

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ
імені адмірала Макарова
Херсонська філія
Енерготехнічний факультет
Кафедра автоматики та електроустаткування

Рекомендовано до захисту

Завідувач кафедри автоматики та
електроустаткування

_____ Михаліченко П.Є.
(підпис) (прізвище та ініціали)

«_____» _____ 202__ р.

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ МАГІСТРА

на тему

ПРИСТРІЙ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ОБМІННИХ
КОЛИВАНЬ АКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ МІЖ
ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНИМИ АГРЕГАТАМИ

Виконав: студент 6 курсу, групи 6367м
спеціальності 141. Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка
освітньої-професійної програми:
Експлуатація суднових автоматизованих
систем

_____ Міхнєв І.І.
(прізвище та ініціали)

Керівник: _____ Бугрім Л.І.
(прізвище та ініціали)

Рецензент: _____ Новогрецький С.М.
(прізвище та ініціали)

м. Херсон – 2020 року

« » 202 p.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): загальні відомості щодо суднових електростанцій та обмінних коливань потужності між паралельно працюючими генераторами; аналіз впливу нерівномірності подачі палива до циліндрів на обмінні коливання активної потужності між генераторами; охорона праці; охорона навколишнього середовища.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

1. Крутильна схема синхронного дизель-генератора; 2. Графіки основної гармоніки обертового моменту шестициліндрового дизеля; 3. Діаграма порядку роботи циліндрів та періодичні форми зміни обертового моменту при пропуску в роботі суміжних циліндрів; 4. Модель паралельно працюючих дизель-генераторних агрегатів; 5. Модель блоків АРЧ та АРЗ; 6. Часові діаграми взаємних коливань електричних параметрів при половинній подачі палива в один з циліндрів; 7. Часові діаграми взаємних коливань електричних параметрів при відсутності подачі палива в один з циліндрів; 8. Схема пристрою для контролю амплітуди низькочастотних коливань активної потужності

6. Дата видачі завдання на кваліфікаційну роботу «16» вересня 2019 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1	Аналіз особливостей експлуатаційних режимів суднових електроенергетичних установок змінного струму.	20.12.2019 р.	
2	Аналіз і моделювання судового електроенергетичного комплексу для дослідження обмінних коливань потужності	27.02.2020 р.	
3	Розробка схеми пристрою для моніторингу амплітуди обмінних коливань активної потужності між паралельно працюючими дизель-генераторними агрегатами	30.05.2020 р.	
4	Підготовка розділу з Міжнародної конвенції по запобіганню забруднення з суден	09.10.2020 р.	
5	Оформлення магістерської роботи.	30.11.2020 р.	

Студент

(підпис)

Міхнєв І.І.

(прізвище та ініціали)

Керівник
кваліфікаційної роботи

(підпис)

Бугрім Л.І.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

В кваліфікаційній роботі розглянуто загальний опис відомостей про суднові електростанції та обмінні коливання потужності. Проведений аналіз систем автоматичного регулювання частоти обертання синхронного генератора. Здійснено моделювання паралельної роботи дизель-генераторних агрегатів з нерівномірністю подачі палива, враховуючі ланку запізнювання і ланку зони нечутливості. Після моделювання отриманні відповідні характеристик при різних режимах паралельної роботи дизель-генераторних агрегатів та підтвердження наявності обмінних коливань активної потужності. Запропонована та розроблена схема пристрою оцінки амплітуди і частоти обмінних коливань. Пристрій може бути використаний для моніторингу стану електростанції і вироблення відповідних керуючих впливів для стабілізації роботи системи в цілому. Розглянуті заходи щодо охорони навколишнього середовища.

ABSTRACT

In the qualification work a general description of ship power information and power fluctuations are considered. The analysis of automatic speed control systems of the synchronous generator is carried out. Modeling of parallel work of diesel generating units with non-uniformity of fuel feed are performed, taking into account the delay element and the dead zone element. After modeling, the corresponding characteristics are obtained under different modes of parallel operation of diesel generator sets and confirmation of the presence of active power fluctuations. The scheme of the device of estimation of the amplitude and frequency of the oscillations is proposed and developed. The device can be used to monitor the status of the power plant and to produce appropriate control effects to stabilize the system as a whole. Measures on environmental protection are considered.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	4
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	7
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ЩОДО СУДНОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ТА ОБМІННИХ КОЛИВАНЬ ПОТУЖНОСТІ МІЖ ПАРАЛЕЛЬНО ПРАЦЮЮЧИМИ ГЕНЕРАТОРАМИ	11
1.1 Склад СЕЕС	11
1.2 Характеристики системи регулювання швидкості і генератора в складі ДГА....	12
1.3 Автоматичні регулятори частоти обертання	17
1.4 Системи автоматичного регулювання напруги	19
1.5 Паралельна робота генераторних агрегатів. Переваги та недоліки паралельної роботи	21
1.6 Розподіл активного навантаження	22
1.7 Обмінні коливання потужності	25
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ВПЛИВУ НЕРІВНОМІРНОСТІ ПОДАЧІ ПАЛИВА ДО ЦИЛІНДРІВ НА ОБМІННІ КОЛИВАННЯ АКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ МІЖ ГЕНЕРАТОРАМИ	39
2.1 Вільні коливання синхронного агрегату.....	39
2.2 Вимушені коливання синхронного агрегату та періодичні форми обертового моменту приводного двигуна	41
2.3 Моделювання паралельної роботи дизель – генераторних агрегатів з урахуванням нерівномірності подачі палива	51
РОЗДІЛ 3. ВИМОГИ ПОЛОЖЕНЬ МІЖНАРОДНОЇ КОНВЕНЦІЇ МАРПОЛ 73/78 ЩОДО ПРИСТРОЇВ КОНТРОЛЮ СКИДУ НАФТИ НА НАФТОНАЛИВНИХ СУДНАХ	66
3.1. Технічні вимоги щодо сепараторів.....	66
3.2. Технічні вимоги щодо сигналізаторів	69

3.3. Система автоматичного заміру, реєстрації	72
3.4 Прилади для визначення вмісту нафти	74
3.5. Прилади для визначення межі розділу "нафта-вода"	75
ВИСНОВКИ	77
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	78

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АРЧ – автоматичний регулятор частоти

АФХ – амплітудно-фазова характеристика

ГА – генераторний агрегат

ГРЩ – головний розподільчий щит

ДГ – дизель-генератор

ПД – приводний двигун

ПЕ – перетворювач електроенергії

ПНВТ – паливний насос високого тиску

РХ – регулююча характеристика

РЩ – розподільчий щит

РЩЖБ – розподільчий щит живлення з берегу

САР – система автоматичного регулювання

СГ – синхронний генератор

СЕС – суднова електрична станція

СЕЕС – суднова електроенергетична система

ВСТУП

Організація ефективної паралельної роботи генераторів є важливим питанням для будь-якого електротехнічного комплексу, але особливо для морського судна при сумірності потужностей джерел і споживачів. Тут можна виділити два аспекти, які пояснюють важливість цієї проблеми. По-перше, забезпечення безпеки судна та людей, що знаходяться на ньому, так як порушення паралельної роботи може привести до розвалу енергосистеми, знеструмлення судна, втрати керованості і катастрофи. По-друге, важливою є економічна складова експлуатації будь-якого судна. Низька якість виробленої електроенергії призводить до підвищеного витрати палива, збільшення рейсового часу, появи додаткових витрат, пов'язаних з ремонтом обладнання. Необхідно врахувати, що в більшості випадків приводними двигунами для суднових синхронних генераторів є дизельні двигуни внутрішнього згорання, а значить, забезпечення надійної паралельної роботи повинно розглядатися в зв'язку з судновою енергетичною установкою електроенергетичні системи (СЕЕС) мають велику кількість систем автоматики, що забезпечують паралельну роботу суднових дизель-генераторних агрегатів (ДГА). За заявою фірм виробників експлуатація суден класу автоматизації А1 можлива з безвахтенним обслуговуванням. Однак, дуже часто, виникають аварійні ситуації, пов'язані з незадовільною якістю паралельної роботи джерел електроенергії. Заміри, проведені фахівцями під час досліджень, також виявляють низьку якість електричної енергії, що виробляється автономними електростанціями. Причинами таких фактів є неповна вивченість всіх процесів, що відбуваються, недосконалість систем автоматики і недостатня кваліфікація обслуговуючого персоналу. Однією з маловивчених проблем паралельної роботи дизель-генераторних агрегатів на основі синхронних генераторів змінного струму, які в основному застосовуються в суднових електротехнічних комплексах, є обмінні коливання потужності. Вимоги класифікаційних товариств і міжнародні стандарти не містять допустимих норм, що обмежують рівень таких коливань. А між тим, обмеження амплітуди обмінних коливань потужності безпосередньо пов'язано із забезпечен-

ням стійкої роботи суднової електростанції. Очевидно, що існуючі методи організації і управління паралельною роботою дизель-генераторів не можуть виключити негативні наслідки наявності обмінних коливань потужності.

Однак причини виникнення обмінних коливань вивчені не до кінця. Тому необхідно провести додаткові дослідження паралельної роботи синхронних генераторів в складі суднового електротехнічного комплексу, спрямовані на виявлення причин виникнення обмінних коливань потужності і розробці нових методів та пристроїв, робота яких підвищить якість виробленої електроенергії і усуне повністю або зменшить до безпечного значення амплітуду обмінних коливань потужності завдяки завчасному моніторингу.

Актуальність теми. Важливу роль в інфраструктурі світової економіки, відіграє морський флот. Флот виконує транспортні, рибодобувні, військові, різні технологічні, науково-дослідні та інші завдання у всіх районах світу. Електротехнічний комплекс є найважливішим елементом будь-якого судна, від роботи якого залежить його життєдіяльність як автономного об'єкта. Для безпечної і економічно вигідної роботи судна необхідно забезпечити високу якість виробленої на ньому електричної енергії. Складність вирішення цього завдання пояснюється використанням багатогенераторних електростанцій і необхідністю забезпечення паралельної роботи джерел електричної енергії.

Мета і задачі досліджень. Метою роботи являється розробка заходів щодо моніторингу та обмеження обмінних коливань активної потужності між паралельно працюючими дизель-генераторними агрегатами

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі:

- аналіз особливостей експлуатаційних режимів суднових електроенергетичних установок змінного струму та засобів керування паралельною роботою дизель-генераторних агрегатів;
- аналіз і моделювання суднового електроенергетичного комплексу для дослідження обмінних коливань потужності і виявлення причин їх виникнення;
- розробка принципової електричної схеми приладу для моніторингу обмінних коливань активної потужності.

Об'єкт дослідження – дизель-генераторні агрегати.

Предмет дослідження – обмінні коливання активної потужності між паралельно працюючими дизель-генераторами.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених в роботі завдань використані основні положення теорій електричних кіл, електроприводу і автоматичного управління; відомі методи моделювання суднових електроенергетичних систем; програмне середовище MathLAB.

Наукова новизна отриманих результатів. У роботі отримані наступні наукові результати:

- визначені причини виникнення коливань потужності в судновому електро-технічному комплексі, основною з яких є нерівномірна подача палива в циліндри дизеля, що для виявлення ненормальної роботи паливної системи передбачає моніторинг амплітуди обмінних коливань потужності;

- розроблено пристрій для слідкування за амплітудою обмінних коливань потужності між паралельно працюючими дизель-генераторними агрегатами електроенергетичної системи та моніторингу стану паливної системи дизелів.

РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ЩОДО СУДНОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ТА ОБМІННИХ КОЛИВАНЬ ПОТУЖНОСТІ МІЖ ПАРАЛЕЛЬНО ПРАЦЮЮЧИМИ ГЕНЕРАТОРАМИ

1.1 Склад СЕЕС

Сучасні морські судна характеризуються високим ступенем електрифікації. Одна з основних тенденцій розвитку суднової електроенергетики є постійне зростання потужностей суднових електростанцій і встановленого електроустаткування. Поряд зі зростанням потужностей електростанцій ускладнилася їх структура, а також структура електричних мереж, підвищилися вимоги до надійності їх роботи, що призвело до широкого застосування систем захисту, контролю, регулювання та управління, виконаних з застосуванням засобів напівпровідникової і мікропроцесорної техніки. У зв'язку з цим сформувалося поняття про судновій електроенергетичній системі, що забезпечує виробництво та розподілення електричної енергії, значно змінилися умови, методи і засоби експлуатації суднових електроенергетичних систем, відповідно змінилися і функції персоналу, що займається їх технічним використанням і технічним обслуговуванням.

У відповідності зі специфікою виконуваних судами завдань вони мають різні габарити і форми, механізми і обладнання. Однак всім судам для їх роботи в автономному режимі необхідна електрична енергія, яка витрачається на перетворення в механічну, теплову і світлову енергію. Тому на борту судна обов'язково створюється електроенергетична система, якій називається сукупність суднових пристроїв, призначена для виробництва, перетворення, розподілу електроенергії та харчування нею суднових приймачів (споживачів).

СЕЕС складається з трьох основних частин: суднові електричні станції, силова електрична мережа і мережа приймачів. З цього визначення випливає, що СЕЕС складається з наступних елементів: джерел електричної енергії (генераторів електроенергії Г з їх приводними двигунами ПД), ліній електропередачі, головно-

го ГРЩ і вторинних РЩ електророзподільних щитів, перетворювачів електроенергії ПЕ, електророзподільної щита живлення з берега РЩЖБ.

Особливості побудови СЕЕС і режими її роботи тісно пов'язані з вимогами, визначеними споживачами електричної енергії. У якості джерел електричної енергії на судах застосовують генератори змінного і постійного струму з приводом від парових турбін або дизелів (рідше від газових турбін), а також акумуляторні батареї.

Лінії електропередачі в СЕЕС виконують зазвичай за допомогою кабелів або у вигляді шинопроводів. Електророзподільні щити служать для підключення ліній електропередачі. В якості перетворювачів електричної енергії використовують електромашинні агрегати, трансформатори, випрямлячі, інвертори та ін. Електророзподільний щит, до якого підключають джерела електричної енергії і силову електричну мережу, називають головним розподільчим щитом (ГРЩ). Сукупність джерел електричної енергії з їх ГРЩ називають судновою електричною станцією (СЕС). Сукупність ліній електропередачі з електророзподільними щитами називають електричною мережею. Структурні схеми СЕЕС залежать від призначення, архітектури і особливостей експлуатації судна, від типу його енергетичної установки та інших факторів. Найбільше застосування на судах знаходять автономні СЕЕС і в якості джерел електроенергії використовуються дизель-генератори.

Основними показниками СЕЕС є живучість і надійність, якість електроенергії, маса і габаритні розміри, будівельна вартість, експлуатаційні витрати, рівень автоматизації, рівень уніфікації та ін.

1.2 Характеристики системи регулювання швидкості і генератора в складі ДГА

Якість електроенергії на судні в статичних і динамічних режимах роботи генераторних агрегатів регламентується міжнародними конвенціями і стандартами, правилами класифікаційних товариств [26].

Основний нахил регулюючої характеристики – РХ (статизм) 3%. Діапазон зміни статизму плавним регулюванням нахилу РХ 2 ... 5% (не менше) - для забезпечення паралельної роботи ДГ з ДГ іншого типу з фіксованим нахилом РХ.

Нестабільність частоти обертання (не більше) при відносній навантаженні менше 25 і 25 ... 100% відповідно 1,5 і 1,0%. При миттєвому набиранні активного навантаження ДГ необхідно навантажувати ступенями відповідності зі стандартом ISO 8528/5 в залежності від ступеня форсування дизеля по середньому ефективному тиску.

Наприклад для ДГ, в складі якого чотиритактний дизель має $p_{me} = 11,0$ бар при набиранні 70% активного навантаження, як і при подальшому набиранні залишилися 30%, миттєва зміна частоти обертання дизеля не повинна перевищувати 8% від номінальної частоти обертання, а встановилася частота обертання після закінчення 5 секунд після накидання навантаження не повинна відрізнятися від частоти обертання попереднього режиму більш ніж на 5% від номінальної частоти обертання [2].

