



УДК 621.436.001.63

© Г. Б. Горелик, С. М. Бурков, А. И. Каминский, 2014

ПЕРЕТЕКАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЕ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРОВ – КАК РЕЗОНАНСНЫЕ КОЛЕБАНИЯ КРУТИЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НА РЕЖИМАХ МАЛЫХ НАГРУЗОК

Горелик Г. Б. – д-р техн. наук, проф. кафедры «Двигатели внутреннего сгорания», тел.: (4212) 22-58-09, e-mail: Ggorelik@mail.ru; *Бурков С. М.* – д-р техн. наук, проф. кафедры «Вычислительная техника», тел. (4212) 22-44-19, e-mail: c_burkov@mail.ru; *Каминский А. И.* – д-р техн. наук, проф. кафедры «Двигатели внутреннего сгорания» e-mail: kaminskiy@mail.ru (ТОГУ)

Перетекание электрической мощности между параллельно работающими дизель-генераторами переменного тока на малых режимах как резонансные колебания одноузловой формы крутильной системы снижают эффективные показатели и надежность агрегатов. Выявлена субгармоническая «моторная» гармоника возмущающих сил от давления газов с порядком 0,25 для 4-х тактных дизелей (соответственно 0,5 для двухтактных), связанная с нестабильной от цикла к циклу работой топливной аппаратуры и вызывающая резонансные явления в системе. Это является новым по отношению к классическим представлениям о возмущающих силах в крутильных системах. Предложен способ оценки работы возмущающих сил и пути повышения качества параллельной работы.

Ключевые слова: дизель-генератор, система автоматического регулирования, топливная аппаратура дизелей, нестабильность частоты вращения от цикла к циклу, крутильная система, перетекания электрической мощности.

Качество параллельной работы дизель-генераторных агрегатов (ДГА) определяется рядом отечественных и зарубежных стандартов и обеспечивается, как правило, лишь для номинальных режимов работы. На режимах малых нагрузок имеют место повышенные резонансные размахи амплитуд крутильных колебаний одноузловой формы для параллельно работающих дизель-электрических агрегатов, обусловленные физической природой данного явления [1, 2]. При этом, безусловно, снижаются показатели качества параллельной работы, безотказности и долговечности работающих агрегатов, ухудшается топливная экономичность, а величина перетекания электриче-



ской мощности между ДГА превышает установленное стандартами допустимое значение.

Возникает необходимость в постановке практически важных задач:

- установление физической природы перетекания электрической мощности между параллельно работающими дизель-электрическими агрегатами;
- оценка влияния межциклового нестабильности подач топлива от цикла к циклу на величину резонансных перетеканий электрической мощности между агрегатами из-за появления субгармонической «моторной» гармоники возмущающих сил от давления газов с порядком 0,25 для 4-х тактных дизелей (соответственно 0,5 для двухтактных);
- оценка возможности повышения топливной экономичности при различных настройках топливной аппаратуры и системы автоматического регулирования частоты ДГА;
- поиск возможных путей повышения качества параллельной работы, в том числе за счет воздействия на параметры систем ДГА.

Первая задача является определяющей, поэтому остановимся на рассмотрении физической природы перетекания электрической мощности между параллельно работающими дизель-электрическими агрегатами.

Работающие ДГА, например, два агрегата, в первом приближении можно представить в виде четырех массовой крутильной системы [1-3], при этом вращающиеся массы дизелей и генераторов связаны условным упругим валом (показан пунктирной линией), заменяющим собой упругую электрическую связь между генераторами (рис. 1).

Дизель-генераторы удерживаются в синхронном вращении так называемым электрическим синхронизирующим крутящим моментом, величина которого зависит от фазового угла сдвига роторов генераторов.

В такой системе всегда имеется тот или иной источник возмущения режима. В частности, в дизеле как машине периодического действия кривая изменения давления в цилиндре или момента может быть разложена в спектр синусоидальных колебаний различных частот и амплитуд (так называемый гармонический анализ). И на каждом режиме возможно совпадение той или гармоники частоты возмущающих сил с собственной частотой системы той или иной формы колебаний. Именно тогда и возникают резонансные явления, приводящие к увеличению размаха колебаний роторов генераторов.

