

## АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗКИ МЕЖДУ ДИЗЕЛЬ- И ВАЛОГЕНЕРАТОРОМ

В качестве источников электроэнергии на современных судах используют генераторы переменного тока. Для приводов генераторов применяют дизели, паровые или газовые турбины. С целью более полного использования энергии главного двигателя в качестве генераторов на судах устанавливают валогенераторы и утилизационные турбогенераторы [1, 2].

При работе судового дизель-генератора параллельно с валогенератором, вращаемым главным двигателем судна, нагрузка между ними будет распределяться в соответствии с их нагрузочными характеристиками и заданными частотами холостого хода [1].

При использовании валогенератора на валу главного двигателя, электрическая мощность генератора составляет величину нескольких десятков процентов от мощности главного двигателя, т.е. полная нагрузка валогенератора обеспечивает небольшую долю от номинальной мощности главного двигателя судна. Поэтому отклонение частоты вращения главного двигателя при номинальной нагрузке его валогенератора значительно меньше нормированного отклонения частоты вращения дизель-генератора, составляющего 2 % [3].

При установке на судне одного главного двигателя его частотную нагрузочную характеристику стараются делать астатической, а при наличии двух двигателей их характеристики имеют небольшие, но одинаковые наклоны. Если на главном двигателе установить такую нагрузочную характеристику, при которой номинальная нагрузка валогенератора будет приводить к такому же снижению частоты, как на дизель-генераторе ( $\Delta\omega_{\text{вг}} = \Delta\omega_{\text{дг}} = 0,02$ ), то при полной нагрузке ГД его установившееся снижение частоты  $\Delta\omega_{\text{гд}}$  будет недопустимо большим:

$$\Delta\omega_{\text{гд}} = \frac{P_{\text{гд}}}{P_{\text{вг}}} \cdot \Delta\omega_{\text{вг}} = 0,02 \cdot \frac{P_{\text{гд}}}{P_{\text{вг}}}.$$

Принципиальным является тот факт, что отклонение частоты вращения главного двигателя при полной нагрузке валогенератора и дизель-генератора существенно отличаются, т.е.  $\delta_{\text{дг}} > \delta_{\text{вг}}$ . Наклон характеристики валогенератора  $\delta_{\text{вг}}$  зависит от наклона нагрузочной ха-

рактеристики главного двигателя  $\delta_{гд}$  и соотношения их мощностей:

$$\delta_{вг} = \frac{P_{вг}}{P_{гд}} \cdot \delta_{гд} < 0,02 .$$

Таким образом, отличие наклонов характеристик  $\delta_{дг}$  и  $\delta_{вг}$  зависит от соотношения мощности главного двигателя  $P_{гд}$  и валогенератора  $P_{вг}$  и может быть больше, чем на порядок.

Рассчитаем процесс коммутации активно-индуктивной нагрузки судовой электростанции, получающей электроэнергию от валогенератора и дизель-генератора одинаковой мощности. Пусть наклоны нагрузочных характеристик составляют  $\delta_{дг} = 0,02$  и  $\delta_{вг} = 0,002$ .

Использованная компьютерная программа представлена в [4, 5] и содержит математические модели дизелей с регуляторами частоты вращения, синхронных генераторов с системами возбуждения, а также модель коммутируемой активно-индуктивной нагрузки.

Результаты моделирования переходных процессов моментов  $M_{г1}$ ,  $M_{г2}$  вало- и дизель-генератора, частот их вращения  $\omega_1$  и  $\omega_2$ , а также установление активных  $I_{a1}$ ,  $I_{a2}$  и реактивных  $I_{q1}$ ,  $I_{q2}$  токов генераторов, при коммутации нагрузки приведены на рис. 1.

Как видно из рис. 1, при включении нагрузки на общие шины вало- и дизель-генератора практически вся активная мощность принимается валогенератором. В то же время дизель-генератор получает всю реактивную мощность коммутируемой нагрузки и реактивную мощность валогенераторной нагрузки до коммутации. Таким образом, возникают нежелательные эффекты перегрузки валогенератора активной мощностью, а дизель-генератора - реактивным током.