Для ДГ, в складі якого чотиритактний дизель має $p_{me} = 14,0$ бар, при миттєвому набиранні 50% активного навантаження, так само як і при подальшому набиранні решти 50%, миттєва зміна частоти обертання дизеля не повинно бути більше 10% від номінальної частоти обертання, а встановилася частота обертання через 5 секунд після накидання навантаження в цьому випадку не повинна відрізнятися від частоти обертання попереднього режиму більш ніж на 5% від номінальної частоти обертання.

При миттєвому скиданні 100% навантаження миттєва зміна частоти обертання не повинна перевищувати 10% від номінальної частоти обертання, а встановилася частота обертання після закінчення 5 секунд після скидання навантаження не буде відрізнятися від частоти обертання попереднього режиму більш ніж на 5% від номінальної частоти обертання.

Параметри при автоматичному розподілі активного навантаження під час паралельної роботи агрегатів і розподілі активного навантаження по РХ ДГ з нахилом 3% і суміщенням РХ паралельно працюючих агрегатів на одному режимі наступні:

- ступінь неузгодженості навантаження при співвідношенні номінальних потужностей дизелів (у складі ДГ) від 3:1 до 1:3 в діапазоні відносних навантажень 20 ... 100% не повинна перевищувати + 10% від номінальної активної потужності найбільш потужного паралельно працює ДГ.

- темп зміни настройки швидкості в діапазоні 95...105% номінальної частоти обертання при дистанційному управлінні дорівнює $(0,7 \pm 0,2)\%$ від номінальної частоти обертання в секунду.

- дистанційне керування частотою обертання забезпечується в межах 95 ...105% від номінальної.

Синхронний генератор змінного струму для установки на судах необмеженого району плавання (в складі ДГ), призначений для роботи в якості джерела електроенергії трифазного змінного струму, забезпечує надійну роботу при:

- температурі навколишнього середовища $-10 \dots +45^{\circ} \text{C}$; в разі її підвищення до 50°C потужність генератора повинна бути знижена на 5%;

- відносної вологості повітря (75 ± 3) і $(95 \pm 3)\%$ при температурі відповідно (45 ± 2) і $(25 \pm 2)^{\circ} \text{C}$ (верхнє значення 98% при 35°C);

- тривалому крені до 22,5% і диференті до 10° , а також при одночасному крені і диференті;

- бортовий хитавиці до $22,5^{\circ}$ з періодом 7 ... 9 з і кильової хитавиці до 10° від вертикалі;

- вібрації з частотою 5 ... 80 Гц з амплітудою 1 мм - для частот 5 ... 13,2 Гц, з прискоренням 7 м/с^2 (0,7g) при частотах 13,2 ... 80 Гц;

- ударах із прискоренням 30 м/с^2 (3g) при частоті 40 ... 80 ударів/хв.;

- епізодичних короткочасних струси з інтенсивністю, еквівалентної статичному навантаженні до 15g в вертикальному напрямку і до 5g в горизонтальному.

Коефіцієнт потужності генератора ($\cos \varphi$) дорівнює 0,8, з'єднання фаз - зірка з виведеною нульовою точкою.

Генератор, що працює в сталому номінальному режимі, повинен допускати такі перевантаження по струму статора, %:

- 10 протягом 1 год при $\cos \varphi = 0,8$;

- 25 протягом 10 хв при $\cos\varphi = 0,7$;
- 50 протягом 2 хв при $\cos\varphi = 0,6$.

При цьому точність підтримки напруги $\pm 10\%$ від номінальної напруги. Сумарний час роботи в режимах перевантаження не більше 10% від ресурсу. Режим роботи генератора тривалий. Він повинен допускати тривалу роботу за несиметричного навантаження фаз, якщо струми в фазах не перевищують номінального і різницю струмів (небаланс) в фазах не більше $\pm 20\%$. При цьому коефіцієнт небалансу напруги не повинен перевищувати 5% .

Генератор (в складі ДГ) в режимі холостого ходу повинен забезпечувати пуск прямим включенням асинхронного коротко замкнутого двигуна (потужність до 40% від номінальної потужності генератора) з приєднаним маховим моментом інерції GD^2 включається двигуна.

Генератор повинен допускати включення на паралельну роботу методом самосинхронізації. При цьому методі синхронізації проводиться підгонка частоти і напруги підключається ДГ з працюючим ДГ до загальних шин, гаситься поле збудження підключається генератора. Одночасно з підключенням ДГ до шин ГРЩ (головного розподільного щита) суднової електростанції знімається гасіння поля збудження. Частота обертання підключається ДГ повинна бути над синхронною, щоб уникнути неприпустимою величини зворотної потужності підключається генератора, що призведе до спрацьовування захисту генератора і його відмови у доступі до загальних шин (розвалу паралельної роботи) [2].

Метод синхронізації при включенні ДГ на паралельну роботу дуже зручний (при автоматизації операцій) тим, що можна до синхронізації вивести ДГ на необхідні обороти холостого ходу по заданій РХ (шляхом фіксації цієї частоти обертання кінцевим вимикачем регулятора швидкості або за допомогою пуску ДГ при вже фіксованій настройці верхньої опори пружини вимірювача швидкості регулятора дизеля). Це автоматично забезпечує розподіл активного навантаження між паралельно працюючими ДГ.

Найбільш поширений метод точної синхронізації при включенні ДГ на паралельну роботу (рівність частот обертання і напруги, узгодженість фаз, нульова

огиає напруги) призводить до того, що після підключення ДГ до загальних шин його активна потужність буде близька до нульової величини і, щоб розподілити рівномірно навантаження між працюючими ДГ в паралель, необхідні спеціальні автоматичні пристрої, які впливають на серводвигун регулятора швидкості ДГ, підключеного до загальних шин (або розподіл активної навантаження між ДГ вручну або дистанційними кнопками "більше" - "менше").

Генератор повинен допускати тривалу роботу на тиристорну навантаження до 50% від потужності генератора. Коефіцієнт спотворення синусоїдальної кривої лінійної напруги при холостому ході і номінальній напрузі генератора не більше 5%.

Генератор, включаючи систему регулювання напруги, витримує без будь-яких ушкоджень трифазне коротке замикання в режимі будь-якого навантаження протягом 5 с, одно- і двофазне коротке замикання протягом 2 с. Співвідношення ударного струму короткого замикання генератора до номінального не перевищує 15 %. Значення усталеного струму короткого замикання генератора не менше трикратного номінального струму. Після припинення короткого замикання номінальну напругу зі сталим відхиленням напруги $\pm 2,5\%$ відновлюється за час не більше 0,8 с. При цьому величина сплеску напруги не перевищує 20% від номінального. Генератор має безщиткову систему збудження з пристроєм управління і регулювання. Початкове самозбудження генератора відбувається без застосування стороннього джерела при частоті обертання 90% від номінальної.

Система автоматичного регулювання напруги (АРН) забезпечує:

- усталене відхилення напруги не більше 2% при незмінному положенні органів уставки, плавній зміні навантаження від 0 до 100% від номінальної, коефіцієнті потужності ($\cos \varphi$) 0,6 ... 0,9 з урахуванням зміни теплового стану від холодного до усталеного прогрітого і зміні частоти обертання від 95 до 105% номінальної;

- миттєве відхилення напруги генератора при набиранні і скиданні 60% навантаження по струму з $\cos \varphi = 0,4$ і менше (при номінальній частоті обертання) не більше -15 і + 20% відповідно; час відновлення напруги генератора з відхиленням $\pm 3\%$ від номінального значення - не більше 1,5 с;

- зміна уставки автоматично регульованого напруги не менше $\pm 5\%$ від номінального з відхиленням 1% при будь-якому навантаженні;
- плавну зміну статичної характеристики регулювання напруги в діапазоні $0 \dots 5\%$ (для забезпечення точності розподілу реактивних навантажень між паралельно працюючими ДГ, в тому числі різних типів);
- нерівномірність розподілу реактивної навантаження при роботі з статизмом не більше $+ 10\%$ від номінальної реактивної потужності більшого з паралельно працюючих ДГ (співвідношення їх потужностей від $1:3$ до $3:1$, використовувані в складі однієї суднової електростанції генератори мають аналогічні системи збудження по точності регулювання і швидкодії, однаковий статизм напруги по реактивної потужності).

Генератор без пошкоджень і залишкових деформацій витримує підвищення частоти обертання на 20% понад номінальну протягом 2 хв.

Зниження частоти обертання нижче 85% від номінальної не викликає виходу з ладу елементів системи збудження і АРН.

Допустимий рівень індустріальних радіоперешкод, створюваний генератором, не повинен перевищувати рівень напруги перешкод, допустимих для пристроїв, розташованих вище головної палуби судна.

Всі вищенаведені показники є мінімальними і, тому, фактичні показники якості електроенергії, що виробляється на судні, можуть бути поліпшені, якщо є на те підстави і необхідність. Існують також вимоги по часу загасання перехідного процесу, статичної помилку, надійність дії системи, простоті і зручності обслуговування, масою і габаритами. Така велика кількість вимог і критеріїв, які часто суперечать один одному, істотно ускладнюють вирішення завдання регулювання частоти напруги суднової мережі.

1.3 Автоматичні регулятори частоти обертання

Автоматичні регулятори частоти обертання прийнято класифікувати наступним чином [1,3]:

- по здійснюваному закону регулювання, тобто основний залежності переміщення паливної рейки від зміни частоти обертання двигуна - пропорційні, інтегральні, пропорційно - інтегральні, пропорційно - диференціальні, пропорційно - інтегрально - диференціальні;

- за призначенням і режимності роботи - однорежимні, двохранжимні, всережимними, граничні;

- по виду регуляторної характеристики - статичні, астатичні;

- по типу вимірювальної частини регулятора - механічні, гідравлічні, електричні;

- за джерелом енергії для вихідного сигналу, що переміщує паливну рейку

- прямого, непрямого дії (гідравлічними, пневматичними, електричними, комбінованими);

- за типом зворотного зв'язку - з жорсткими і гнучкими зворотними зв'язками;

- за кількістю поданих вхідних сигналів - одноімпульсні і двоімпульсні.

Для регулювання частоти обертання дизелів на судах широко застосовуються двоімпульсні регулятори (Р-23 (Б), УРЧН, ПРЧ1-М). У всіх них використовується метод ведучого генератора для підтримки частоти напруги суднової мережі.

У двоімпульсних регуляторах частоти обертання Р-23Б використовується гідравлічний регулятор Вудварта з жорсткою негативним зворотним зв'язком по частоті обертання дизеля. З плином часу зношується пружина відцентрового датчика швидкості, в результаті релаксації металу жорсткість її зменшується на 20%. Якість роботи регулятора сильно залежить від якості масла і стану поверхонь, що труться в гідроциліндрах. Внаслідок цього змінюються характеристики самого регулятора так, що виникають автоколивання частоти обертання дизеля в перехідних процесах [5,12].

САР частоти на базі Р-23 працює при незмінних лінійних напруженнях. При відключенні зворотного зв'язку, а також при малих значеннях коефіцієнта зворотного зв'язку, система працює нестабільно. "При асиметрії навантаження по фазах статична похибка по частоті досягає 0,3%. Залежність ходу рейки паливного насо-

са від навантаження нелінійна і це викликає статичну похибка 0,7%. Сумарна статична похибка з регулювання частоти може досягати 1%" [11,12] .

У двохімпульсних регуляторах частоти з пристроєм вимірювання навантаження у вигляді фільтра струму прямої послідовності, форма вихідного сигналу, який подається на обмотку електромагніту гідравлічного сервоприводу рейки паливного насоса, і його середнє значення залежать від навантаження. Однак, пульсації магнітного потоку через спотворення форми сигналу можуть викликати брязкіт якоря електромагніту сервоприводу. Це призводить до коливань частоти обертання генератора, особливо при різкій зміні навантаження. САР частоти напруги статична. Помилка регулювання частоти обертання дизеля в статичному режимі не нульова [11,12]. Наявність магнітного підсилювача в двохімпульсних електричних регуляторах частоти є причиною виникнення автоколивань. Прилад автоматичної стабілізації частоти типу ПРЧ-1М є статичний імпульсний регулятор частоти обертання дизеля. У ньому є трансформаторний формувач сигналу биття. Фільтр, що виділяє з сигналу биття огибаючу, зміщує по фазі огибаючу і не дає їй опуститися до нуля. Через це виникає значна статична помилка регулювання частоти напруги, особливо при роботі в паралель різнотипних генераторів. Д-ланка в складі ПРЧ-1М чутливе до перешкод.

У регуляторі РЧМ-50, що використовується для управління провідним генератором, міститься І-ланка по частоті. Перехідний процес при регулюванні частоти обертання залежить від значення електричного навантаження, типу і параметрів СГ. Для збільшення швидкодії регулятора в нього введено ПД-ланка, щоб компенсувати інерційність приводного двигуна. САР частоти може задовільно працювати тільки для дизелів без турбіни.

1.4 Системи автоматичного регулювання напруги

За принципом дії всі системи автоматичного регулювання напруги ділять на наступні типи [1,13,14,18,19,29]:

- системи, що діють по обуренню - току навантаження генератора I_T : системи струмового компаундування, у яких струм I_B визначається U_T, I_T , тобто $I_B = f(U_T, I_T)$; системи фазового компаундування, у яких струм I_B визначається $U_T, I_T, \cos \varphi$, тобто $I_B = f(U_T, I_T, \cos \varphi)$.

- системи, що діють по відхиленню регульованої величини (U_T), у яких струм $I_B = f(U_T, \Delta U)$ де, $\Delta U = U_T - U_{T.H.}$

- комбіновані системи, що діють одночасно по обуренню і відхиленню. За способом впливу на обмотку збудження генератора всі системи ділять на: системи прямого регулювання і системи непрямого регулювання.

У системах регулювання напруги і реактивної навантаження УБК-М, для генераторів серії МСС, застосовуються трансформатори фазового компаундування і магнітні підсилювачі. Вони вносять істотні нелінійності і запізнювання в роботу САУ напругою [11,12,13,14], що призводить до виникнення автоколивань в судновій мережі. В УБК-М наявність збудника зменшує швидкодію регулювання і надійність САУ в цілому. Система статична, що призводить до статичної помилки з регулювання напруги генератора. Залежність вихідного струму трансформатора компаундування від напруги генератора нелінійна.

Регулятори збудження генераторів серії МСС статичні. Статична похибка по напрузі 2,5% [11,12].

В системі самозбудження та автоматичного регулювання напруги генераторів електромеханічного заводу ім. М.І. Калініна, як елемент порівняння фактичного напруги генератора з заданим, застосовується стабілітрон. Вольт-амперна характеристика стабілітрона сильно залежить від температури, що обумовлює статичну помилку регулювання напруги понад 1%.

Системи збудження і автоматичного регулювання напруги TUR/A у генераторів серії ГМС статичні з регулювання напруги і реактивної потужності. Крім того, в TUR/A які не виробляються імпульси регулювання по струму, тому, при КЗ струм збудження зменшується ще до спрацьовування захисту, що ускладнює його настройку. Досвід експлуатації показує, що при виготовленні регулятора неправильно обраний тепловий режим елементів [11,12].

Система збудження і автоматичного регулювання напруги безщіткових генераторів серії 2СН статична з регулювання струму і напруги генератора. Система збудження і автоматичного регулювання напруги безщіткових генераторів серії СБГ 1600 статична з регулювання реактивного струму генератора. У блоці регуляторів встановлений магнітний підсилювач, який вносить нелінійні спотворення і викликає автоколивання при регулюванні напруги.