Если же источник возмущения воздействует на крутильную систему с частотой равной или меньшей, но кратной собственной частоте крутильной системы, то возникают резонансные крутильные колебания с большими амплитудами. Это приводит к периодическим изменениям амплитуды синхронизирующего момента в условной электрической связи. Интерес представляют колебания низшей одноузловой формы, так как именно они имеют значительную мощность и амплитуду колебаний, частота которых составляет 2...5 Гц. Эти колебания воспроизводятся механической и электрической частями системы. На условную электрическую связь крутильной системы приходится также узел и от трехузловой формы колебаний, однако, собственная



частота этой формы высока (порядка сотен Гц) при относительно малой амплитуде колебаний и находится вне зоны действия возмущающих сил.

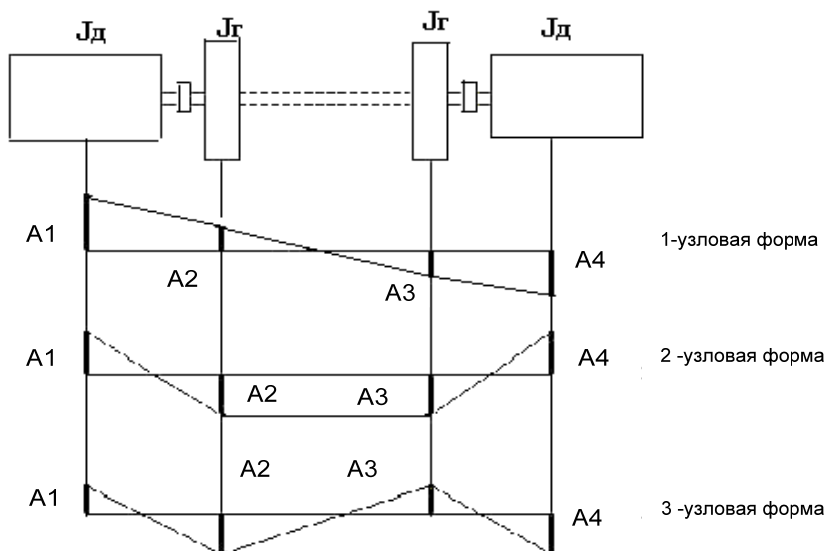


Рис. 1. Схема 4-х массовой крутильной системы двух ДГА при параллельной работе (J_d , J_g - приведенные моменты инерции дизеля и генератора; $A_1 - A_4$ - амплитуды отклонений сосредоточенных масс)

Поэтому эти колебания практически не воспроизводятся инерционной системой, но могут внести искажения синусоидальности и асимметрии напряжений электрического тока на шинах ДГА.

В дальнейшем речь пойдет об одноузловой форме колебаний как главном факторе, определяющем процессы перетекания электрической мощности между параллельно работающими ДГА. Поэтому следует упростить 4-х массовую систему до 2-х массовой, когда приведенные вращающиеся массы дизеля и генератора объединяются в одну (ДГ1 и ДГ2).

В идеальном случае при отсутствии смещения роторов генераторы работают как бы автономно. Однако, реально находится тот или иной источник возмущения, вызывающий смещение роторов, это и приводит к возникновению синхронизирующего момента в линии электрической связи, стремящегося компенсировать сдвиг роторов. Реально это предопределяет «перетекание» электрической мощности между ДГА. При параллельной работе ДГА составляют единую крутильную систему. Узел первой формы колебаний приходится на условную электрическую связь [1, 3], которая подобна условному упругому валу, соединяющего крутильные массы двух агрегатов (рис. 2).

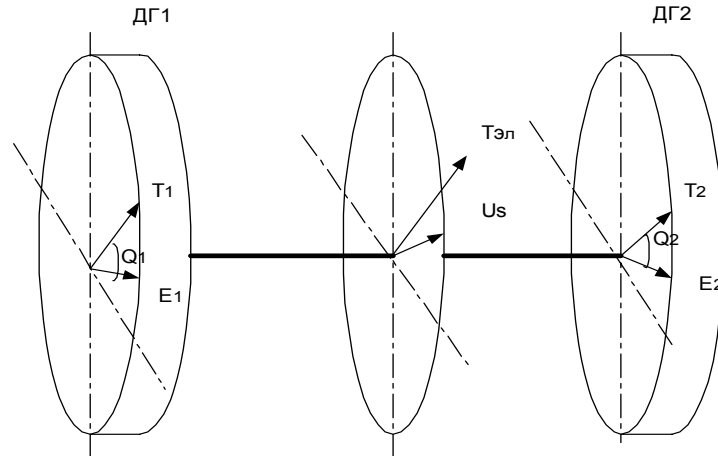


Рис. 2. Схема механической крутильной системы как эквивалента параллельной работы двух дизель-генераторов при синхронном вращении (E_1 и E_2 – векторы электродвижущих сил; U_s – вектор напряжения; T_1 , T_2 – соответственно электрические моменты дизель-генераторов)

Условия равновесия системы $\omega = const$. При этом электрический синхронизирующий момент (условная упругая связь) определится как

$$T_{эл} = T_1 + T_2 = t_{so} \cdot \sin Q,$$

где T_1 , T_2 – соответственно электрические моменты дизель-генераторов; t_{so} – коэффициент синхронизирующего момента; Q – угол опережения электрического момента по отношению к вектору электродвижущей силы [4].

