

УДК 621.317.629.12

О.С. Хватов<sup>1</sup>, А.Б. Дарьенков<sup>2</sup>, Д.С. Кобяков<sup>1</sup>,  
Н.И. Кшталтный<sup>1</sup>, М.Е. Юрлов<sup>1</sup>

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНЫХ УСТАНОВОК ПОСТОЯННОЙ И ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЕ

<sup>1</sup> Волжский государственный университет водного транспорта

<sup>2</sup> Нижегородский государственный технический университет  
им. Р.Е. Алексеева

Перспективный подход к повышению эффективности и маневренности судов связан с использованием судовой единой электростанции (СЭС). Однако серьезным недостатком является сложность включения генераторов на параллельную работу. В статье рассмотрена СЭС с общим звеном постоянного тока и дизель-генератором (ДГ) переменной частоты вращения. Показано, что работа дизель-генераторной установки при постоянной (номинальной) частоте вращения, но переменной нагрузке характеризуется неоптимальным (завышенным) удельным расходом топлива. В то же время принудительное регулирование частоты вращения двигателя внутреннего сгорания в соответствии с величиной электрической нагрузки генератора позволяет обеспечивать энергоэффективный режим генерирования электроэнергии. Одним из способов повышения энергетических показателей СЭС заключается в переводе одного из параллельно работающих ДГ в режим переменной частоты вращения. При этом нагрузка между параллельно работающими ДГ распределяется пропорционально их частотам вращения независимо от индивидуальной загрузки гребных электродвигателей. Для стабилизации напряжения ДГ, работающего в режиме переменной частоты вращения, используется силовой полупроводниковый преобразователь. Представлены функциональная схема и математическая имитационная модель судовой единой электростанции. Приведены графики переходных процессов при изменении нагрузки в канале электродвижения судна.

**Ключевые слова:** генератор переменной частоты вращения, звено постоянного тока, математическая имитационная модель, переходные процессы, судовая единая электростанция, судовой электротехнический комплекс.

### 1. Введение

В настоящее время в судостроении всё больше внимания уделяется гребным электрическим установкам (ГЭУ), которые имеют ряд преимуществ перед установками с непосредственной передачей мощности от теп-

ловых двигателей на винт: повышенные манёвренные качества, надежность и живучесть судна, возможность отбора мощности от ГЭУ для вспомогательных нужд. В Волжском государственном университете водного транспорта разрабатывается концепция новых пассажирских судов с использованием ГЭУ с колесно-двигательным рулевым комплексом. Суда планируется использовать на реках, где в настоящее время судоходство ограничено небольшими глубинами, например, на Оке.

Опираясь на опыт эксплуатации судов проекта ПКС-40, одним из вариантов энергетической установки судна выбрано использование единой электростанции, содержащей два дизель-генератора (ДГ1, ДГ2) и являющейся общей как для питания гребной электрической установки, так и общесудовых потребителей. В качестве двигателей рассматриваются гребные колеса диаметром от 4,5-6 м, электродвигатели которых питаются от преобразователей частоты (ПЧ). Эксплуатация судов проекта ПКС-40 показала их высокую экономичность и маневренность. Однако были выявлены и существенные недостатки:

- неравномерное и быстроизменяющееся распределение мощности между гребными электродвигателями при активном маневрировании;
- сложность включения генераторов на параллельную работу и распределения между ними активной мощности, связанное с наличием высших гармонических в сети при работе преобразователей частоты.

Практика показывает, что один из ДГ может быть загружен на 150-170% от номинальной мощности, а другой существенно недогружен. Для преобразователей частоты и электрических двигателей данные перегрузки являются допустимыми. Однако перегрузка генераторов может составлять не более 110-115% от их номинальной мощности.

Решение данной проблемы заключается в реализации, так называемой, псевдопараллельной работы генераторов, когда преобразователи частоты каналов электродвижения соединены на стороне постоянного тока [1]. Научно обосновано и подтверждено экспериментально, что работа дизель-генераторной установки при постоянной (номинальной) частоте вращения, но переменной нагрузке характеризуется неоптимальным (завышенным) удельным расходом топлива. В то же время принудительное регулирование частоты вращения двигателя внутреннего сгорания (ДВС) в соответствии с величиной электрической нагрузки генератора позволяет обеспечивать энергоэффективный режим генерирования электроэнергии [2-5].

