

УДК 621.314

**Попов Сергей Васильевич**<sup>1</sup>, к.т.н., доцент, доцент кафедры электротехники и электрооборудования объектов водного транспорта,  
e-mail: popovsev3@ya.ru

**Бурмакин Олег Анатольевич**<sup>1</sup>, к.т.н., доцент, доцент кафедры электротехники и электрооборудования объектов водного транспорта,  
e-mail: boa\_71@mail.ru

**Малышев Юрий Сергеевич**<sup>1</sup>, к.т.н., доцент, доцент кафедры электротехники и электрооборудования объектов водного транспорта,  
e-mail: elektrikasp@mail.ru

<sup>1</sup>Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия.

### **ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МОЩНОСТИ МЕЖДУ ПАРАЛЛЕЛЬНО РАБОТАЮЩИМИ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНЫМИ УСТАНОВКАМИ РЕАЛЬНОЙ СУДОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ**

*Аннотация.* В статье рассмотрена целесообразность применения электронных регуляторов частоты и напряжения для обеспечения устойчивой параллельной работы дизель-генераторных агрегатов. Предложен состав систем регулирования. Показана необходимость подключения устройств компенсации, обеспечивающих регулирование напряжения при изменении нагрузки на генератор. Приведены результаты испытания предложенной системы.

*Ключевые слова:* параллельная работа генераторов, судовая электростанция, распределение мощности, реактивная мощность, электронный регулятор.

С целью повышения комфортабельности пассажирских судов, особенно в последнее время, устанавливается дополнительное электрооборудование, такое как кондиционеры, бытовые приборы, камбузное оборудование (пароконвектоматы, миксеры и т.п.), электрические грелки, оборудование баров (холодильные ларцы, кофемашины и т.п.). Кроме того, устанавливается обновленное навигационное оборудование, более мощные насосы, дополнительное освещение и многое другое. Поэтому для обеспечения судовой нагрузки электрической мощностью дизель-генераторные агрегаты включают на параллельную работу. В случаях, когда на судах активно используют климатические установки мощности даже двух параллельно работающих дизель-генераторов не достаточно для обеспечения электропитанием судовых потребителей. Введение в параллель трех дизель-генераторов является нереальной задачей, поскольку изношенность деталей механических регуляторов топливных насосов высокого давления (ТНВД) вносят люфты и, как следствие, колебания активной мощности между параллельно работающими генераторами. Такая электроэнергетическая система является неустойчивой и неработоспособной [1].

На некоторых судах в результате модернизации по замене устаревших дизель-генераторов были установлены дизель-генераторные агрегаты, не имеющие статизма механических характеристик, а также дистанционного органа регулирования топлива

ТНВД. При этом электронные регуляторы генераторов так же не имеют канала внешнего регулирования напряжения, а внешняя характеристика является астатической. Следовательно, параллельная работа таких агрегатов практически невозможна. Для получения возможности параллельной работы необходимо установить исполнительный механизм – актуатор для регулирования топлива ТНВД рисунок 1. Электронный регулятор подачи топлива, в этом случае, обеспечит статизм механических характеристик для равномерного распределения активной мощности.