Векторы электродвижущих сил дизель-генераторов E_1 и E_2 при синхронном вращении генераторов опережают вектор напряжения U_s . При крутильных колебаниях системы (а они всегда имеют место) один дизель-генератор начинает опережать другой (угол Q_1 становится положительным по отношению к вектору E_1), при этом дизель-генератор принимает на себя дополнительную нагрузку. Второй дизель-генератор отстает (угол Q_2 становится отрицательным по отношению к вектору E_2). Происходит попеременное смещение роторов (возникают перетекания электрической энергии между ДГА с частотой близкой к частоте одноузловой формы крутильной системы). Фактически вышеизложенное и определяет физическую модель параллельной работы ДГА.

Угол Q , как правило, не превышает 15...20 градусов угла поворота ротора генератора и зависит от величины нагрузки. При этом для опережающего,



например, первого ДГ1 происходит увеличение угла опережения на величину ΔQ_1 и его электрический момент возрастает на величину $+\Delta T_1 \cong t_{so} \cdot (+\Delta Q_1)$. Соответственно отстающий ДГ2 развивает меньший момент на величину $-\Delta T_2 \cong t_{so} \cdot (-\Delta Q_2)$.

Таким образом, в конкретный момент времени происходит «перетекание» электрической мощности (см. рис. 2) между параллельно работающими дизель-генераторами (обменные колебания согласно ГОСТ 10511-83).

При параллельной работе на режиме 20...25 % совместной нагрузки два дизель-генератора (см. рис. 4) работают по регуляторным характеристикам с перераспределением мощности во времени в соответствие с вышеприведенной физической моделью. При резонансных колебаниях обменные колебания достигают 50 %. (± 25 %). Этот случай особенно характерен при работе на потребитель с индуктивной нагрузкой, например, с асинхронным электромотором, когда $\cos \varphi$ снижается до значения 0,6...0,7. При резонансных обменных колебаниях частота источника возмущения составляет величину

$$f = \frac{n}{240} \text{ Гц } (\nu = 0,25).$$

Это возмущение результат неустойчивой от цикла к циклу работы топливной аппаратуры дизеля. Других источников резонансного возмущения нет. Именно на долевых режимах вследствие ослабления упругой синхронной связи между агрегатами имеют место повышенные резонансные обменные колебания.

Для дизель-генераторов, оборудованных системой автоматического регулирования частоты вращения (САРч) с регуляторами первого и второго класса точности величина обменных колебаний нагрузки не должна превышать

$$\frac{\pm \Delta T_{1(2)}}{T_{1(2),ном}} \leq \pm 10 \%$$

Для дизель-генераторов, имеющих САРч с регуляторами третьего и четвертого классов точности, обменные колебания не должны превышать ± 15 %. Однако, практика эксплуатации судовых и стационарных дизель-генераторов показывает, что на долевых режимах нагрузки требования стандарта не обеспечиваются, а в отдельных случаях обменные колебания мощности достигают 40...70 %. При частоте обменных колебаний порядка 2...5 Гц происходит жесткое перераспределение нагрузки, сопровождающееся сильной вибрацией агрегатов. Роторы генераторов с большой амплитудой колеблются друг относительно друга с частотой 2...5 Гц одноузловой формы крутильных колебаний системы в зависимости от нагрузочного режима. При этом возникают дополнительные моменты от угловых ускорений валов, ко-



которые распределяются между двигателем и генератором пропорционально их массовым моментам инерции. Более 75...80 % дополнительного момента приходится на ротор генератора, что может привести к разрушению его обмотки и аварийному выходу генератора из строя.

Таким образом, речь идет о вынужденных резонансных колебаниях многомассовой крутильной системы, когда периодические изменения электрического синхронизирующего момента между параллельно работающими агрегатами определяют качество вырабатываемой электроэнергии (величина обменных колебаний регламентируется в соответствии с ГОСТ 10511-83, несимметрия и искажения синусоидальности – ГОСТ 13109-97).