## II. Постановка задачи

Авторами с целью повышения энергетических показателей СЭС предложен вариант ее структуры, когда один из параллельно работающих ДГ переводится в режим переменной частоты вращения (рис. 1).

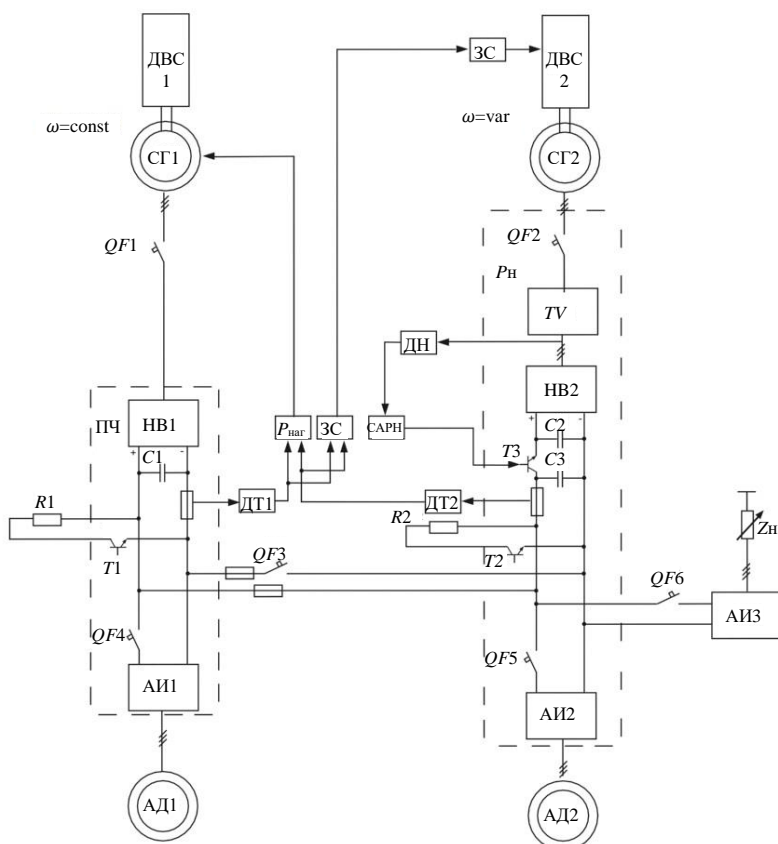


Рис. 1. Функциональная схема судовой единой электростанции с общим звеном постоянного тока и дизель-генератором переменной частоты вращения:

АИ – автономный инвертор; ДВС – двигатель внутреннего сгорания;  
 ДТ – датчик тока; ЗС – задатчик скорости; НВ – выпрямитель;  
 ПЧ – преобразователь частоты; СГ – синхронный генератор; Т – транзистор;  
 ТН – трансформатор; QF – автоматический выключатель

Принцип работы схемы (рис. 1) заключается в принудительном регулировании частоты вращения ДВС2 при снижении нагрузки в канале электродвижения судна. Цель данного регулирования обусловлена поддержанием высоких энергетических показателей процесса генерирования электроэнергии за счет сохранения оптимального (близкого к номиналь-

ному) удельного расхода топлива ДВС. При этом нагрузка между параллельно работающими генераторами СГ1 и СГ2 будет распределяться пропорционально их частотам вращения и независимо от индивидуальной загрузки гребных электродвигателей АД1 и АД2. Для стабилизации напряжения ДГ2, работающего в режиме переменной частоты вращения, используется повышающий трансформатор  $TV$  и широтноимпульсный преобразователь, реализованный на транзисторе  $T3$ .

Преобразователи обоих ДГ соединены на стороне постоянного тока. Регулятор нагрузки  $P_{наг}$  воздействует на систему возбуждения СГ1, изменяя величину напряжения на его статоре.

### III. Методы и результаты исследования

Авторами разработана математическая имитационная модель данной системы (рис. 2).