1.5 Паралельна робота генераторних агрегатів. Переваги та недоліки паралельної роботи

Основним режимом роботи для генераторних агрегатів є їх паралельна робота на загальні шини головного розподільного щита. Для включення синхронних генераторів на паралельну роботу необхідно виконання наступних умов:

1. форми кривих миттєвих напруг генераторів повинні бути однаковими;
2. дійсні значення напруг повинні бути рівні;
3. напруження повинні збігатися по фазі;
4. частоти повинні бути однаковими;
5. порядок чергування фаз у генераторів повинен бути один і той же.

Паралельна робота генераторних агрегатів дає наступні переваги: раціональне використання електроенергії, що виробляється, забезпечення надійності електростанції, роботи агрегатів з найвищими коефіцієнтами корисної дії і можливості ремонту окремих агрегатів, економію палива і ресурсу агрегатів.

Основними недоліками паралельної роботи генераторних агрегатів є збільшення струмів короткого замикання і відповідне підвищення вимог до розривної здатності комутаційної і захисної апаратури розміщеної на ГРЩ, проте найважливіше стає необхідність вирішення завдань, пов'язаних із забезпеченням відповідного розподілу навантаження між генераторами і стійкості їх роботи.

Забезпечення якісної паралельної роботи генераторних агрегатів змінного струму являє собою досить складну задачу, перш за все через необхідність розподілу між ними активної і реактивної потужностей [6,7,8,9,25]. Точність розподілу

активної і реактивної потужностей при паралельній роботі суднових дизель-генераторних агрегатів необхідна в першу чергу для стійкої роботи електростанції [2,16,20,23,30,31]. Кожен дизель-генераторний агрегат має в своєму складі регулятор частоти обертання дизеля і регулятор напруги генератора, впливаючи на які вручну, або за допомогою систем автоматичного управління домагаються рівномірного розподілу потужностей. Однак, не дивлячись на безліч систем автоматики, якість електроенергії, вироблюваної судновими електростанціями, а значить, точність і стабільність розподілу потужностей при паралельній роботі дизель-генераторних агрегатів не завжди можна вважати навіть задовільними, особливо в разі багатогенераторних електростанцій. В результаті навіть на судах з класом автоматизації А1 при деяких перехідних режимах мають місце випадки повного знеструмлення, а на судах з меншим класом автоматизації спостерігаються проблеми і в сталих режимах роботи суднової електростанції.

1.6 Розподіл активного навантаження

Після підключення генератора на паралельну роботу його навантаження дорівнює нулю. Розподіл активного навантаження між паралельно працюючими синхронними генераторами проводиться регулюванням крутного моменту на валу генератора. При зміні крутного моменту ротор генератора зміщується щодо статора, що визначає величину активної потужності генератора. Зміна крутного моменту виробляється регулюванням подачі палива в приводний двигун за допомогою серводвигуна регулятора швидкості обертання. Рівномірність розподілу залежить від нахилу (статизму) характеристик (рис. 1.1) [1, 24].

Нехай для двох приводних двигунів окремо були зняті регуляторні характеристики 1 і 2. Після включення генераторів на паралельну роботу їх кутові швидкості повинні бути однакові і рівні номінальній кутовій швидкості $\omega_{\text{ном}}$. Як впливає з рис. 1.3, однаковою кутовою швидкістю $\omega_{\text{ном}}$ відповідають різні значення активної потужності генераторів P_1 і P_2 , характеристики з меншим нахилом відповідає велика активне навантаження генератора. Таким чином, при однаковій (номі-

нальної) частоті обертання $\omega_{\text{ном}}$ активне навантаження першого генератора становить P_1 , а другого - P_2 , причому $P_1 > P_2$.

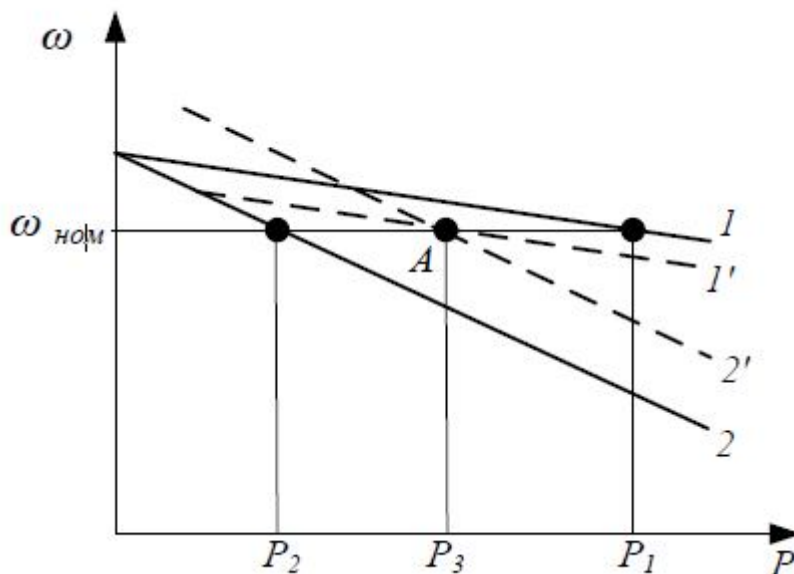


Рисунок 1.1 - Регуляторні характеристики приводних двигунів СГ при розподілі активних навантажень

Для розподілу активного навантаження і одночасного підтримки частоти генераторів необхідно збільшити подачу палива на ГА, що має менше навантаження, і одночасно зменшити подачу палива на ГА більшим навантаженням. Тоді регуляторні характеристики перемістяться паралельно самим собі: характеристика 2 другого ГА вгору, а характеристика 1 першого ГА вниз. Зміна подачі палива слід припинити в момент перетину характеристик в точці А. Кожен генератор буде навантажений однаковою потужністю: $P_3 = (P_1 + P_2) / 2$.

Важливою особливістю систем автоматичного розподілу активного навантаження є виділення так званого базового генератора, у якого виключають вплив серводвигуна на паливну рейку дизеля. З цієї причини положення регуляторної характеристики базового генератора не змінюється. Виділення базового генератора пов'язано з тим, що без нього частота системи з декількох паралельно працюючих СГ стає невизначеною і довільно змінюється в обидві сторони від номінальної. Перехідний процес стає коливальним, а робота системи розподілу навантаження - нестійкою. По відношенню до базового інші генератори є веденими.

При автоматичному розподілі активного навантаження (рис. 1.2 а) використовують датчики активного струму $B1$ і $B2$, що підключаються до генераторам через трансформатори напруги $TV1$ і $TV2$ і трансформатори струму $TA1$ і $TA2$. Виходи цих датчиків з'єднані послідовно, а напруги на виходах спрямовані зустрічно. Такий спосіб з'єднання виходів називають диференціальною схемою.

Результуючий сигнал у вигляді напруги певного значення і полярності надходить на вхід підсилювача $A2$, на вихід якого підключений серводвигун $M2$ приводного двигуна підлаштовуючого генератора $G2$.

Серводвигун $M1$ приводного двигуна базового генератора $G1$ не пов'язаний з підсилювачем $A2$, що виключає вплив на нього з боку системи автоматичного розподілу активних навантажень.

У початковому стані базовий $G1$ і підбудовується $G2$ генератори навантажені кожен потужністю P_1 , тому загальне навантаження становить $2P_1$. Цьому стану відповідає точка A (рис. 1.2 б).

При збільшенні загального навантаження до значення $(P_2 + P_3)$ кутова швидкість обох генераторів зменшиться до ω_2 і навантаження базового генератора складе P_2 , підлаштовуючого - P_3 .

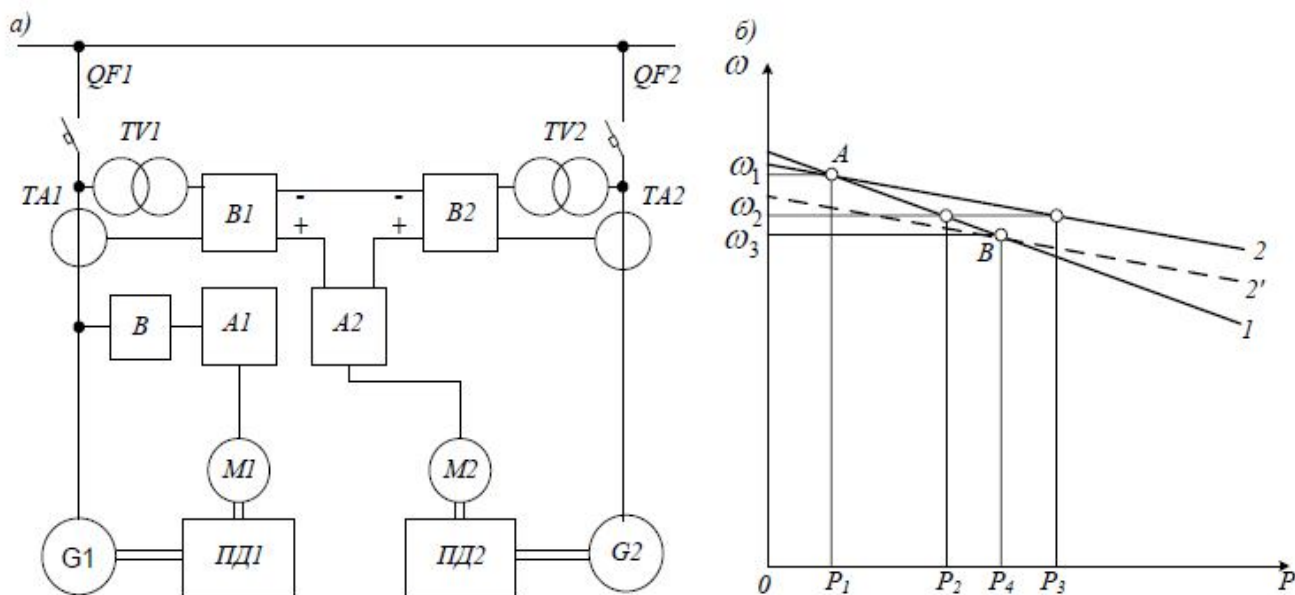


Рисунок 1.2 - Система автоматичного розподілу активних навантажень СГ:

а - структурна схема; б - регуляторні характеристики приводних двигунів СГ

Рівновага між напруженнями на виходах датчиків $B1$ і $B2$ порушиться, тому серводвигун $M2$ почне зменшувати подачу палива дизеля $ПД2$. Регуляторна характеристика 2 підлаштовуючого генератора переміститься вниз і займе положення характеристики 2'. Новий стан рівноваги настане в точці В перетину характеристик 1 і 2'. При цьому положення регуляторної характеристики базового генератора не змінилося. Кожен генератор навантажений однаковою потужністю:

$$P_4 = (P_2 + P_3) / 2.$$

Кутова швидкість обох генераторів також однакова і становить ω_3 . Наявність люфтів регуляторів частоти обертання ПД генераторів призводить до того, що навантаження паралельно працюючих генераторів розподіляються з деякою погрішністю P , значення якої не повинно перевищувати $\pm 10\%$ номінальної активної потужності найбільшого генератора.

Недоліком розглянутої схеми автоматичного розподілу активного навантаження є зміна частоти обертання СГ при зміні навантаження. При паралельній роботі генераторних агрегатів ідеальний розподіл активного навантаження можна створити тільки в разі збігу їх регуляторних характеристик, однак домогтися цього, не дивлячись на різноманіття регуляторів частоти обертання, практично неможливо. Це пов'язано з тим, що жорсткості пружин одностипних регуляторів різні, відрізняються характеристики паливної апаратури і, найголовніше, кожен регулятор має зазор, в межах якого частота може довільним чином відхилятися від заданої, нелінійними виявляються і характеристики інших елементів системи автоматичного регулювання частоти обертання, в тому числі через люфтів, механічного зносу дотичних частин і технологічної різниці параметрів [3].

1.7 Обмінні коливання потужності

У вимогах класифікаційних товариств, морських конвенцій, міжнародного стандарту ISO 8528 відсутні вимоги щодо забезпечення показників якості паралельної роботи дизель-електричних агрегатів змінного струму. Однак, як показує досвід експлуатації сучасних морських суден, крім загальної вимоги про те, що

паралельно працюють агрегати не повинні випадати із синхронізму, необхідні критерії або норми якості роботи в паралель. Це пов'язано з тим, що проблема забезпечення стійкої паралельної роботи має високу ступінь складності через існування обмінних коливань потужності ("перетікання потужності") між паралельно працюючими дизель-генераторними агрегатами змінного струму.

Обмінні коливання потужності - це явище своєрідного переходу потужності від одного ДГ до іншого з частотою, вимірюваної кількома герцами. Осцилограма зміни активної потужності кожного з двох паралельно працюючих ДГ є приблизно синусоїдальні криві цього зміни з дзеркальним характером, тобто максимуму потужності одного ДГ в даний момент часу відповідає мінімум потужності іншого ДГ (і навпаки) [2,5].

Зовні ці коливання супроводжуються коливаннями сили струму і напруги генераторів, що можна побачити і за приладами; ланок регуляторів швидкості дизелів; рейок паливних насосів (з великою амплітудою - аж до коливань від упору до упору), які різко негативно впливають на працездатність агрегатів. У деяких випадках це є перешкодою до нормального функціонування суднової електростанції (величина перетікає потужності становить 100% і більше з частотою 2 ... 4 Гц і вище) [2].

Проблема існування обмінних коливань потужності між синхронними генераторами була виявлена дуже давно, але вона не вирішена і до сьогоднішнього дня.

Прикладом є одна із знятих ними осцилограм (рис. 1.3) паралельної роботи ДГ змінного струму потужністю 150 кВт, що працює паралельно з іншим ДГ на сумарною навантаженні 25% від номінальної.

На осцилограмі записані зміни активної потужності P одного ДГ, коливання h рейки паливного насоса і частоти обертання колінчастого вала дизеля n .

Амплітуда обмінних коливань потужності досягає 150 ... 180 кВт, а частота обмінних коливань становить 4,0 Гц (тобто ДГ кілька разів на секунду переходять в руховий режим роботи) з величиною зворотного потужності 100% від номіналь-

ної потужності ДГ. Коливання рейки паливного насоса складають близько 100% від ходу рейки від нульової подачі палива до подачі на навантаженні 110%.

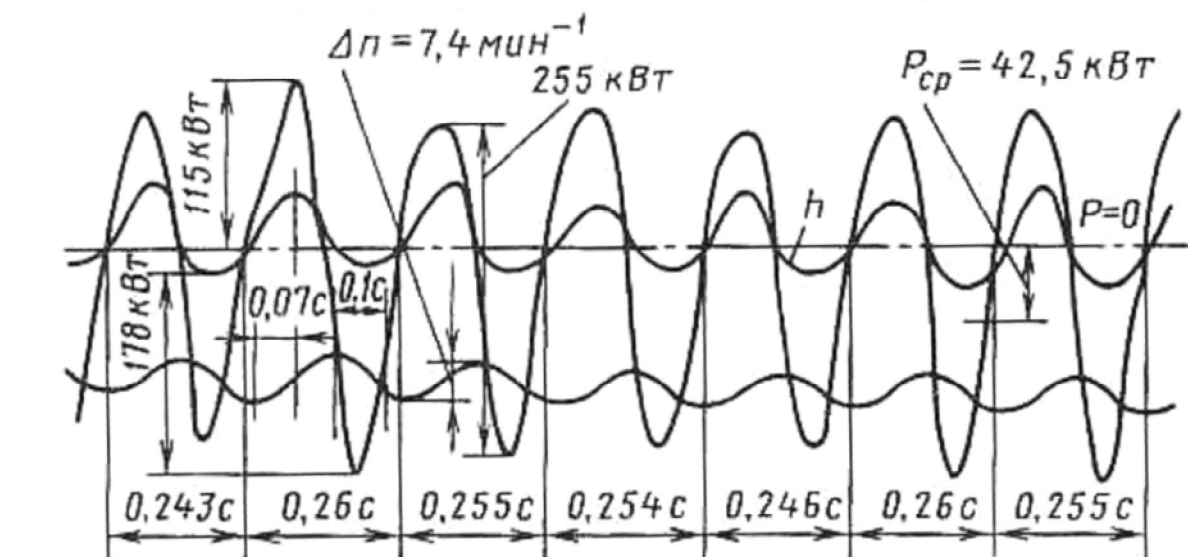


Рисунок 1.3 - Осцилограма паралельної роботи ДГ: $P_{\text{ср}}$ - середнє навантаження генератора; $P = 0$ - перехід генератора в руховий режим роботи; Δn - зміна частоти обертання дизеля; h - хід рейки паливного насоса дизеля

Стає очевидним неможливість нормальної паралельної роботи генераторних агрегатів і надійної роботи двигунів при такій амплітуді обмінних коливань.