Крутильные колебания в поршневых двигателях возбуждаются периодическими моментами от сил газов и инерции, а также периодическими моментами нагрузки. Поэтому при расчете и анализе крутильных колебаний учитываются гармонические составляющие периодических моментов. Введено понятие «моторные» гармоники, характеризующееся порядком составляющей $\nu = \frac{T}{T_\nu}$, где T - период одного оборота коленчатого вала; T_ν - период данной гармонической составляющей.

Для 4-тактных дизелей порядок ν согласно классическим канонам может быть представлен бесконечным рядом $\nu = 0,5, 1, 1,5, 2 \dots \infty$, а для 2-тактных $\nu = 1, 2, 3 \dots \infty$. Разложение периодического возмущающего момента, например, от сил газов с использованием метода гармонического анализа представлено на рис. 3. [5].

$$M_\Gamma = M_{cp} + \sum_{\nu \text{ мин}}^4 M_{\nu\omega} \text{Sin}(\nu\omega t + \psi),$$

где каждая гармоническая составляющая ν – порядка характеризуется амплитудой $M_{\nu\omega}$, ψ – начальная фаза при частоте $\omega_\nu = \nu\omega$.

При этом каждая составляющая разложения характеризуется работой, передаваемой системе $W_{a\nu} = \pi M_{\nu\omega} A_\nu \text{Sin} \psi$.

Минимальная «моторная гармоника» согласно классическим представлениям [5] с максимальной энергетической составляющей имеет $\nu = 0,5$. Именно она и должна вызывать вынужденные колебания представленной на рис. 1 крутильной системы.

Однако, частота этого источника возмущения составляет в данном случае $n/120$ Гц и изменяется соответственно регуляторной характеристики ДГА с установленной 3-х процентной степенью неравномерности статической характеристики регулятора частоты в пределах 6,1...6,34 Гц, это не может вызвать резонанс крутильной системы.

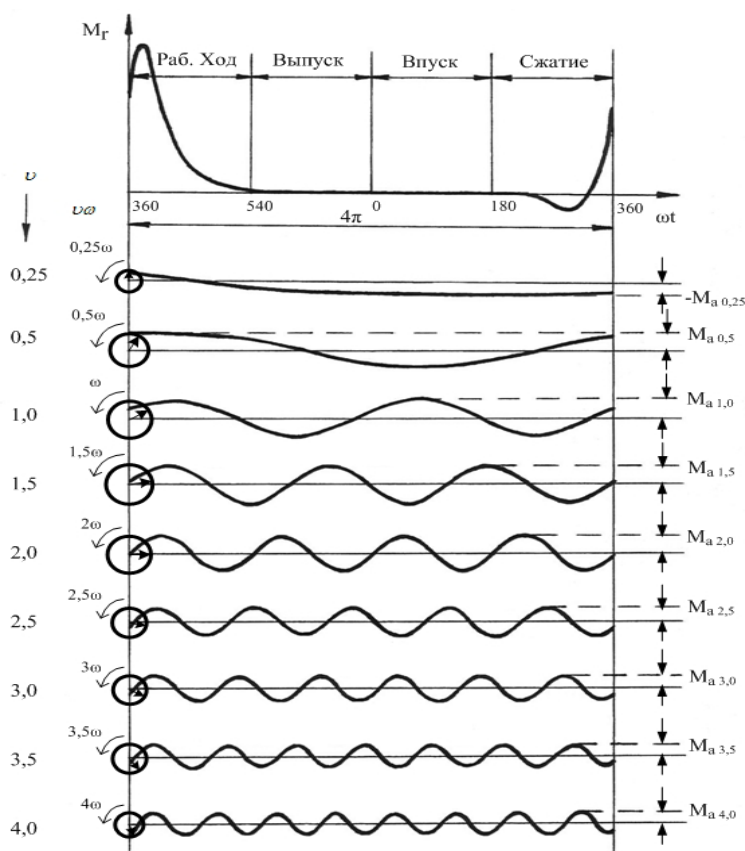


Рис. 3. Разложение возмущающего момента от сил газов для 4-тактного дизеля (моторные гармоники)

В классические представления о «моторных гармониках» следует внести новые понятия о возможных источниках возмущающих сил в двигателе, связанные именно с субгармонической межцикловой периодической нестабильностью процессов топливоподачи [2, 3] с частотой $n/240$ Гц (на рис. 3 это разложение с гармоникой $\nu = 0,25$). Моторная гармоника $\nu = 0,25$ характеризуется различным уровнем работы, который достигает максимума при выраженном пропуске подачи топлива через цикл. Это определяется критерием стабильности $X=2$ [1, 3]. Работу этой составляющей возможно определить по выражению $W_{0,25\omega} (X - 1)$ для соответствующих режимов работы с использованием математической модели процессов топливоподачи [3].