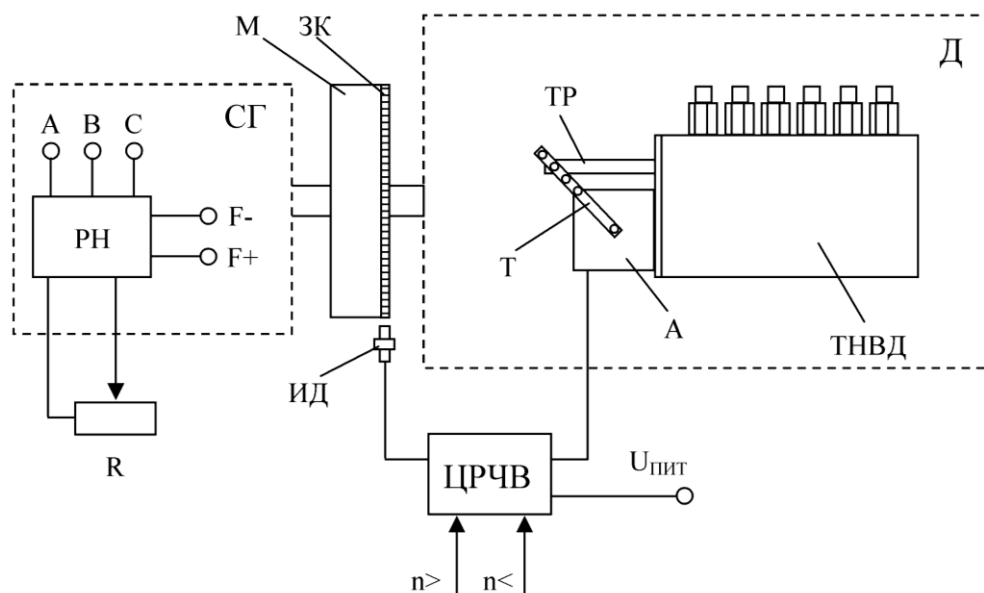


Рисунок 1 - Схема дизель-генераторной установки:

СГ – синхронный генератор, РН – регулятор напряжения, Д – двигатель, А – актуатор, Т – тяга, ТР – топливная рейки, ТНВД – топливный насос высокого давления, М – маховик, ЗК – зубчатое колесо, ИД – индукционный датчик, ЦРЧВ – цифровой регулятор частоты вращения, R – резистор подстройки напряжения генератора

С целью исследования переходных процессов распределения мощностей было проведено испытание генераторов на реальной судовой электростанции, состоящей из четырех дизель-генераторных агрегатов с мощностью по 100 кВт каждый. На ТНВД были установлены актуаторы, на крышке маховика – индукционный датчик обратной связи по скорости, в шкаф управления – электронный регулятор частоты вращения дизеля. Была выполнена настройка регуляторов для получения одинакового статизма механических характеристик [2]. Включение на параллельную работу двух генераторов с такими характеристиками не дало положительного результата.

Испытания дизель-генераторов при одиночной работе показали, что генераторы имеют астатические внешние характеристики, а у одного генератора - положительный статизм. Все сказанное, подтверждает важность распределения реактивной мощности при параллельной работе генераторов.

Устойчивая параллельная работа генераторных агрегатов возможна при распределении не только активной, но и реактивной мощности, поскольку перегрузка генератора по реактивной мощности сильно влияет на значение полного тока генератора. При неправильном распределении реактивной мощности один из генераторов будет являться нагрузкой для другого генератора, поэтому полный ток обоих генераторов начинает бесконтрольно нарастать. В результате, происходит отключение генераторов от шин ГРЩ и обесточивание судна.

Для получения статических характеристик генераторов к регуляторам напряжения системы возбуждения были подключены устройства компенсации, которые обеспечивают регулирование напряжения при изменении нагрузки на генератор (рисунок 2). В качестве обратной связи по току нагрузки был использован трансформатор тока, зашунтированный на сопротивление. При подборе шунтирующего сопротивления было получено падение напряжения в размере 3-4% при подключении номинальной нагрузки для каждого генератора. Достаточно точный подбор характеристик позволил ввести на параллельную работу два генератора.