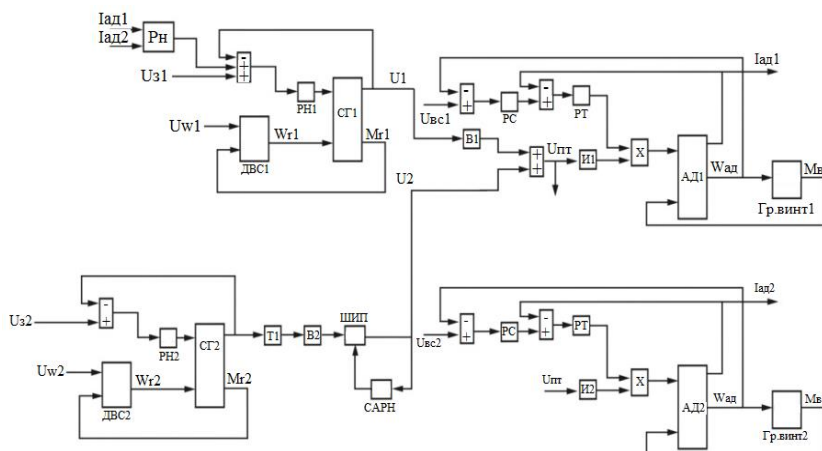


Рис. 2. Структурная схема математической модели единой судовой электростанции с общим звеном постоянного тока и дизель-генератором переменной частоты вращения

Результаты имитационного моделирования динамических режимов при снижении нагрузки в канале электродвижения судна на 20% представлены на рис. 3-6. Зависимости частот вращения ДГ1 и ДГ2 изображены на рис. 3. При снижении на 20-й секунде нагрузки на гребные электродвигатели система регулирования снижает частоту вращения ДГ2 до 80% от номинальной, при этом регулятор нагрузки  $P_{наг}$  увеличивает напряжение на выходе СГ1, а распределение нагрузки между ДГ1 и ДГ2 происходит

пропорционально их частотам вращения и независимо от величин нагрузок на гребные электродвигатели. На рис. 4 представлены зависимости напряжений на выходе выпрямителя НВ1 ( $U_{НВ1}$ ) и ШИП-преобразователя ( $U_{ШИП}$ ). Зависимости изменения токовой загрузки генераторов СГ1 и СГ2 приведены на рис. 5.

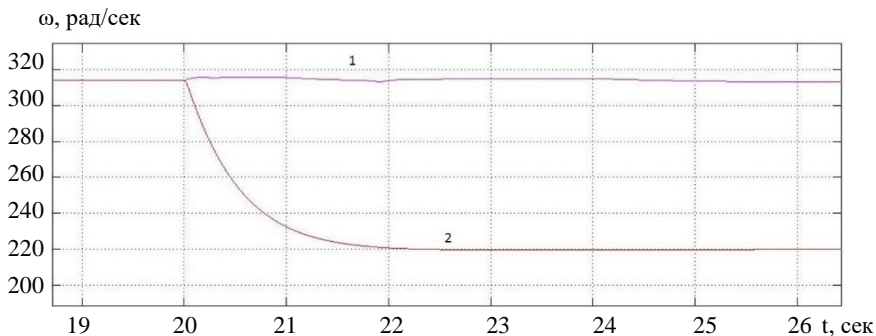


Рис. 3. Зависимости частоты вращения ДГ1 (1) и ДГ2 (2) при снижении нагрузки в канале электродвижения

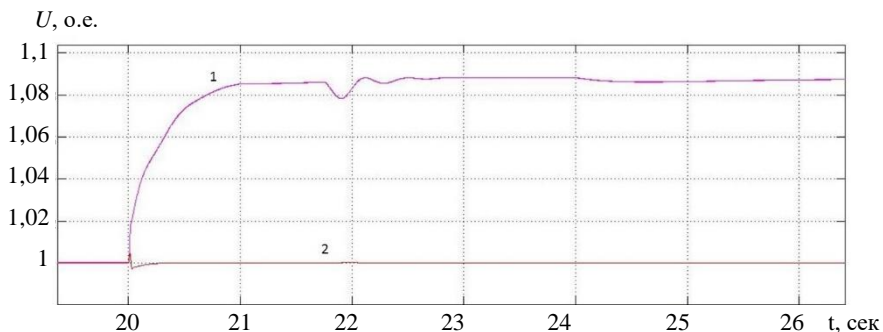


Рис. 4. Зависимости  $U_{НВ1}$  и  $U_{ШИП}$  при снижении нагрузки в канале электродвижения

Также для обеспечения стабильного выходного напряжения дизель-генераторной установки при прямом пуске асинхронного двигателя целесообразно использовать буферный накопитель энергии (БНЭ). В качестве накопителя может служить либо аккумуляторная батарея, либо суперконденсатор. Буферный накопитель подключается к звену постоянного тока ГЭУ.