Главное, это наличие субгармонического источника возмущения, который определяет «сваливание» крутильной системы из параллельно работающих ДГА в резонансные колебания, когда мощность источника практически не существенна, а собственная частота одноузловой формы крутильных ко-

лебаний системы из 2-х ДГА близка к представленному источнику возмущающих моментов.

При этом из-за геометрического и физического подобия проектируемых ДГА при увеличении агрегатной мощности и соответствующего снижения частоты вращения возрастают их приведенные моменты от инерционных масс и соответственно уменьшается собственная частота одноузловой формы крутильной системы, а частота источника возмущения опять же приближается к частоте одноузловой формы колебаний. Это подтверждается расчетами по ряду отечественных ДГА, начиная с быстроходных дизелей в качестве привода и кончая ДГА с дизелями СОД [1].

Таким образом, субгармонический источник возмущения от периодической неустойчивости процессов впрыскивания приводит к резонансным колебаниям параллельно работающим ДГА и существенно ухудшает качество работы агрегатов.

Проведенное на заводе «Дальдизель» в 1966 г. с участием одного из авторов торсиографирование крутильной системы из двух параллельно работающих ДГ с одновременным (синхронизированным) во времени осциллографированием процессов сгорания в цилиндре 1 и перетеканием активной мощности показали (рис.4), что собственная частота крутильных колебаний системы находится для диапазона режимов нагрузки от холостого хода до номинальной в пределах 2...4,5 Гц [1] и в данном случае соответствует 3,1 Гц. Источник возмущения очевиден, процессы сгорания происходят с чередованием активного и пассивного циклов впрыскивания и соответственно чередуются максимальные давления сгорания. При этом перетекание электрической мощности 3 между агрегатами превышает допустимый предел в $\pm 10\%$. Привязка к торсиограмме обеспечивалась отметчиком циклов 4, который управлялся электрическим контактом от коленчатого вала. Определенная при обработке торсиограмм собственная частота одноузловой формы крутильных колебаний системы ДГА соответствовала частоте неустойчивой от цикла к циклу работы топливной аппаратуры $n/120$ Гц. Таким образом, подтвержден прямой резонанс с источником периодических возмущающих сил со стороны двигателя с субгармонической моторной гармоникой $\nu = 0,25$.

При работе на режимах малых нагрузок параметры параллельной работы существенно ухудшаются [1, 3] вследствие: 1. усиления резонансных крутильных колебаний одноузловой формы системы совместно работающих дизель-генераторов (приближение частоты вынуждающих моментов к частоте одноузловой формы); 2. возрастания при этом амплитуды межцикловой неустойчивости топливной аппаратуры (ТА), особенно от цикла к циклу [$X=2$]; 3. усиления разброса неравномерности цикловых подач по секциям и фаз топливоподачи; 4. возрастания амплитуды колебаний частоты вращения и, соответственно, колебаний рейки топливного насоса высокого давления вплоть до появления в системе автоматического регулирования скорости вторичного эффекта [3].