Завдання зменшення амплітуди обмінних коливань потужності може бути вирішена проектантами провідних світових фірм в області конструювання суднових дизель-генераторних агрегатів і електростанцій тільки після глибокого і всебічного дослідження природи і причин їх виникнення і вирішуватися це завдання має, безумовно, ще на стадії проектування та розробки, а не по спуску суден на воду і здачі їх в експлуатацію. Також необхідно визначитися з допустимими критеріями обмінних коливань, так як необхідно знати до якого рівня їх потрібно знижувати.

Для формулювання критеріїв стійкості потрібно проаналізувати причини появи та існування обмінних коливань потужності між ДГ, що працюють в паралель, і розробити методи їх зниження до допустимої величини, оскільки повністю позбутися від обмінних коливань потужності неможливо. В даний час вчені, які проводять дослідження в даному напрямку, і фахівці, які експлуатують судові ене-

ргетичні установки та електростанції виділяють наступні завдання, що мають безпосереднє відношення до природи обмінних коливань [36]:

- аналіз вимушених коливань внаслідок обурюють моментів дизеля класичних гармонік, а також збурень, викликаних роботою паливної апаратури двигуна, і власних коливань системи паралельно працюють ДГ, щоб оцінити біля резонансний характер обмінних коливань і знайти технічні рішення для уникнення співпадання частот вимушених і власних коливань системи ДГ, що працюють в паралель;

- вплив системи регулювання швидкості на величину обмінних коливань (наприклад, при збігу частот коливань вимірювача швидкості регулятора і коливань системи ДГ, що може привести до автоколивання елементів регулятора, рейок паливних насосів і т.д.);

- вплив елементів синхронного генератора (система регулювання напруги, демпфірування і ін.) на розвиток або придушення обмінних коливань активної потужності;

- загальний аналіз стійкості системи паралельно працюють ДГ на основі оцінки амплітудно-фазових характеристик (АФХ) динамічних ланок системи (наприклад, на основі частотного критерію Найквіста);

- вибір конструктивних елементів складної структурної схеми паралельної роботи ДГ з оптимізацією величини обмінних коливань активної потужності між ДГ за рахунок ефективних технічних рішень.

Перша з перерахованих завдань зводиться насамперед до виявлення спектра сил, що обурюють дизеля і частоти власних коливань системи ДГ, що працюють в паралель.

Оскільки частота власних коливань системи паралельно працюють дизель-електричних агрегатів (з урахуванням впливу синхронної зв'язку між ними, величин моментів інерції махових мас ДГ) у сучасних ДГ (зі ступенем нерівномірності обертання $1/200 \dots 1/300$) знаходиться в межах $2 \dots 6$ Гц, то найбільший інтерес для чотиритактних дизелів викликають $1/2$ класична гармоніка вимушених коливань колінчастого вала дизеля ($n/120$ Гц, де n - частота обертання, хв^{-1}), пов'язана з проявом нестабільності роботи по циліндрах двигуна (наприклад, випадання одного цилінд-

ра) та існування сил, що обурюють зі спектром нижче частоти $1/2$ гармоніки, що може бути обумовлено ефектом роботи конкретної паливної апаратури дизелів [36].

Дослідження показують, що особливого значення для формування спектра сил, що обурюють низького порядку в дизелі ($n/240$, $n/360$, $n/480$) мають характер зміни залишкового тиску палива в трубопроводі високого тиску між ПНВТ і форсунках і відсічення подачі палива у всмоктувальну порожнину високого тиску, що залежать від конструктивних і гідродинамічних параметрів паливної апаратури, її частотних характеристик [2].

Нестабільність впрыскування палива від циклу до циклу і її вплив на характер і частоту обмінних коливань потужності між ДГ проілюстровані на рис. 1.4.

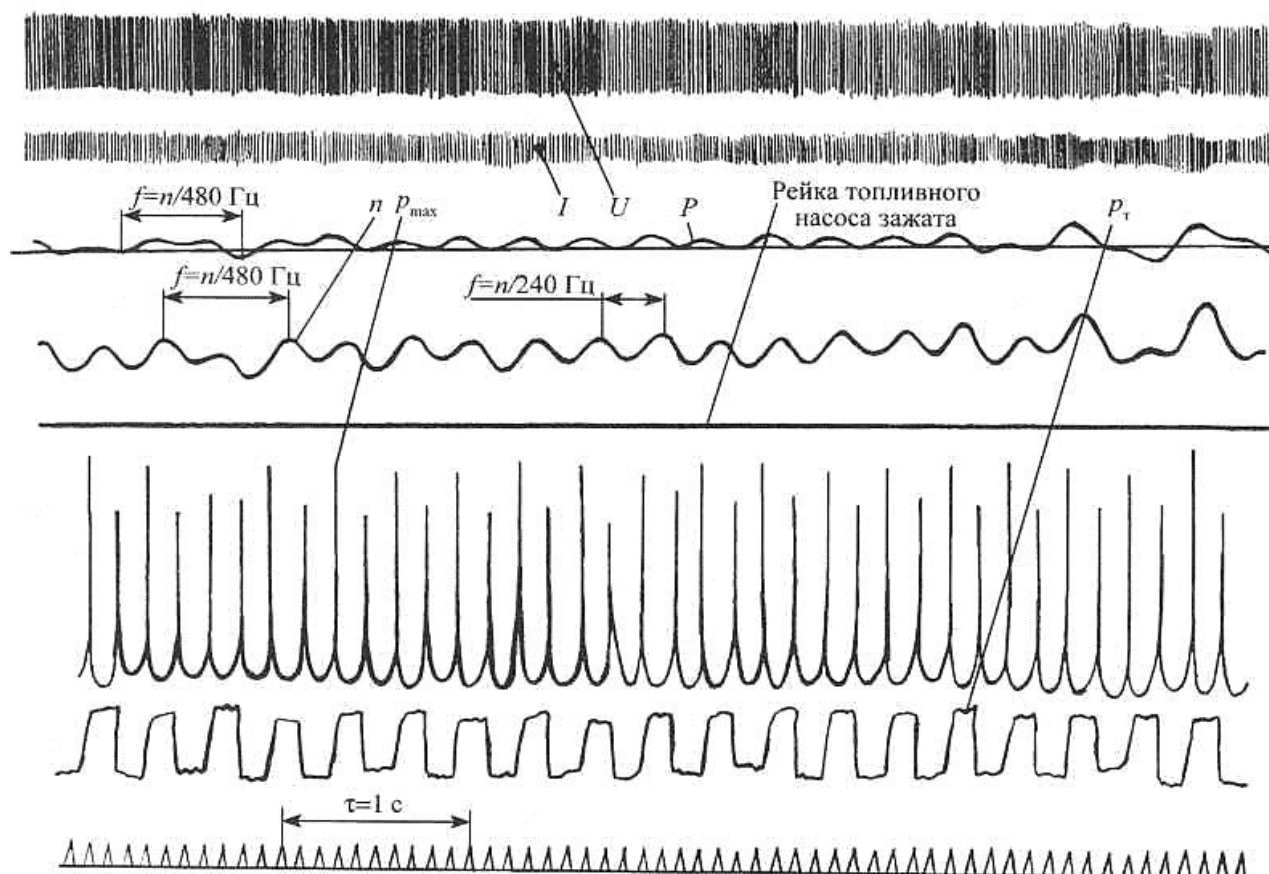


Рисунок 1.4 - Осцилограма паралельної роботи двох ДГ потужністю по 150 кВт (без використання системи регулювання швидкості): I , U - струм і напруга генератора; n - частота обертання; P - активна потужність; p_t - залишковий тиск палива в трубопроводі високого тиску; $P_{\max}$ - максимальний тиск згоряння;
 f - частота коливань

Тут записані зміни активної потужності P одного з ДГ залишковий тиск в трубопроводі високого тиску p_t , тиск в циліндрі $P_{\max}$, струм і напруга генератора, зміна частоти обертання колінчастого вала при роботі ДГ в паралель без навантаження з затиснутою рейкою паливного насоса (для виключення впливу регулятора швидкості) [2]. Коливання частоти обертання, обмінні коливання по частоті чітко слідують за коливаннями залишкового тиску палива і максимального тиску згоряння з частотою $n/240$ Гц (класична $1/2$ гармоніка збурень в чотиритактному дизелі має частоту $n/120$ Гц).

При відпущеній рейці паливного насоса на роботі ДГ позначається вплив системи регулювання швидкості дизеля, амплітуда обмінних коливань різко збільшується (рис. 1.5) [2].

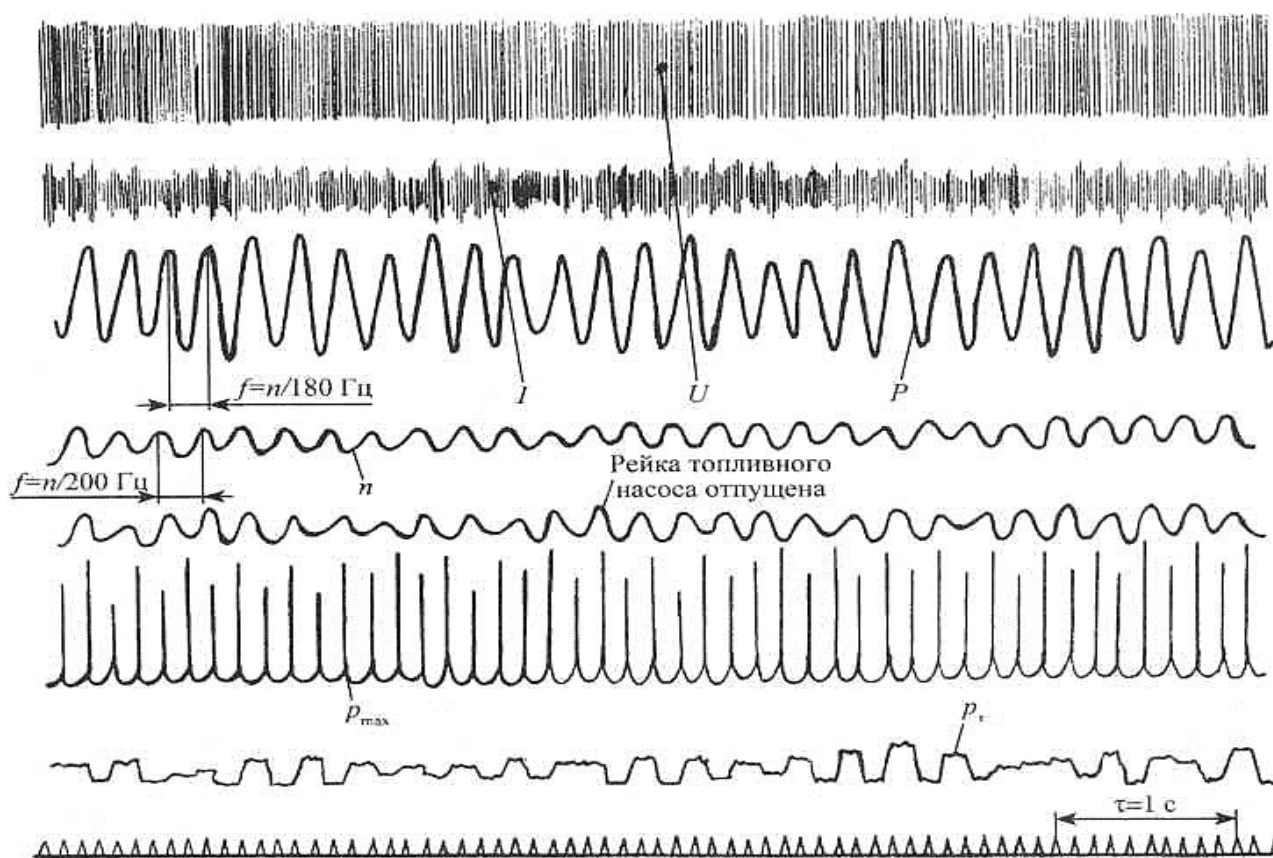


Рисунок 1.5 - Осцилограма паралельної роботи двох ДГ потужністю по 150 кВт (з включеною системою регулювання швидкості): I , U - струм і напруга генератора;

P - активна потужність; n - частота обертання; p_t - залишковий тиск палива в трубопроводі високого тиску; $P_{\max}$ - тиск в циліндрі дизеля

Дослідження показали, що паралельно працює агрегат можна вивести на резонансну зону роботи при зміні тільки частоти власних коливань системи ДГ (при зміні, наприклад, величини податливості електричної синхронної зв'язку) і отримати розвинені обмінні коливання з частотами, відповідними спектру сил, що обурюють низького порядку (нижче класичної частоти $1/2$ гармоніки). Це проілюстровано осцилограмою на рис. 1.6, де записана величина резонансних коливань активної потужності ДГ типу NVD26A фірми SKL $\pm 160\%$ від номінальної з розвалом паралельної роботи (випаданням ДГ із синхронізму).

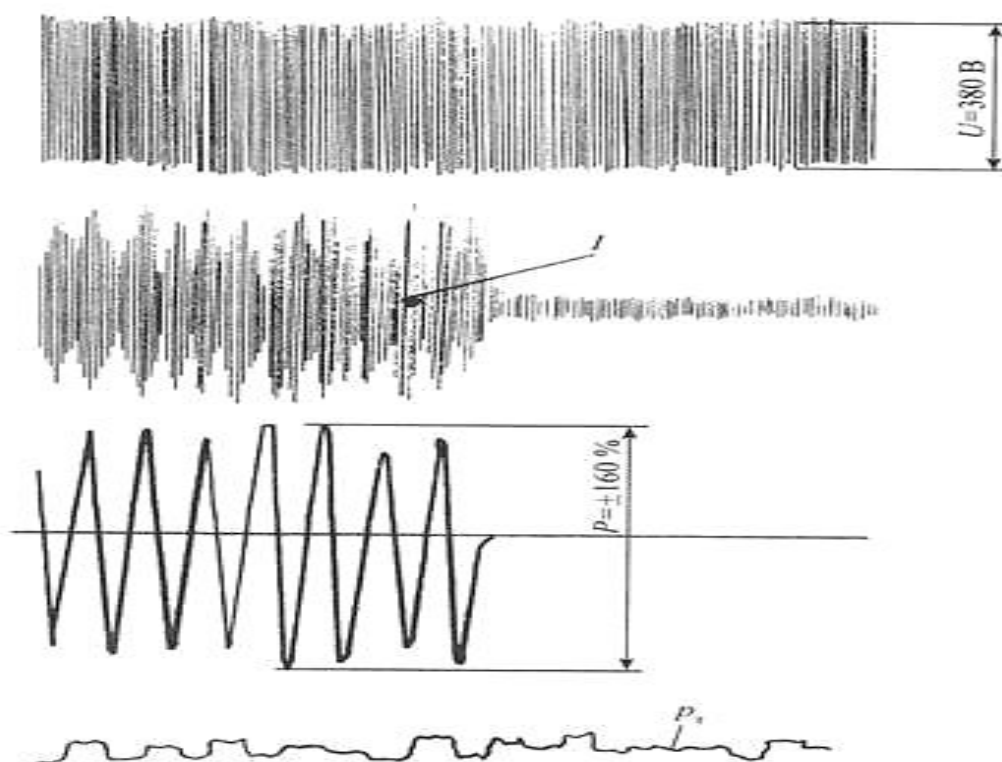


Рисунок 1.6 - Осцилограма паралельної роботи ДГ фірми SKL
(експериментальний висновок ДГ на резонансні коливання з випаданням ДГ із синхронізму): P - активна потужність ДГ; U, I - напруга і струм генератора;
 P_T - залишковий тиск в паливному трубопроводі

На рис. 1.7 показана характерна залежність величини обмінних коливань потужності ДГ від частоти коливань і $\cos \varphi$, тобто для різних режимів насичення генераторів потужністю 160 кВт на режимі 25% навантаження. Задавалася амплі-

туда коливань рейки паливного насоса дизеля величиною $\pm 12\%$ від ходу рейки. При збільшенні насичення генератора частота власних коливань системи ДГ зросла з 2,6 (що при такій зміні коефіцієнта потужності демпфірування генератора зменшується в 1,5 рази) [2].