Очевидно, что такой режим параллельной работы вало- и дизель-генератора недопустим с точки зрения эксплуатации судовой электростанции. Поэтому нормативным документом [3] допускается только кратковременная параллельная работа вало- и дизель-генератора на время перевода нагрузки с одного генератора на другой.

Проблема распределения мощностей между вало- и дизель-генератором при коммутации общей нагрузки может быть решена путем автоматизации этого процесса. При этом регулирование распределения нагрузки должно осуществляться непрерывно, в том числе и во время коммутационных переходных процессов принятия нагрузки.

В качестве управляющего воздействия можно выбрать задающий сигнал по частоте вращения дизель-генератора (рис. 2):

$$\omega_{зад}(t) = \omega_0 + \Delta\omega(t) .$$

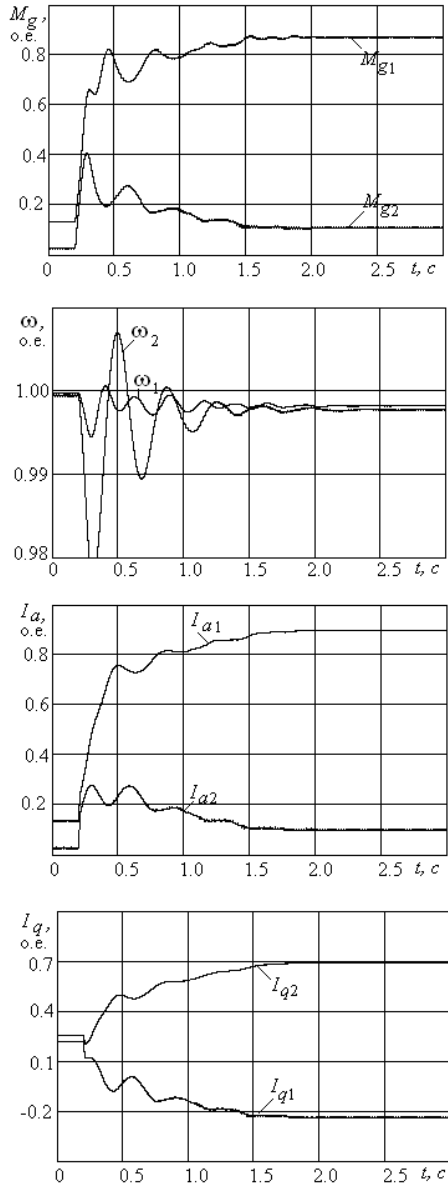


Рис. 1. Переходные процессы включения активно-индуктивной нагрузки на параллельно работающие вало- и дизель-генератор

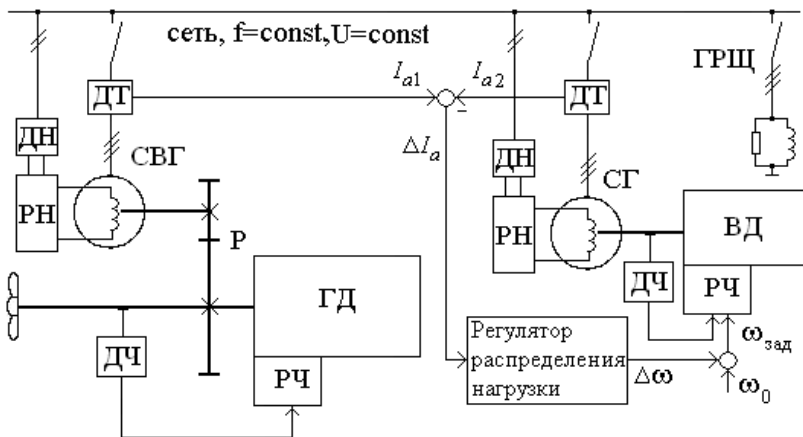


Рис. 2. Функциональная схема системы регулирования распределения нагрузки между параллельно работающими вало- и дизель-генератором: ГД, ВД – главный и вспомогательный двигатель; СВГ, СВГ - синхронный дизель- и валогенератор; ГРЩ – главный распределительный щит; ДТ, ДН, ДЧ – датчики активного тока, напряжения и частоты вращения; РН, РЧ – регуляторы напряжения и частоты вращения

Изменение задающего воздействия  $\omega_{зад}$  по частоте вращения дизель-генератора на небольшую величину  $\Delta\omega$  по отношению к величине начального задания  $\omega_0$  и будет составлять не более нормированного наклона частотной характеристики, т.е.  $\Delta\omega < \delta_{дг} = 0,02$ . Регулирование  $\omega_{зад}$  в этом диапазоне позволяет обеспечить одинаковое распределение активной мощности между вало- и дизель-генератором во всем диапазоне нагрузок.