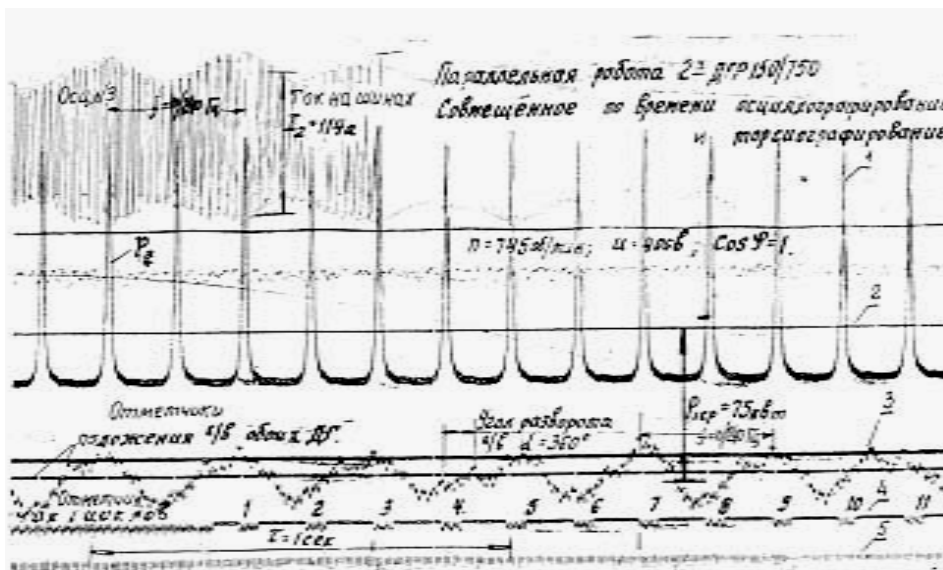


Рис. 4. Совмещенное по времени осциллографирование параллельной работы 2-х дизель-генераторов ДГР 150/750 с торсиографированием крутильной системы (1-процесс сгорания в цилиндре; 2-нулевая линия датчика электрической мощности; 3-кривая активной мощности; 4-отметчик циклов торсиографа Гейгера; 5-отметка времени)

К параметрам, характеризующим качество параллельной работы, следует отнести в первую очередь величину перетекания электрической мощности между ДГ на режиме, степень рассогласования нагрузки и неравномерность частоты вращения.

В статье кратко представлены аспекты решения первой задачи, являющиеся базовыми при проведении последующих расчетно-экспериментальных работ по обеспечению качества параллельной работы дизель-генераторов переменного тока на режимах малых нагрузок.

Безусловно необходимо продолжение данной работы в части оценки влияния межциклового нестабильности подачи топлива от цикла к циклу на величину резонансных перетеканий электрической мощности между агрегатами из-за появления субгармонической «моторной» гармоники возмущающих сил от давления газов с порядком 0,25 для 4-х тактных дизелей (соответственно 0,5 для двухтактных);

Необходима расчетно-экспериментальная оценка возможности повышения топливной экономичности при различных настройках топливной аппаратуры и системы автоматического регулирования частоты ДГА и поиск возможных путей повышения качества параллельной работы, в том числе за счет воздействия на параметры систем ДГА.



В целом, это комплексная и многоплановая тема работ с целью повышения эффективности ДГА при параллельной работе.

Библиографические ссылки

1. Горелик Г.Б., Жуков С.А. К вопросу о перетекании электрической мощности при параллельной работе дизель-генераторов на долевых режимах нагрузки при резонансных колебаниях // Актуальные проблемы создания и эксплуатации комбинированных двигателей внутреннего сгорания: материалы междунар. конф. «Двигатели 2002», 23-28 сент. 2002 г. Хабаровск: Изд-во ХГТУ, 2002. С. 140-146.
2. Конкс Г.А. Исследование причин и методов снижения обменных колебаний мощности при параллельной работе дизель-генераторов ДГР 150/750 // Дисс. на соиск. уч. ст. к.т.н., Л., 1970, 220 с.
3. Горелик Г.Б. Процессы топливоподачи при работе топливной аппаратуры дизелей на долевых и переходных режимах : учеб. пособие. - Хабаровск: Изд-во ХГТУ, 2003. - 248 с.
4. Урусов И.Д. Линейная теория колебаний синхронной машины/ М., Изд-во АН СССР, 1960. 325 с.
5. Истомин П.А. Крутильные колебания в судовых двс.-Л.: Судостроение, 1968. – 304 с.

Title: Electric Power Flow Between Working in Parallel Diesel Generators as Resonant Oscillations of a Torsional System at Small Loads

Authors' affiliation:

Gorelik G. B. - Pacific National University, Khabarovsk, Russian Federation
Burkov S.M. - Pacific National University, Khabarovsk, Russian Federation
Kaminsky A.I. - Pacific National University, Khabarovsk, Russian Federation

Abstract: Electric power flow between running in parallel diesel generators in small modes as a single-node form of torsional resonant oscillations reduces effective indicators and dependability of units. The dependence of subharmonic "motor" harmonic of disturbing forces on gas pressure with the order of 0.25 for 4-stroke diesel engines (corresponding to 0.5 for 2-stroke ones) due to unstable, from cycle to cycle, the fuel equipment operation is found. This notion is new concerning the classical notions of perturbing forces in torsional systems. The means of evaluation of perturbing forces action and ways to improve the quality of parallel work are given.

Keywords: diesel generator, automatic control system, fuel equipment of diesel engines, instability of rotational speed between cycles, torsional system, electric power flow.