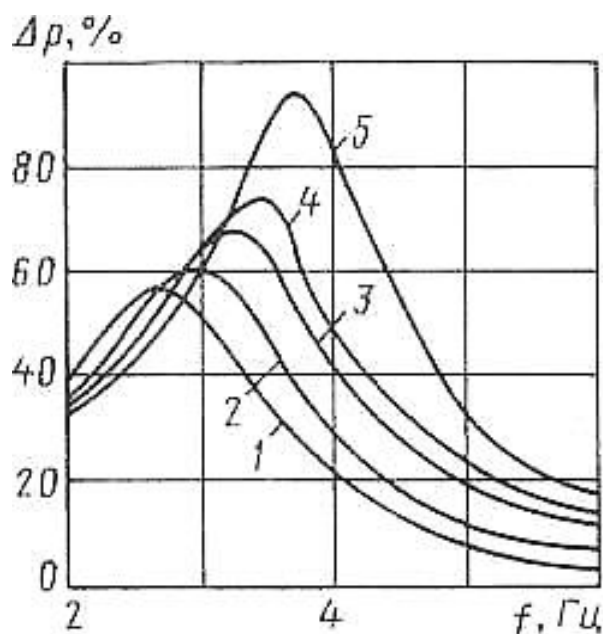


Рисунок 1.7 - Частотні характеристики генератора при паралельній роботі:

1 - $\cos \varphi_{\text{емк}} = 0,8$; 2 - $\cos \varphi_{\text{емк}} = 0,4$; 3 - $\cos \varphi = 1$; 4 - $\cos \varphi_{\text{інд}} \sim 0,8$; 5 - $\cos \varphi_{\text{інд}} = 0,4$
 відповідає ємкісному $\cos \varphi_{\text{емк}} = 0,4$) до 3,6 Гц (що відповідає індуктивному $\cos \varphi_{\text{інд}} = 0,4$).

На рис. 1.8 представлені частотні характеристики генератора при різних режимах роботи (генератор змінного струму має безщіткового систему збудження з пристроєм управління і регулювання, забезпечується самозбудження генератора без застосування стороннього джерела, генератор має поздовжньо-поперечну демпферну клітку) [2].

Порівняння характеру залежності зміни кута навантаження $\Delta\theta$ (θ - кут між магнітним полем статора і ротора) від частоти коливань при нормально функціонуючої штатної системі збудження і коректора напруги і при незалежному збудженні генератора, показує, що в першому випадку зміни кута навантаження $\Delta\theta$ і, отже, обмінні коливання потужності на всіх режимах менше, ніж у другому [2].

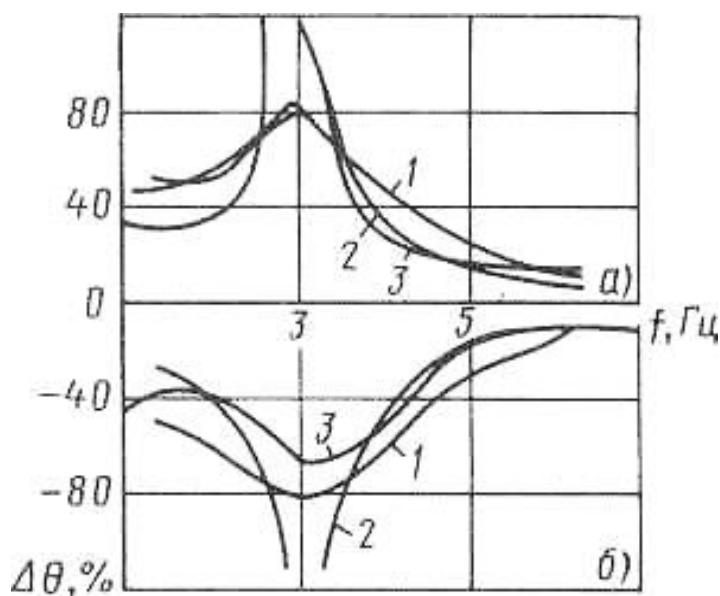


Рисунок 1.8 - Частотні характеристики генератора при різних навантаженнях: а - режим холостого ходу; б - режим 25% навантаження; 1-3 - генератори відповідно з незалежним збудженням, з розімкненою демпферною кліткою і з самозбудженням

Штатна система регулювання напруги при коливаннях створює додатковий демпфуючий момент. При збільшенні насичення генератора до певної межі система регулювання напруги обумовлює зростання тільки синхронізуючого моменту, так як приріст до демпфуючого моменту дорівнює нулю. При малому демпфуючому моменті генератора можуть виникати мимоволі значні обмінні коливання потужності (криві 2 на рис. 1.9).

У даній системі цього не спостерігається, так як генератор має демпферну клітку; система регулювання струму збудження може змінити коефіцієнт демпфірування на невелику величину. Значення демпферного клітини можна встановити аналізом частотних характеристик при паралельній роботі ДГ.

На рис. 1.19 наведені експериментальні частотні характеристики генератора зі штатною (замкнутої) поздовжньо-поперечною демпферною кліткою (крива 4) і з розімкненим поперечною кліткою (крива 2), а також теоретичні частотні характеристики для тих же випадків (відповідно криві 5 і 1) і, крім того, з демпферною кліткою, збільшеної в 3 рази (крива 5). Рисунок 1.9 показує, що при відсутності

демпфірування з боку генератора спостерігаються обмінні коливання потужності величиною $+100\%$, що виключає паралельну роботу ДГ. У той же час збільшення демпферного клітини в 3 рази в порівнянні зі штатною призводить лише до зростання амплітуди обмінних коливань з деяким зрушенням резонансної точки частотної характеристики в бік високих частот. Це підтверджує, що вибір коефіцієнта демпфірування повинен бути обумовлений і що використання штатної демпферної клітини генератора є ефективним засобом придушення обмінних коливань реального спектру частот [2].

Таким чином, синхронний генератор є динамічним ланкою системи паралельно працюють ДГ, від властивостей якого в значній мірі залежать якість паралельної роботи ДГ, амплітуда і характер прояву обмінних коливань потужності.

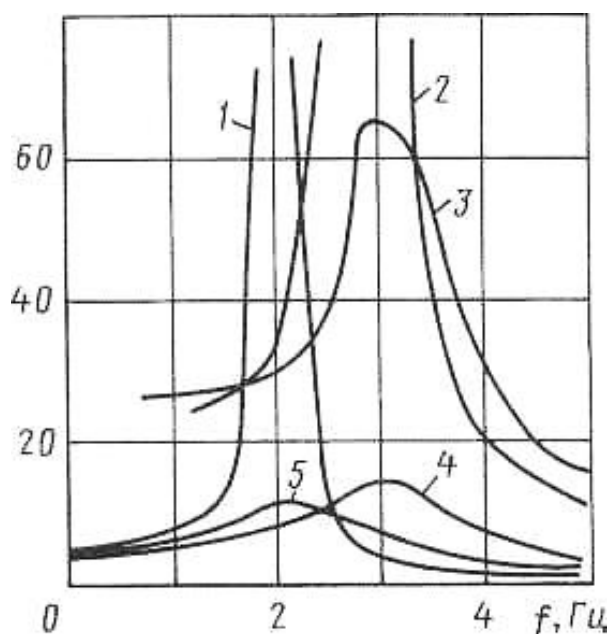


Рисунок 1.9 - Частотні характеристики генератора при паралельній роботі:

P - величина обмінних коливань потужності; f - частота коливань задає ланки з амплітудою $\pm 15\%$ від ходу рейки паливного насоса; 1 і 2 - відповідно теоретична і експериментальна частотні характеристики генератора з розімкненою поперечною кліткою; 3 - частотна характеристика генератора (теоретична) з демпферною кліткою, збільшеною в 3 рази; 4 і 5 - експериментальна і теоретична частотні характеристики генератора зі штатною (замкнутою) поперечною демпферною кліткою відповідно.

Для визначення факту стійкості роботи системи і умов такої роботи застосовуються алгебраїчні і частотні критерії стійкості. Частотний критерій Найквіста найбільш добре підходить для визначення стійкості та дослідження паралельно працюють ДГА в складі автономних електроенергетичних систем. Цей критерій особливо зручний при аналізі результатів проведених натурних експериментальних досліджень на діючих електроенергетичних системах або адекватних комп'ютерних моделях таких систем.

На рис. 1.10 побудована АФХ ДГ при паралельній роботі (показані коефіцієнти посилення динамічних ланок: регулятора, агрегату, ротора генератора) з $\cos \varphi = 1$ [2].

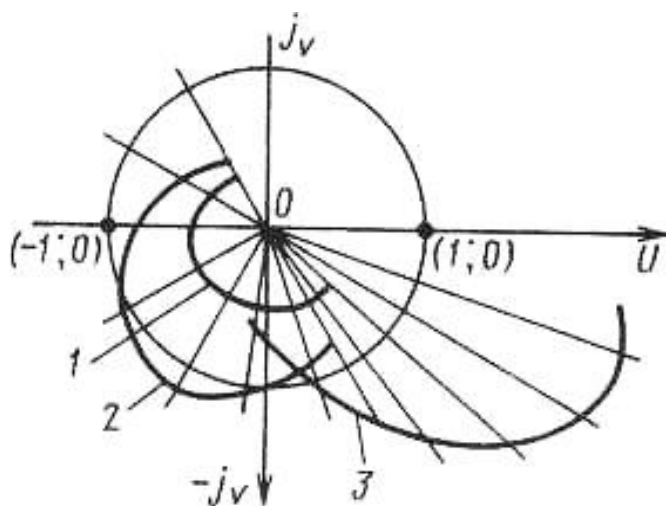


Рисунок 1.10 - АФХ ДГ при паралельній роботі на навантаженні 25% з $\cos \varphi = 1$;
1 - 3 - коефіцієнти посилення відповідно регулятора, агрегату і ротора

Застосування критерію Найквіста для оцінки стійкості полягає в з'ясуванні взаємного розташування АФХ і точки з координатами $(-1, j0)$. Так якщо АФХ не охоплюють точку з координатами $(-1, j0)$, то ланки і система в цілому знаходяться в динамічній рівновазі. Якщо АФХ охоплюють точку $(-1, j0)$, то система є нестійкою, частота власних коливань вимірювача швидкості регулятора близька до частоті власних коливань системи паралельно працюють ДГ. Така система схильна до автоколивань в контурі регулювання швидкості при роботі ДГ в паралель, що супроводжується великими обмінними коливаннями потужності [2].

Важливо, щоб коефіцієнт посилення системи $k_{\text{заг}}$ по АФХ не охоплював точку $(-1,0)$. Саме це має місце при паралельній роботі ДГ $\cos \varphi = 0,4$, коли величина обмінних коливань досягає граничного значення [36]. Наведені результати досліджень дають уявлення про природу обмінних коливань потужності при паралельній роботі дизель-генераторних агрегатів змінного струму і доводять необхідність визначення критерію стійкості паралельної роботи ДГ за величиною обмінних коливань активної потужності. Такий критерій визначить цілі і завдання для проєктантів суднових ДГ і суднових електростанцій, які будуть визначати їх дії по розробці необхідних методів і засобів для зниження обмінних коливань до допустимої величини.

Це можуть бути:

- зміна частоти власних коливань системи ДГ, які працюють паралель (наприклад, установка маховика дизеля з великим GD^2 , зміна величини синхронізуючого моменту);
 - виключення сил, що обурюють в дизелі низького порядку (зокрема, нестабільності уприскування палива від циклу до циклу шляхом оптимізації конструкції паливних насосів дизелів) для запобігання біля резонансних крутильних коливань системи ДГ;
 - зміна частоти власних коливань вимірювача швидкості регулятора (наприклад, маси відцентрових вантажів і жорсткості головної пружини);
 - введення або посилення демпфірування синхронного генератора.
- Слід зазначити, що в разі ретельного відпрацювання всіх елементів системи паралельно працюють ДГ і виключення сил, що обурюють в дизелі з частотою менше $1/2$ гармоніки, між ДГ завжди будуть проходити обмінні коливання потужності з основною частотою $1/2$ гармоніки, їх величина буде визначатися, головним чином, жорсткістю роботи дизелів; наближенням частоти власних коливань системи ДГ, що працюють в паралель, до частоти $1/2$ гармоніки сил, що обурюють дизеля; демпфуванням з боку генератора [2].

На підставі міжнародного досвіду проєктування і експлуатації ДГ змінного струму в якості критерію стійкості паралельної роботи сучасних суднових дизель-

електричних агрегатів можна було б прийняти величину обмінних коливань активної потужності $\pm (10...12,5)\%$ від номінальної потужності більшого з паралельно працюючих ДГ. Цей критерій може і повинен бути введений в міжнародний стандарт ISO 8528 через відповідний технічний комітет [2].

Очевидно, що рішення проблеми забезпечення стійкої і надійної паралельної роботи суднових дизель-генераторних агрегатів на основі синхронних генераторів шляхом усунення або зменшення до мінімуму амплітуди обмінних коливань потужності актуальна вже багато десятиліть. Вивчивши накопичену інформацію, технічний досвід і результати наукових досліджень по обмінним коливань потужності, ми бачимо, що рекомендації по їх зменшенню спрямовані на деякі конструктивні зміни дизель-генераторних агрегатів (в основному дизелів), що природно для фахівців механіків. Однак, не дивлячись на великий зібраний матеріал і здавалося б глибоке вивчення природи і причин обмінних коливань потужності, ми не знаходимо інформації про успішне впровадження новацій і усунення обмінних коливань. Чи не бачимо ми і конкретних методів, які б дали реальний ефект. Навпаки електромеханічна служба навіть суперсучасних судів з класом автоматизації А1 стикається з їх існуванням і негативними наслідками. Обмінні коливання потужності між паралельно працюючими агрегатами призводять до підвищеного зносу регуляторів частоти обертання, обмежують використання потужності генераторних агрегатів, викликають пульсацію напруги суднової мережі, зменшують коефіцієнт корисної дії механізмів, а також негативно позначаються на психофізичному стані екіпажу, знижують ефективність і надійність роботи систем автоматизації, можуть призвести навіть до випадання синхронного генератора із синхронізму, аж до знеструмлення судів, що являє ся аварійною ситуацією, а значить, несе загрозу життю людей, що знаходяться на борту судна, збереження вантажу і самого судна [22].

Провівши класифікацію систем автоматичного регулювання частоти і напруги, можна відзначити, що фізичні процеси вивчені досить глибоко, розроблено велику кількість систем [17], але мають місце значні труднощі у вирішенні поставлених завдань. Це пов'язано з безперервно зростаючою енергонасиченістю суд-

нових електростанцій і підвищенням вимог до них, а отже ті рішення, які були актуальні для 2-3 паралельно працюють дизель-генераторних агрегатів, виявляються незастосовні для судів на яких необхідна паралельна робота 4 - 5 і більше таких агрегатів, тобто для багатогенераторних суднових електростанцій. Існуючі системи розподілу активної і реактивної потужностей не виключають наявності обмінних коливань потужності при паралельній роботі навіть двох дизель-генераторних агрегатів, а якщо застосовувати їх в багатогенераторній судновій електроенергетичній системі, то вплив обмінних коливань потужності може прийняти непередбачуваний і неконтрольований характер.