Определять величину активной нагрузки электроагрегатов можно по различным параметрам: непосредственно по величине активной мощности генераторов  $P_1$  и  $P_2$ , по величине моментов сопротивления на валу генераторов  $M_{g1}$  и  $M_{g2}$  при постоянной частоте вращения и по величине действующих значений активных токов генераторов  $I_{a1}$  и  $I_{a2}$  при постоянном напряжении.

Использование перечисленных параметров для системы регулирования нагрузки при параллельной работе дает примерно одинаковые результаты, поэтому целесообразно выбирать наиболее доступные для измерения параметры, например активные токи нагрузки генераторов

(см. рис. 2).

Рассмотрим применение пропорционально-интегрального закона распределения активной нагрузки между двумя параллельно работающими генераторами, номинальная активная мощность которых равна  $P_1$  и  $P_2$ :

$$\Delta\omega = K_{\Pi} \cdot \Delta I_a + \frac{1}{T_{\text{И}}} \int_0^t \Delta I_a dt. \quad (1)$$

Разность активных токов в законе управления (1) будем вычислять с учетом соотношения мощностей генераторов

$$\Delta I_a = \frac{P_1}{P_1 + P_2} \cdot I_{a1} - \frac{P_2}{P_1 + P_2} \cdot I_{a2}. \quad (2)$$

Равенство нулю величины  $\Delta I_a$  в формуле (2) означает распределение активных токов генераторов пропорционально их мощностям. При одинаковых мощностях генераторов  $\Delta I_a = I_{a1} - I_{a2}$ .

На рис. 3 приведены результаты моделирования процесса включения и выравнивания активной мощности по закону управления (1) с использованием компьютерной модели параллельной работы дизель и валогенератора, соответствующей схеме рис. 2.

Выбор настроечных параметров (коэффициента пропорциональности  $K_{\Pi}$  и постоянной интегрирования  $T_{\text{И}}$ ) регулятора распределения нагрузки выполнен путем оптимизации по времени процессов с ограничением на их колебательность.

Для рассмотренных электроэнергетических систем в режиме параллельной работы дизель и валогенератора равной мощности (по 400 кВт) оптимальными настроечными параметрами регулятора распределения нагрузки будут значения  $K_{\Pi, \text{опт}} = 0,015$  и  $T_{\text{И, опт}} = 32$  с.

Эти настроечные параметры оказываются наилучшими для П-, И- и ПИ- регуляторов распределения нагрузки.

В системе с пропорциональным регулятором достичь одинакового распределения активных токов не удастся. Валогенератор принимает вдвое большую нагрузку, чем дизель-генератор. Повышение точности распределения нагрузки за счет увеличения коэффициента усиления пропорционального регулятора приводит к значительному увеличению колебательности переходных процессов. Дальнейшее повышение коэффициента усиления регулятора приводит к потере устойчивости системы.

Поэтому использование пропорционального закона при регулировании распределения нагрузки параллельно работающих генераторов

не приводит к желаемому эффекту из-за низкой точности автоматического выравнивания нагрузок, недопустимой колебательности переходных процессов и снижению устойчивости системы.