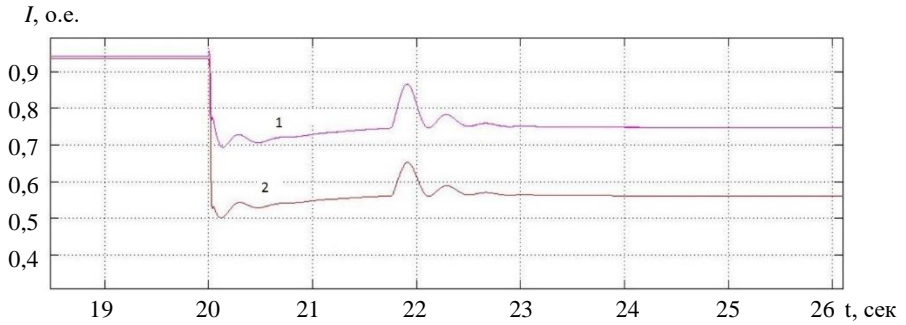
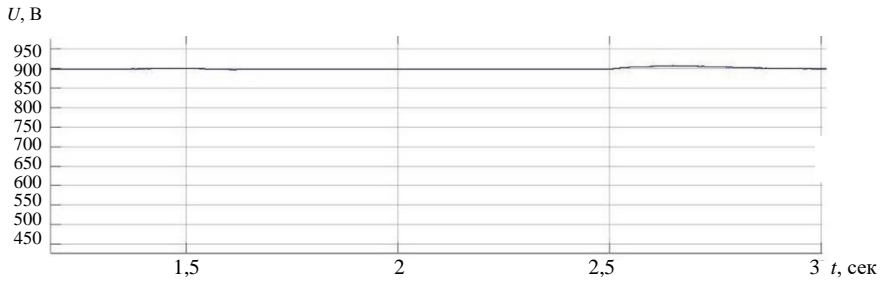


Рис. 5. Зависимости  $I_{CГ1}$  и  $I_{CГ2}$  при снижении нагрузки в канале электродвижения



а.

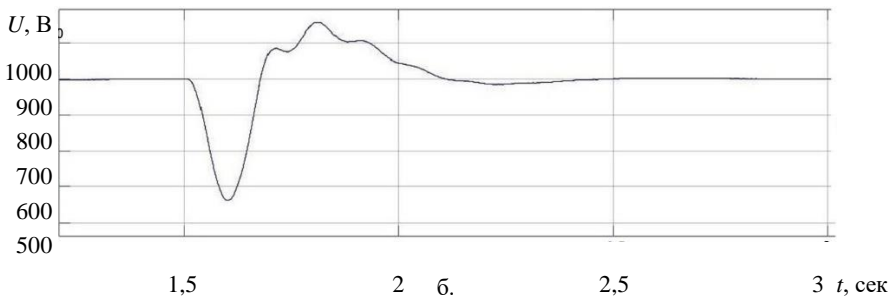


Рис. 6. Графики напряжения звена постоянного тока ДГУ с переменной частотой вращения: с БНЭ (а); без БНЭ (б)

В данной работе рассматриваются переходные процессы при наличии и отсутствии БНЭ в составе ДГУ, работающей с переменной частотой вращения. На рис. 6 представлены осциллограммы имитационного моделирования напряжения звена постоянного тока ДГУ. Из рис. 6 видно, что БНЭ обеспечивает стабилизацию напряжения ДГУ при прямом пуске асинхронного электродвигателя.

#### **IV. Заключение**

Предложена структура системы параллельной работы дизель-генераторных агрегатов в составе электростанции судна с электродвижением. С целью повышения энергетических показателей СЭС показана целесообразность перевода одного из ДГ агрегатов в режим переменной частоты вращения. Разработана математическая имитационная модель динамических режимов параллельной работы ДГ агрегатов постоянной и переменной частоты вращения.