Тому, беручи до уваги вищесказане, можна зробити висновок про те, що необхідно перейти на якісно новий рівень у вирішенні даних завдань, потрібне створення єдиної координуючої системи автоматичного управління, яка буде керувати регуляторами частоти і напруги всіх дизель-генераторних агрегатів з метою мінімізації рівня обмінних коливань потужності в усіх режимах роботи [3]. Така система буде побудована на мікропроцесорній базі, що дозволить компенсувати недоліки механічної та електричної частин, які неминуче збережуться [3,17,10,27,20]. Звичайно, в ідеалі було б добре виключити наявність обмінних коливань потужності, але на практиці існує ряд причин, внаслідок яких зробити це не вдається і тому необхідно зменшити їх амплітуду до регламентованих норм, а якщо можливо, то і нижче.

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ВПЛИВУ НЕРІВНОМІРНОСТІ ПОДАЧІ ПАЛИВА ДО ЦИЛІНДРІВ НА ОБМІННІ КОЛИВАННЯ АКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ МІЖ ГЕНЕРАТОРАМИ

2.1 Вільні коливання синхронного агрегату

Кожен синхронний агрегат, що розглядається з позицій аналітичної динаміки, може бути представлений у вигляді звичайної крутильної схеми, що складається з ряду дисків (маховиків) - акумуляторів кінетичної енергії, з'єднаних між собою пружними зв'язками, включаючи зв'язок між генератором і мережею. Наприклад на рис. 2.1 приведена крутильна схема дизель генератора ДГР 150/750 потужністю 150 кВт при швидкості обертання 750 об/хв. Вільні коливання таких механічних систем повністю визначаються рівняннями Лагранжа.

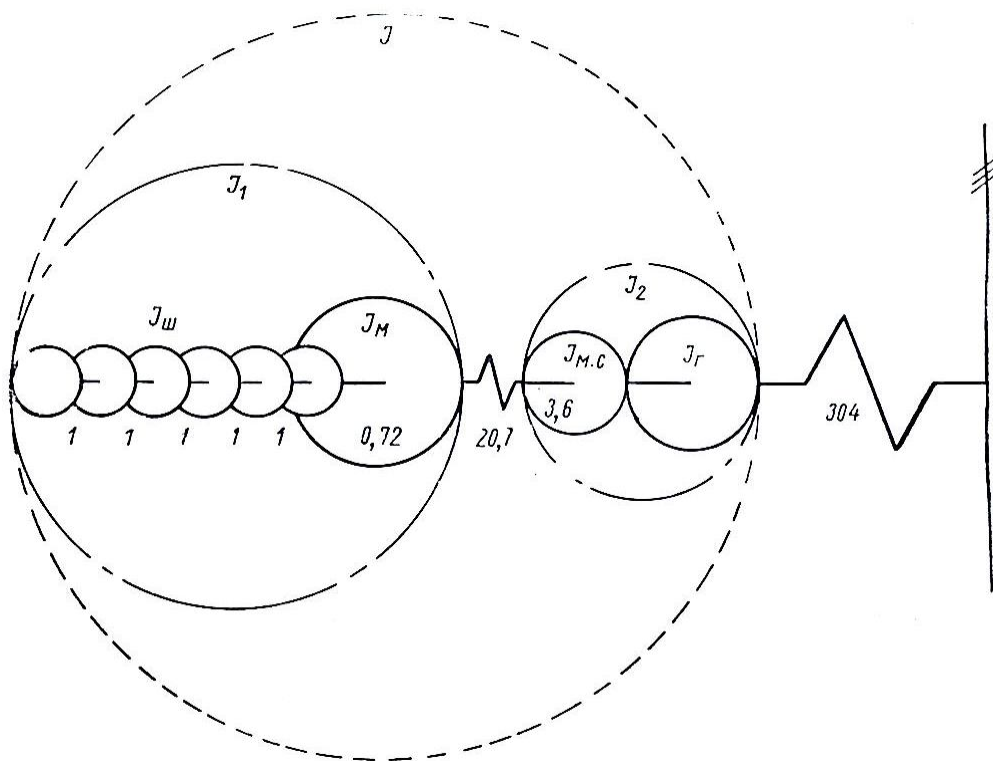


Рисунок 2.1 - Крутильна схема синхронного дизель-генератора ДГР 150/750, включеного на шини енергоємної мережі та уявлення її трьохмасовою (J_1 , $J_{м.з.}$, $J_Г$), двохмасовою (J_1 , J_2) і одномасової (J) схемами.

Схема представлена на рис. 2.1, відрізняється від відомих крутильних схем пружною зв'язком між ротором генератора і масою мережі, що мають нескінченно велику величину. Це пружна зв'язок характеризується синхронної жорсткістю генератора, яка залежить від режиму останнього.

Слід зазначити, що дослідження і розрахунок високочастотної крутильних коливань валів агрегатів виробляють, як правило, без урахування цієї синхронної жорсткості або визначає її за досить наближеним або емпіричними формулами.

Аналіз крутилися схем агрегатів показує, що пружні зв'язку в них мають різні значення. Лінія вала агрегату, включеного на мережу, складається з ділянок сталевго вала, гумових колодок, сполучної муфти і електромагнітного вала між мережею і ротором. Крутильна багатомасова схема синхронного агрегатом з метою визначення низьких частот вільних коливань може бути серед зведена до трьохмасової, двохмасової і одномасової системи, як показано на рис. 2.1 пунктиром.

У трьохмасовій схемі заміщення один момент інерції J_1 включає в себе моменти інерції всіх обертових мас двигуна разом з маховиком, інший $J_{м.ш.}$ є моментом інерції сполучної муфти і, нарешті, третій J_r - моментом інерції ротора генератора. Момент інерції маси мережі повинен бути прийнятий рівним нескінченно великою величиною. Крутильні жорсткості між масами являє собою жорсткість гумових колодок сполучної муфти, сталевго вала генератора і його синхронну жорсткість.

У двохмасовій схемі заміщення один з моментів інерції J_1 залишається тим самим: включає в себе момент інерції обертових частин двигуна разом з маховиком, а інший J_2 складається з моментів інерції сполучної муфти і ротора генератора. Відповідно обидві махові маси з'єднані пружною зв'язком, що визначаються жорсткістю гумових колодок, пружна зв'язок другий махової маси з мережею - синхронної жорсткістю генератора.

У найпростішій схемі заміщення одна маса, яка надається сумарним момент інерції агрегату, має пружний зв'язок з масою мережі, яка характеризується крутильною синхронною жорсткістю.

Для визначення моменту інерції, J_1 , $\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{сек}^2$,

$$J_1 = \sum_{k=1}^6 J_{\text{шк}} + J_{\text{м.з}} + J_{\Gamma}, \quad (2.1)$$

де $J_{\text{шк}}, J_{\text{м.з}}, J_{\Gamma}$ – моменти інерції еквівалентних махових мас агрегату: кривошипно-шатунного механізму; з'єднуючої муфти; ротора генератора.

Кругова частота коливань одномасової системи, ω , $\text{рад} \cdot \text{сек}^{-1}$

$$\omega^2 - p_1 = 0, \quad (2.2)$$

де $p_1 = C_1/J_1$ та $C_1 = C_{\Gamma}$.

Обертний момент на валу дизеля, $M_{\Gamma. \text{ном}}$, $\text{кг} \cdot \text{м}$,

$$M_{\Gamma. \text{ном}} = 975 \frac{P_{\Gamma. \text{ном}}}{\eta_{\Gamma} n_{\text{ном}}} \quad (2.3)$$

Синхронна жорсткість генератора, C_{Γ} , $\text{кг} \cdot \text{м}$

$$C_{\Gamma} = \frac{U_c}{x_d} + \frac{(x_d - x_q)U_c^2}{x_d x_q} \quad (2.4)$$

Піддатливість генератора, l , $\text{кг} \cdot \text{м}^{-1}$

$$l = 1/C_{\Gamma}. \quad (2.5)$$

2.2 Вимушені коливання синхронного агрегату та періодичні форми обертового моменту приводного двигуна

Нормально працюючий двигун внутрішнього згорання має, як було встановлено раніше, періодичний обертовий момент, середнє значення якого в сталому рух синхронного агрегату врівноважується моментом навантаження генератора та на ряд діє ряд гармонійних складових. У першому наближенні зміна обер-

таючого моменту на валу дизеля представляється у вигляді нескінченного ряду імпульсів.

Слід зауважити, що зміни частоти обертового моменту двигуна $\omega_\mu = 2\pi f_\mu$. Тут частота період при обертанні двигуна визначається числом спалахів палива циліндра zn протягом однієї секунди, f_μ , Гц,

$$f_\mu = \frac{zn}{60} \quad (2.6)$$

Величина z дорівнює число циліндрів і з урахуванням тактності машини m . При двохтактному двигуни, у якого за один оберт відбувається один спалах палива, $m = 1$ і величина $z = i$, а при чотирьохтактному двигуні, у якого спалах відбувається за два оберти, $z = 0,5$ і величина $m = 0,5i$.

Таким чином, кутова частота коливань основної гармоніки обертового моменту двигуна внутрішнього згорання має вигляд, ω_μ , сек⁻¹

$$\omega_\mu = \frac{2\pi zn}{60} = \frac{\pi imn}{30} \quad (2.7)$$

Рух синхронного дизель - генератора для випадків порушення рівномірного дії рушійних сил, як за приклад можна взяти порушення рівномірної роботи його циліндрів. При порушенні чіткого і рівномірного процесу впрыскування палива і його згорання струнка картина періодичних імпульсів порушується і в граничному випадку, коли відбувається пропуск робочого ходу в одному, двох або в більшій кількості циліндрів, відбувається пропуск відповідно одного, двох або більшого числа імпульсів на графіку.

Процес пропуску робочого ходу може виявитися не випадковим і тоді це порушення режиму буде періодичним, як показано на рис. 2.2, з періодом T рівнодіючих пропусків. Подібна періодична форма може з'явитися і в результаті недостатньо рівномірної регулювання тиску газів по циліндрах. Такий випадок представляється графіком, наведеним на рис. 2.2, г.

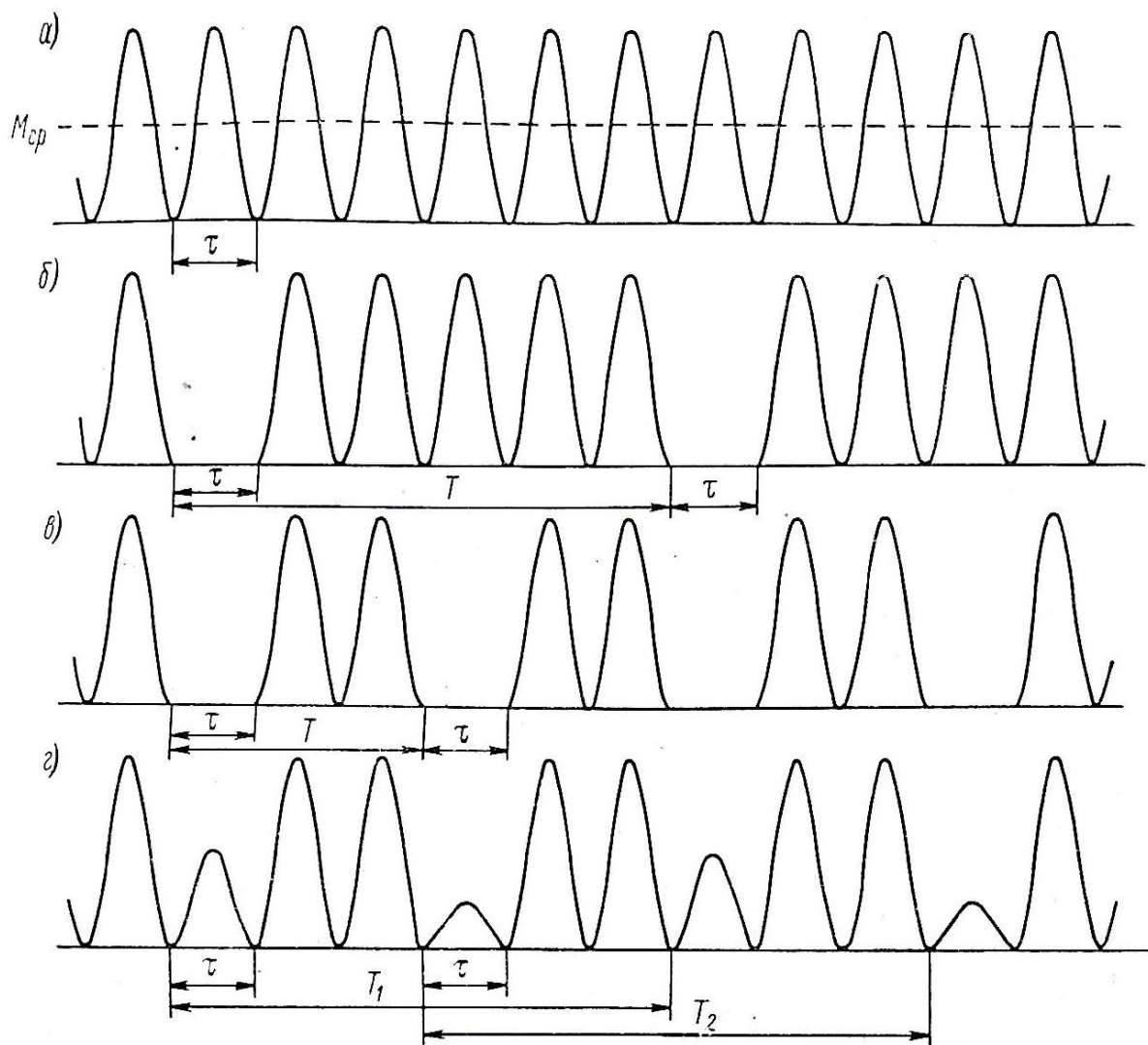


Рисунок 2.2 - Графіки основної гармоніки обертового моменту шестициліндрового дизеля в нормальному режимі – а, в випадках пропуску робочого ходу в одному циліндрі – б, в двох рівновіддалених по порядку роботи циліндрах та при недостатньому рівномірному тиску газів по циліндрах – г

Так як один спалах в циліндрі чотирьохтактного дизеля відбувається за 2 оберти колінчастого валу, а шийки підшипників між собою розмір екрану 120 градусів, як показано на малюнку 2.3, а, то на графіку імпульсів обертового моменту один оберт валу відповідає трьом імпульсу. При круговій частоті спалахів (імпульсів крутного моменту) ω_μ період між спалахами (рис. 2.3, б) або тривалість одного спалаху (імпульсу) становить $\tau = 2\pi / \omega_\mu$.

У зв'язку з нерівномірним по тій або іншій причині роботи циліндрів виникає ряд періодичних змін в нескінченній серії імпульсів обертового моменту.

Останнім можливе число подібних періодичних змін для чотирьохтактного дизеля, у якого порядок роботи циліндрів 1-5-3-6-2-4 рис. 2.3.