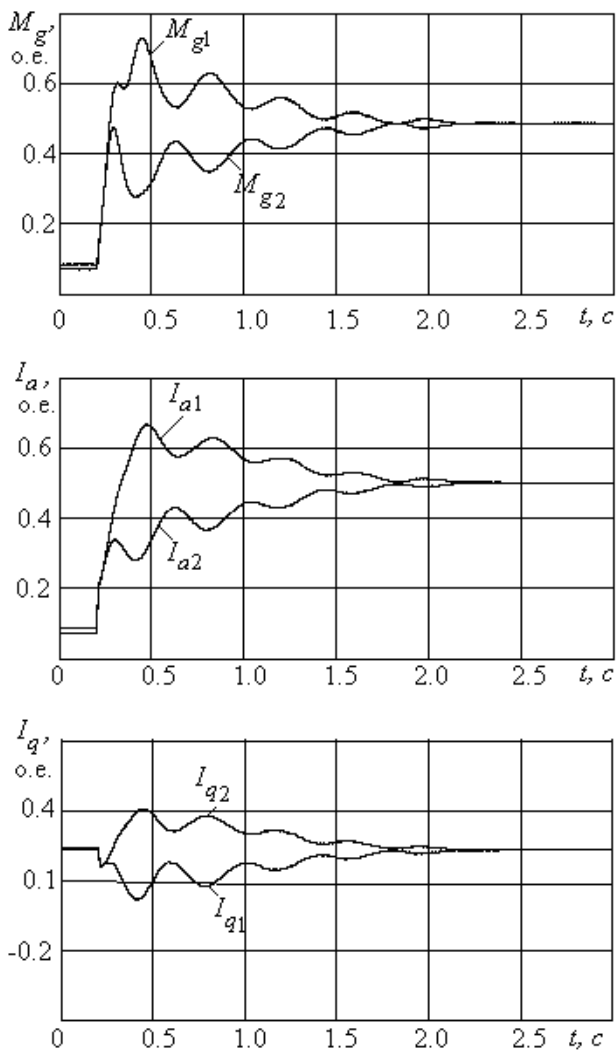


Рис. 3. Управление распределением нагрузки ВГ и ДГ пропорционально-интегральным регулятором

Использование интегрирующего закона регулирования в системе позволяет добиться одинакового распределения активной и реактивной нагрузки между генераторами. Однако в переходном процессе по частоте вращения дизель-генератора появляется еще одна низкочастотная гармоническая составляющая, которая приводит к обменным колебаниям мощности между генераторами с периодом в несколько секунд. Переходный процесс установления нагрузки затягивается до 4 ... 5 с. Уменьшение постоянной интегрирования регулятора приводит к повышению колебательности процесса и увеличению его длительности.

Использование пропорционально-интегрирующего закона в регуляторе распределения нагрузки параллельно работающих электроагрегатов позволяет устранить проблемы, связанные с использованием пропорционального или интегрирующего регулятора (рис. 3). Оптимальные настроечные параметры позволяют завершить переходный процесс за 1,5 ... 2,0 с.

При одинаковых структурах и параметрах регуляторов напряжения синхронных генераторов реактивная мощность между ними также будет распределяться одинаково,  $I_{q1}(\infty) = I_{q2}(\infty)$  (см. нижний процесс на рис. 3).

Итак, сравнение процессов регулирования нагрузки параллельно работающих дизельных электроагрегатов с разными частотными нагрузочными характеристиками показывает, что оптимальной структурой регулятора является ПИ- регулятор, изменяющий задание по частоте одного из агрегатов.

Колебательные свойства и быстродействие такой системы распределения нагрузки удовлетворяют эксплуатационным требованиям к судовым многогенераторным электроустановкам.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов А.П. Судовые автоматизированные электроэнергетические системы. - М.: Транспорт, 1988. - 328 с.
2. Мелешкин Г.А. Генераторные установки отбора мощности на судах. - Л.: Судостроение, 1967. - 232 с.
3. Правила технической эксплуатации морских и речных судов // Нормативные документы морского транспорта Украины. – Том 2. - Одесса, 2000. - 405 с.
4. Вишнеvский Л.В., Веретенник А.М., Муха Н.И., Козырев И.П. Моделирование включения синхронных генераторов в судовую сеть // Электромашинобудовання та електрообладнання. – К.: Техніка, 2006. – Вип. 66. – С. 201 - 204.

5. Вишневский Л.В., Веретенник А.М., Войтецкий И.Е., Козырев И.П. Включение синхронных генераторов в многоагрегатную судовую электростанцию // Электромашинобудування та електрообладнання. – К.: Техніка, 2007. – Вип. 68. – С. 26 - 29.