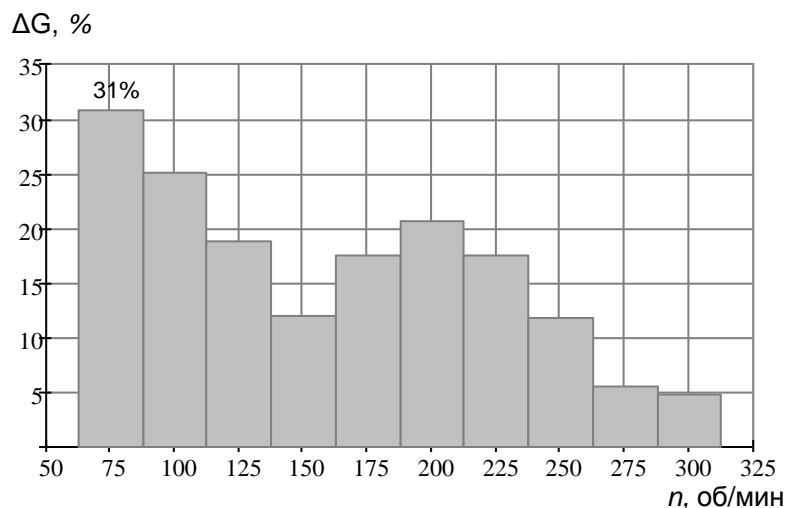


Рис. 9. Диаграмма показателей топливной экономичности ΔG по абсолютному расходу топлива, соответствующих различным частотам вращения ГВ n ЭЭС мощностью 100 кВт

Применение ЭЭС на базе ДГУ переменной частоты вращения позволяет добиться существенной экономии топлива, что является крайне важным показателем в современных условиях растущих цен на энергоносители и повышающихся требованиях к снижению уровня вредных выбросов в атмосферу. Обеспечение оптимального режима ДВС требует нового подхода к управлению топливоподачей, который возможно реализовать на базе интеллектуальной системы управления нейросетевого типа [9].

Библиографический список

1. Дарьенков, А.Б. Автономная высокоэффективная электрогенерирующая станция / А.Б. Дарьенков, О.С. Хватов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2009. Т. 77. С. 68–72.
2. Самоявчев, И.С. Единая электростанция автономного объекта на базе ДВС переменной частоты вращения / И.С. Самоявчев, О.С. Хватов, А.Б. Дарьенков // Тезисы докладов IX Международной молодежной научно-технической конференции / НГТУ. Н.Новгород. 2010. С. 62–63.
3. Патент на изобретение № 2436691, В60L 11/08, В60W 20/00, В60W 10/08. Система электродвижения автономного объекта / А.Б. Дарьенков, О.С. Хватов, И.С. Самоявчев // Опубликовано Бюл. № 35, 20.12.2011.
4. Коллеров Л.К. Газожиidкостные двигатели SEMT-«Пилстик» / Л.К. Коллеров. – Энергомашиностроение, 1973.
5. Хватов, С.В. Математическая модель единой электростанции автономного объекта на базе ДВС с переменной скоростью вращения / С.В. Хватов, А.Б. Дарьенков, И.С. Самоявчев, О.С. Хватов // Актуальные проблемы электроэнергетики: материалы научно-технической конференции; НГТУ. – Н. Новгород. 2010. С. 58–63.
6. Хватов, О.С. Имитационная модель единой судовой электростанции на базе двигателя внутреннего сгорания с переменной скоростью вращения / О.С. Хватов, А.Б. Дарьенков, И.С. Самоявчев // Вестник Ивановского государственного технического университета. Иваново. 2011. №4. С. 50–54.
7. Хватов, О.С. Топливная экономичность единой электростанции автономного объекта на базе двигателя внутреннего сгорания с переменной скоростью вращения / О.С. Хватов, А.Б. Дарьенков, И.С. Самоявчев // Эксплуатация морского транспорта. – СПб. 2013. №1(71). С. 47–50.
8. Хватов, О.С. Оценка топливной экономичности в единых электростанциях автономных объектов на базе двигателей внутреннего сгорания переменной скорости вращения / О.С. Хватов, А.Б. Дарьенков, И.С. Самоявчев // Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона». 2013. №3.
9. Хватов, О.С. Интеллектуальные средства управления высокоэффективной дизель-генераторной установкой переменной частоты вращения / О.С. Хватов, А.Б. Дарьенков // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 3. Ч. 4. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. С. 126–131.

*Дата поступления
в редакцию 16.04.2015*

O.S. Khvatov, A.B. Daryenkov, I.S. Samoyavchev, V.V. Sokolov

**ELECTRIC POWER STATIONS OF AUTONOMOUS OBJECTS BASED
ON A VARIABLE SPEED DIESEL GENERATOR SETS**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev,
Volga state University of water transport, Nizhny Novgorod

The urgency of research and development electric power stations with electric propulsion based on a variable speed diesel generator sets.

The description of the functional and structural schemes of unified electric power station of ship based on a variable speed diesel generator set. The results of the simulation soft-start of propulsion motor of unified electric power station output of 500 kW based on a variable speed diesel generator set. A technique for calculating the efficiency of the considered unified electric power station. The results of the calculation of fuel efficiency unified electric power station output of 100 kW.

Key words: unified electric power station, electric propulsion, variable speed diesel generator set.