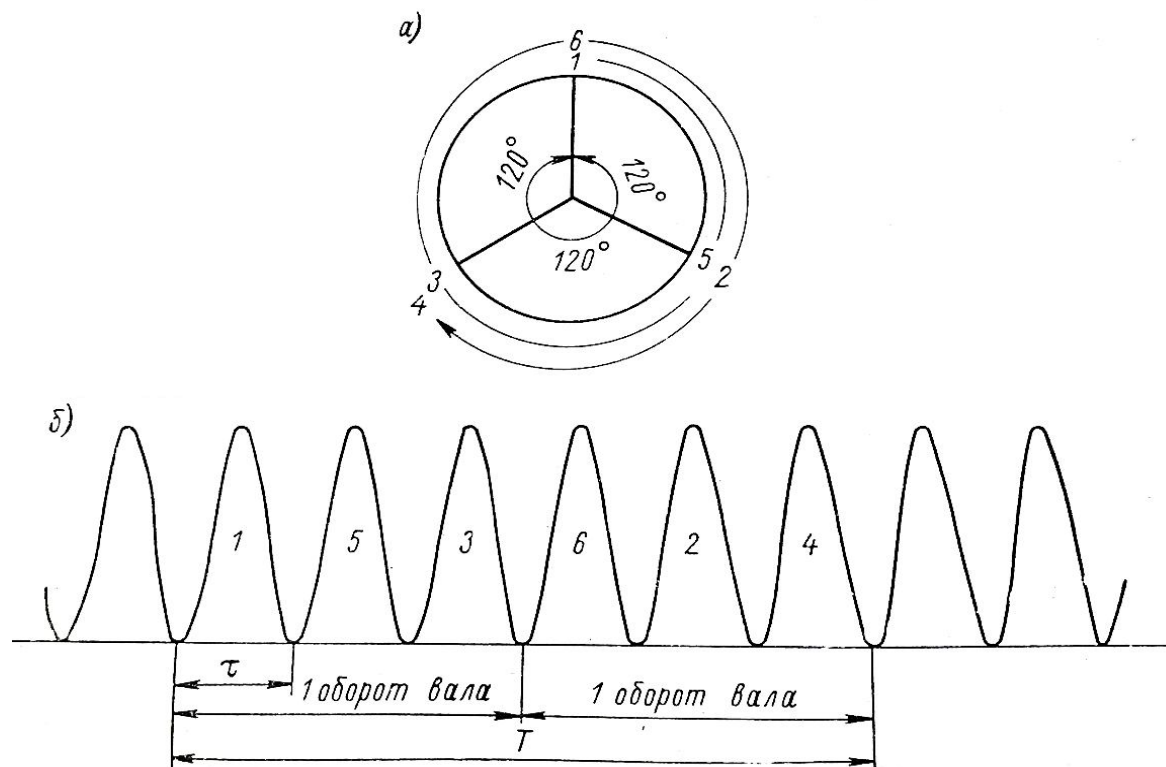


Рисунок 2.3 - Діаграма порядку роботи циліндрів – а, графік основної гармоніки обертового моменту – б шестициліндрового чотирьохтактного двигуна внутрішнього згоряння

У випадок нерівномірної роботи одного з шести циліндрів розглянутого дизеля період з'являються періодичного процесу дорівнює $T = 6\tau$.

Якщо не номінальний тиск заздалегідь мають два суміжній по порядку роботи циліндра, наприклад 1 і 5, то період виявляється періодичного процесу також дорівнює 6τ . У разі не номінального тиску у двох рівновіддалених один по одному роботи циліндрів, наприклад 1 і 6, період з'являються періодичного процесу дорівнює $T = 3\tau$.

Продовжуючи подібний аналіз, можна встановити, що періодична форма зміни крутного моменту дизеля може мати періоди від 2τ до 12τ . Величина періодів більше 6τ можуть бути викликані, як експериментально було встановлено раніше, нерівномірної регулюванням паливної апаратури, коли величина тиску в па-

ливному насосі в попереднім уприскуванні палива в циліндр виявляється не дорівнює величині тиску подальшого вприскування. Тому тиск згоряння в даному циліндрі виявляється одним і тим же через такт нього роботи, і отже період з'являється періодичної форми при шестициліндровому дизелі буде дорівнювати 12τ .

На рис. 2.4 показано осцилограма коливань швидкості ротора шестициліндрового дизель - генератора ДГР 150/750 в разі паралельної роботи при недостатньому тиску другого вприскування палива по циліндрах. У нижній частині осцилограми зафіксовано нерівномірне тиск вприскування палива p_T і відповідно нерівномірне величина тиску газу p_Z , що викликають коливання вала двигуна.

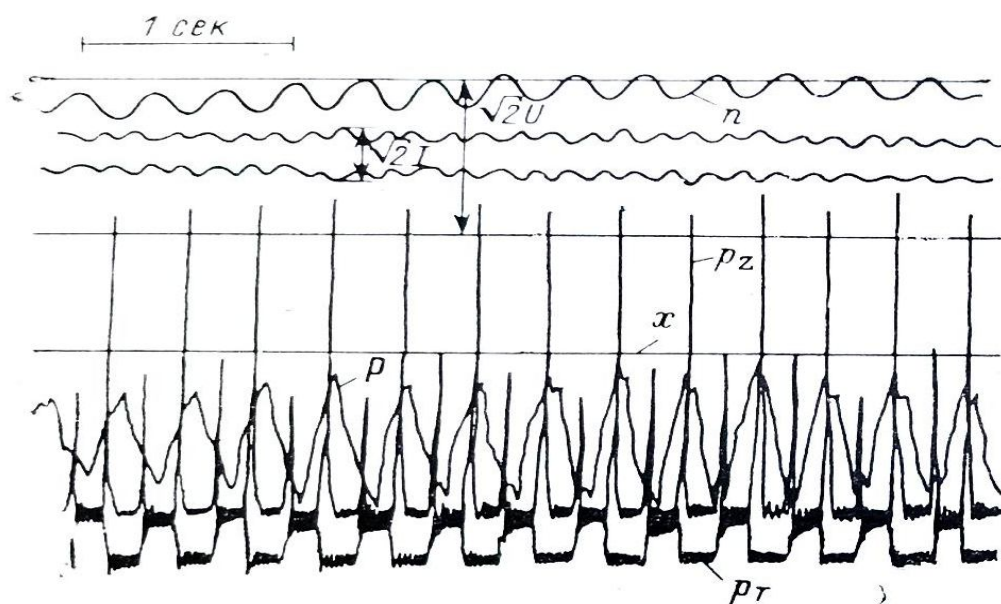


Рисунок 2.4 - Осцилограма коливань швидкості ротора шестициліндрового агрегату ДГР 150/750 з фіксованою рейкою паливного насоса при паралельній роботі без навантаження

Можна досліджувати будь-яку з періодичних форм зміни обертового моменту, щоб встановити характер і впливу на рух агрегату. На рис. 2.5 показані дві такі форми: в першій має місце пропуску в роботі двох суміжних циліндрів, у другій - пропуски чергуються імпульсами працюючих циліндрів. Розглядаючи один з періодів зазначених форм, можна стверджувати, що із закінченням дії обертового моменту двигуна, тобто з настанням паузи, починається вільний рух агрегату.

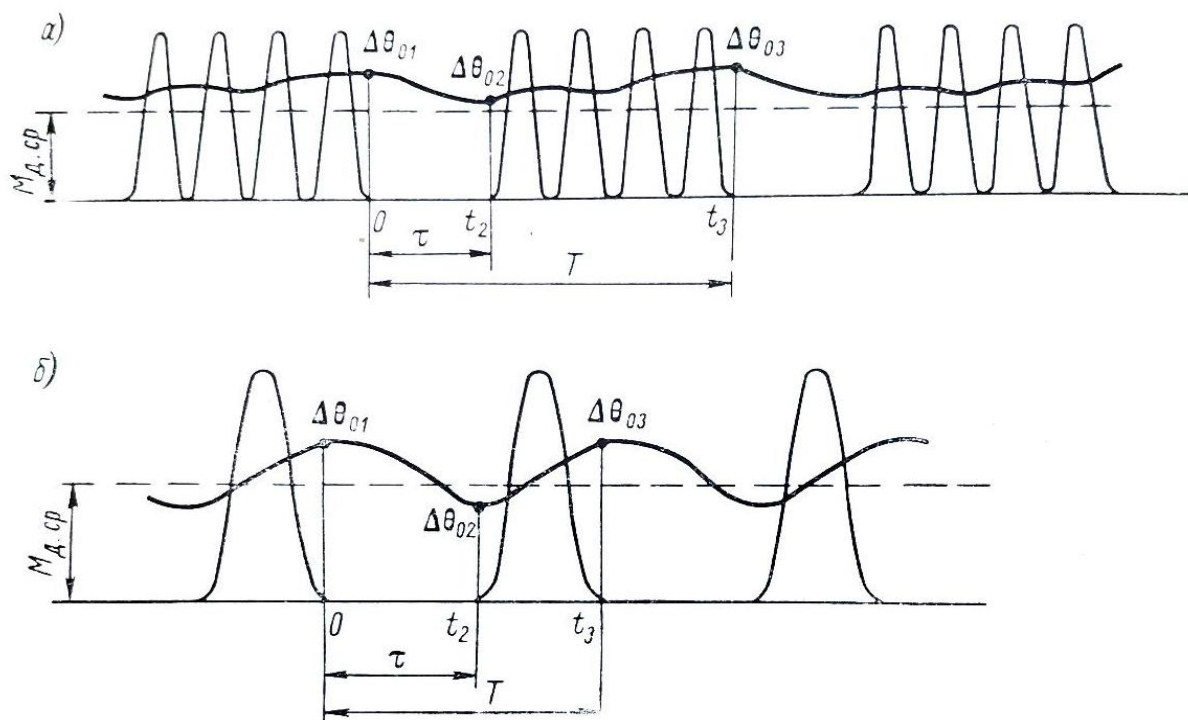


Рисунок 2.5 - Періодичні форми зміни обертового моменту дизеля в випадках пропуску в роботі двох суміжних циліндрів – а, та чергування пропусків з імпульсами нормально працюючих циліндрів – б

Таким чином, будь-який період, що розглядається має два інтервали, в кожній з яких справедливо свої формули руху з початковими значеннями часу і узагальнюючих координат.

В усталеному русі, яке в даному випадку представляє інтерес, кожен наступний період руху буде ідентичним попередньому, і тому кінцеве значення координат в інтервалі дії імпульсу збігається з початковими значеннями координати паузи. Це особливість періодичного процесу дозволяє обчислити початкову координату для будь-якого періоду.

При достатньому високому значенні кругової частоти вимушених коливань ω_{μ} завдання дослідження руху в разі виникнення низькочастотного періодичного обертового моменту можна спростити. Якщо не враховувати високочастотні коливання, викликані пульсуючим обертовим момент в двигуні, тобто не враховувати ступінь нерівномірності його обертання, то слід вважати, що в сталому режимі обертовий момент двигуна врівноважується моментом опору генератора. Іншими

словами, зневажа коливаннями кругової частоти $\omega_{\text{ц}}$ передбачає сталість величини обертового моменту двигуна, яка дорівнює середньому значенню реального моменту при нескінченно великому значенні кругової частоти.

При цьому умови періодичне порушення робочого процесу циліндрів двигуна зумовили появу періодичних збурюючих сил. Останні можуть бути представлені у вигляді періодичних імпульсів обертового моменту, що діють на вал агрегату. Періодичні форми порушення роботи можуть бути виражені за допомогою синусоїдальних функцій, як наприклад, показано на рис. 2.6.

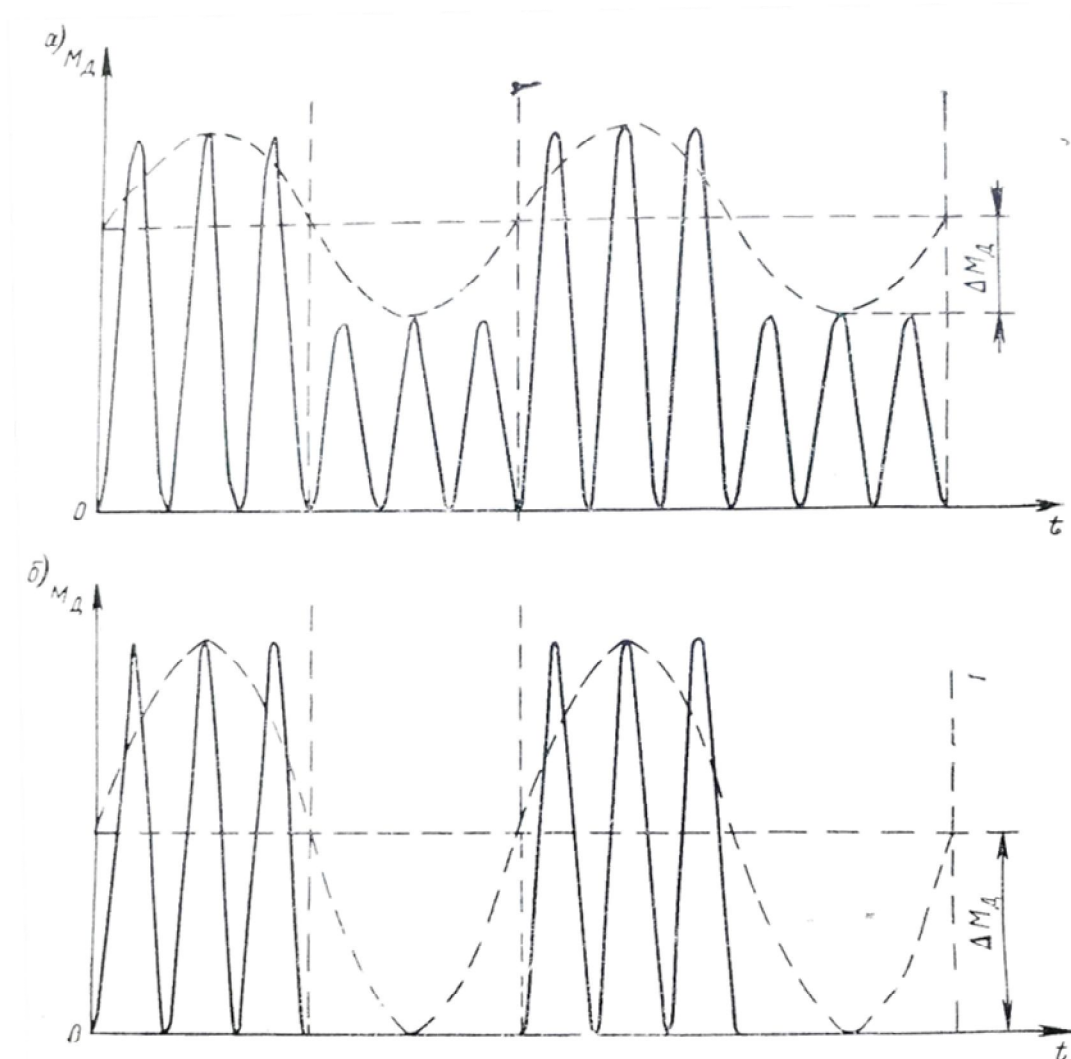


Рисунок 2.6 - Представлення періодичних форм порушення роботи двигуна у вигляді гармонійних функцій: а – випадок недостатнього тиску другого уприскування палива в трьох суміжних циліндрах; б – випадок відключення трьох суміжних циліндрів

Однак у багатьох випадках доцільно застосувати імпульсні функції, за допомогою яких досягаються велика наочність дослідження і простота кінцевих результатів. Такі імпульси тривалістю ті можуть утворювати різні періодичні форми порушення нормальної роботи двигуна рис. 2.7. Можна розглядати прямокутний і синусоїдальний імпульси.

Найбільш просто аналіз досліджуваного процесу здійснюється в разі застосування імпульсів прямокутної форми. Залежно від характеру порушень нормального режиму згоряння палива в циліндрах знак імпульсів може або збігатися зі знаком крутного моменту, або бути протилежним йому - збігається зі знаком моменту опору. При підвищеному тиску згоряння у одного з циліндрів матиме місце перший випадок, якщо ж тиск заздалегідь має малу величину або є пропуск робочого ходу, відповідний за величиною імпульс матиме протилежний знак, як показано на рис. 2.7, б.

Обурює сила у вигляді прямокутного імпульсу діє, в кінці періоду, і тому можна припускати, що амплітуда сталих коливань (коливання є вільними) буде наступати під час паузи.