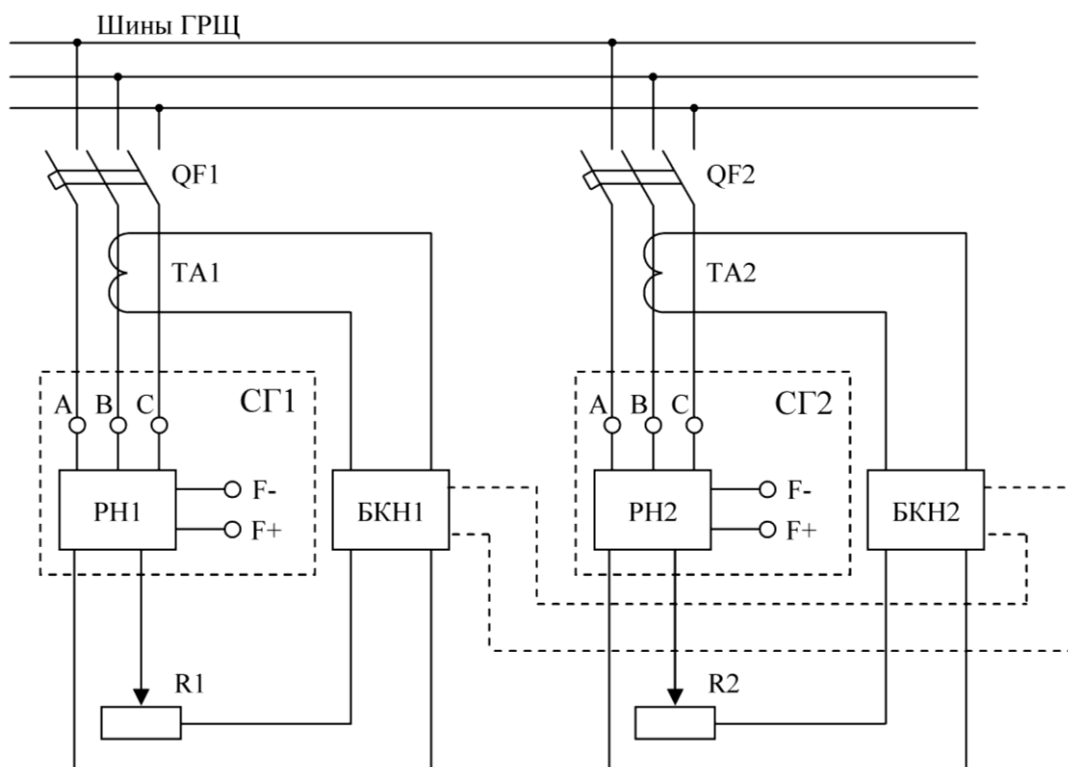


Рисунок 2. Схема подключения устройств распределения реактивной мощности  
 РН – регулятор напряжения возбуждения, БКН – блок-корректор напряжения, ТА – трансформатор тока, QF – генераторный автоматический выключатель

Испытания параллельной работы двух генераторов были проведены при набросе судовой нагрузки: компрессоров, пожарного насоса, камбузного оборудования. В ходе эксплуатации было замечено, что при включении на параллельную работу одного генератора к другому генератору, загруженному более чем на 50% от номинальной мощности, происходят колебания мощности между генераторами, что может привести к их отключению от шин ГРЩ.

Тот же эффект наблюдается при включении трех генераторов на параллельную работу, что не позволяет получить устойчивую параллельную работу. Для равномерного распределения реактивной мощности были введены уравнивающие связи между устройствами компенсации (см. рисунок 2 штрихпунктирные линии). Испытания показали, что статические характеристики генераторов с уравнивающими связями между регуляторами напряжения обеспечивают стабильную параллельную работу генераторов как трех, так и четырех генераторов, работающих на общие шины ГРЩ. Даже при нагрузке по 10 кВт на каждом генераторе работа является устойчивой, что проверялось при набросе и сбросе нагрузки значительной мощности.

### Список литературы:

1. Попов С.В., Бурмакин О.А., Малышев Ю.С. Исследование параллельной работы дизель-генераторов судовой электростанции. Научные проблемы водного транспорта. Выпуск 66 (1).- Н.Новгород: изд. ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2021. – с. 108-122. DOI: <https://doi.org/10.37890/jwt.vi66.148>

2. Попов С.В., Малышев Ю.С., Бурмакин О.А. Вариант модернизации системы автоматического регулирования дизель-генераторов для обеспечения их параллельной работы. Международный научно-промышленный форум Н.Новгород-Новосибирск. Транспорт. Горизонты развития. 2021.

## RESEARCH OF POWER DISTRIBUTION BETWEEN PARALLEL OPERATING DIESEL GENERATOR PLANT OF A REAL SHIP POWER PLANT

Sergey.V. Popov, Oleg.A. Burmakin, Yuriy. S. Malyshev,

*Abstract.* The article considers the expediency of using electronic frequency and voltage regulators to ensure stable parallel operation of diesel generator sets. The composition of control systems is proposed. The necessity of connecting compensation devices that provide voltage regulation when the load on the generator changes and equalizing connections is shown. The results of testing the proposed system are presented.

*Keywords:* parallel operation of generators, ship power plant, power distribution, reactive power, electronic regulator.