© Хватов О.С., 2018

© Дарьенков А.Б., 2018

© Кобяков Д.С., 2018

© Кшталтный Н.И., 2018

© Юрлов М.Е., 2018

#### **Библиографический список**

- [1] Бурда Е.М., Хватов О.С., Тарпанов И.А., Кшталтный Н.И. Вариант единой электростанции колесного судна с электродвижением // Вестник АГТУ. Морская техника и технология. 2016. № 2. С. 102-108.
- [2] Хватов О.С., Дарьенков А.Б. Дизель-генераторная электростанция переменной скорости вращения // Электротехника. 2014. № 3. С. 28-32.
- [3] Хватов О.С., Дарьенков А.Б. Единая электростанция транспортного объекта с электродвижением на базе дизель-генераторной установки переменной частоты вращения // Электротехника. 2016. № 3. С. 35-40.
- [4] Хватов О.С., Дарьенков А.Б., Самоявчев И.С., Поляков И.С. Автономные генераторные установки на основе двигателей внутреннего сгорания переменной частоты вращения. Н. Новгород: НГТУ, 2016. – 172 с.
- [5] 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. 2012. № 1 (71). С. 47-50.

O.S. Khvatov <sup>1</sup>, A.B. Dar'envov <sup>2</sup>, D.S. Kobayakov <sup>1</sup>,  
N.I. Kshaltny <sup>1</sup>, M.E. Yurlov <sup>1</sup>

**MODELING OF TRANSITIONAL PROCESSES  
DIESEL-GENERATOR INSTALLATIONS  
OF CONSTANT AND VARIABLE ROTATION  
FREQUENCY IN PARALLEL OPERATION**

<sup>1</sup> Volga State University of Water Transport  
Nizhny Novgorod, Russia

<sup>2</sup> Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract.** A promising approach to improving the efficiency and maneuverability of ships is associated with the use of the ship's unified power plant (SPP). However, a serious drawback is the difficulty of switching on generators for parallel operation. The article considers the SUPP with a common DC link and a diesel-generator (DG) variable speed. It is shown that the operation of a DG set at a constant (nominal) rotational speed, but variable load is characterized by non-optimal (overestimated) specific fuel consumption. At the same time, the forced regulation of the rotational speed of the internal combustion engine in accordance with the magnitude of the electrical load of the generator allows for energy-efficient mode of generating electricity. One of the ways to increase the energy indicators of the SPP is to transfer one of the parallel operating DGs to the variable speed mode. In this case, the load between parallel DGs is distributed in proportion to their rotational speeds, regardless of the individual load of the propeller motors. To stabilize the voltage of a DG operating in the variable speed mode, a power semiconductor converter is used. The functional diagram and mathematical simulation model of the SPP are presented. The graphs of transients are shown when changing the load in the channel of the electric movement of the vessel.

**Keywords:** DC link, mathematical simulation model, ship electrical engineering complex, ship power station, transients, variable speed generator.

**References**

- [1] E.M. Burda, O.S. Khvatov, I.A. Tarpanov and N.I. Kshaltny, «Type of the integral power station of wheeled vessel with electric propulsion», Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies, vol. 2, pp. 102-108, 2016.
- [2] O.S. Khvatov and A.B. Dar'envov, «Power plant based on a variable-speed diesel generator», Russian Electrical Engineering, vol. 85, no. 3, pp. 145-149, 2014.



- [3] O.S. Khvatov and A.B. Dar'enkov, «A uniform power station of a transport unit with electric propulsion based on a diesel generator of varying rotation frequency», *Russian Electrical Engineering*, vol. 87, no. 3, pp. 150-155, 2016.
- [4] O.S. Khvatov, A.B. Dar'enkov, I.S. Samoyavchev and I.S. Polyakov, *Autonomous generator sets based on internal combustion engines of variable rotational speed*. N. Novgorod: NNSTU, 2016.
- [5] O.S. Khvatov, A.B. Dar'enkov and I.S. Samoyavchev, «The fuel profitability of unified electric power station of ship based on a explosion engine by alternating frequency rotation of shaft», *Ekspluatacija Morskogo Transporta*, vol. 1, no. 71, pp. 47-50, 2012.