Приріст обертового моменту повинно визначатися з урахуванням того, що при порушенні нормальної роботи частини циліндрів двигуна, наприклад при зменшенні тиску в ній газів, інша частина циліндрів в разі наявності двигуна автоматичного регулятора швидкості буде мати збільшене амплітудне значення крутного моменту для врівноваження моменту навантаження зі збереженням колишньої швидкості обертання. Це зауваження ілюструється графіком, наведеним на рис. 2.8. Штриховими лініями показані графіки крутного моменту шестициліндрового чотиритактного двигуна при нормальній роботі всіх циліндрів, суцільними - порушення роботи одного циліндра.

Графіки, що відображають ненормальні режими, показуючи для двох випадків: в першому випадку двигун, що працює без навантаження (криві 1) та з номінальним навантаженням (криві 2), має один вимкнений циліндр, у другому випадку двигун з номінальною навантаженням один циліндр розвиває момент в два рази менше номінального.

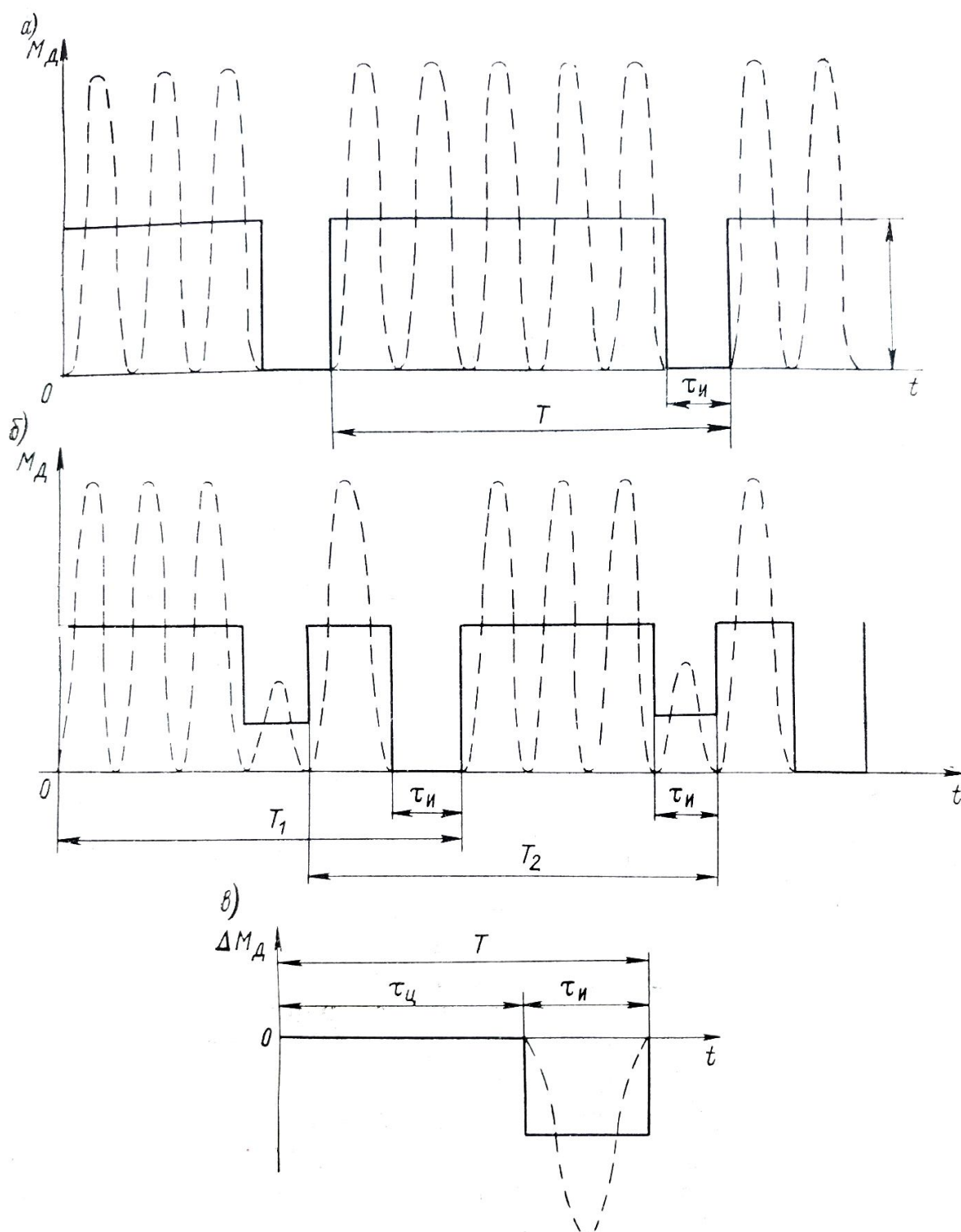


Рисунок 2.7 - Представлення періодичних форм порушення роботи двигуна у вигляді імпульсних функцій: а – випадок відключення одного з циліндрів двигуна; б – випадок відключення одного циліндра і недостатнього тиску газів в іншому; в – імпульс обертового моменту прямокутної або синусоїдальної форми

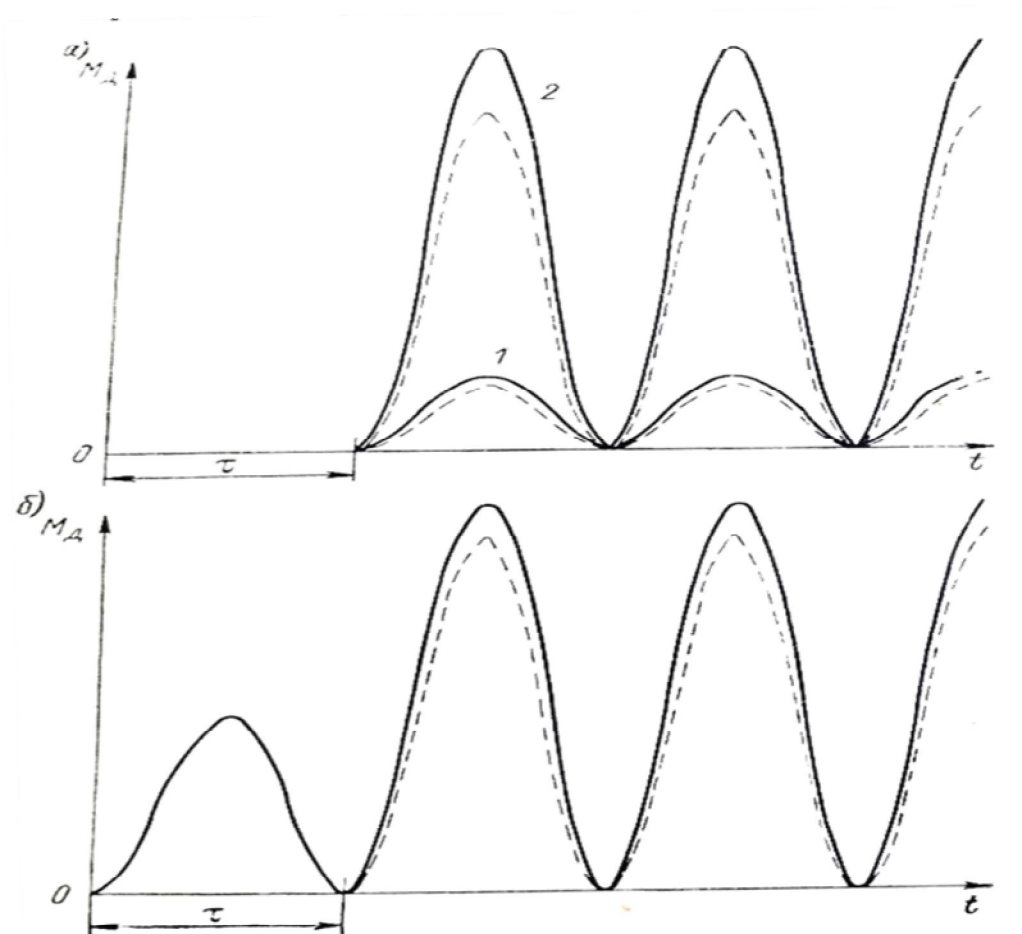


Рисунок 2.8 - Графіки зміни амплітудного значення обертового моменту дизеля: а – при одному відключеному циліндрі без навантаження двигуна (1) і при його номінальному навантаженні (2); б – при половинній номінальному навантаженні одного з циліндрів

Обурює сила у вигляді прямокутного імпульсу діє, в кінці періоду, і тому можна припускати, що амплітуда сталих коливань (коливання є вільними) буде наступати під час паузи. Можна відзначити, що максимальне відхилення кута вильоту ротора та швидкості обертання агрегату при паралельній роботі з мережею буде мати місце, коли відсутня демпферна обмотка на генераторі та при співпаданні частоти вільних коливань агрегату з частотою сили, що обурює.

Таким чином амплітуда коливань кута вильоту ротора синхронного агрегату буде зростати, якщо рівномірність обертового моменту двигуна буде порушена і

з'явиться будь-яка періодична форма сил, що обурюють, які обумовлюють настання звичайного або ударного резонансу.

2.3 Моделювання паралельної роботи дизель – генераторних агрегатів з урахуванням нерівномірності подачі палива

Для комп'ютерного моделювання скористаємося пакетом Simulink, який входить до складу програмного забезпечення Matlab. В бібліотеці знаходиться велика кількість пакетів математичних моделей, але для складання розрахункової схеми достатньо двох: Simulink та SimPowerSyste

Розглянемо функції, які виконують в розрахунковій схемі (рис. 2.8) моделі з цих пакетів:

1. Блок Constant (Simulink/CommonlyUsedBlocks) дозволяє ввести в модель наступні постійні величини: Constant – задає стале значення напруги якоря СГ; Constant1 – задає стале значення частоти обертання СГ.

2. Блоки Add та Product (Simulink/MathOperations) — виконують підсумовування та перемноження вхідних сигналів.

3. Блок MathFunction (Simulink/MathOperations) – дозволяє виконати різні математичні функції від вхідного сигналу; в схемі обрана функція sqrt, яка визначає квадратний корінь і в даному випадку дозволяє розрахувати поточне значення напруги якоря СГ.

4. Блок Gain (Simulink/MathOperations) – виконує підсилення вхідного сигналу у визначену кількість разів.

5. Блок Saturation (Simulink/Discontinuities) – обмежує значення вхідної величини: Saturation1 – напруга збудження СГ; Saturation – механічний момент на валу СГ.

6. Блок Scope (Simulink/CommonlyUsedBlocks) – осцилограф, що дозволяє зафіксувати зміну у часі досліджуваних величин (струм, напруга, потужність, частота)

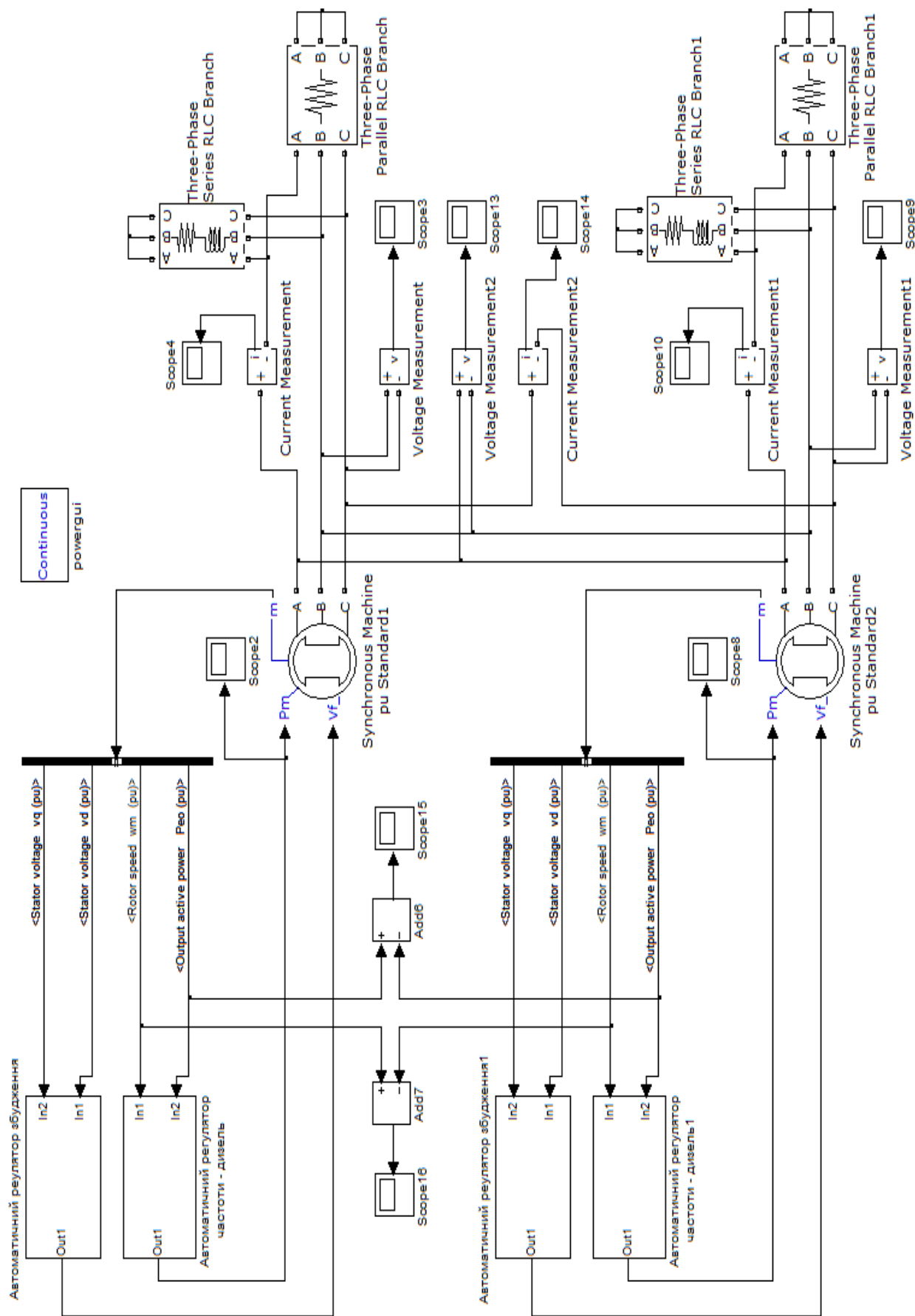


Рисунок 2.9 – Модель паралельно працюючих дизель - генераторних агрегатів

7. Блок VoltageMeasurement (SimPowerSystem/Measurements) – датчик напруги.

8. Блок Current Measurement (SimPowerSystem/Measurements) – датчик струму.

9. Блок Three-PhaseSeriesRLCBranch (SimPowerSystem/Elements) – трифазне статичне навантаження в схемі необхідне для забезпечення умов розрахунку, тому що синхронні машини включені послідовно і моделюються в системі, як джерела струму.

10. SynchronousMachinePuStandard (SimPowerSystem/Machines) – математична модель синхронної машини у відносних одиницях представлена як: SynchronousMachinePuStandard2 – синхронний генератор (механічний момент на валу позитивний); SynchronousMachinePuStandard1 – синхронний двигун (механічний момент від'ємний). Машину необхідної потужності обирають з каталогу існуючих моделей (PresetModel) або задають свої параметри.

11. Backlash (Simulink/Discontinuities) – виконує роль ланки зони нечутливості (люфт механічних частин АРЧ та дизеля).

12. Repeating Sequence Stair (Simulink/Sources) – дозволяє нам задавати подачу палива в циліндри.

13. Sine Wave (Simulink/Sources) – дозволяє нам задавати сим фазність роботи поршнем дизельного агрегату.

14. Transfer Fcn (Simulink/Continuous) – виконує роль ланки запізнювання.

Для зменшення габаритів математичної моделі було прийнято рішення щодо групування та переміщення елементів моделі в блоки. А саме це блок автоматичного регулятора збудження (рис.2.10) та автоматичного регулятора частоти – дизель (рис.2.11).

Для дослідження паралельно працюючих дизель-генераторних агрегатів в різних режимах роботи дизеля, а також з'ясування питання про наявність обмінних коливань потужності була складена і промодельована схема і отримані характеристики.

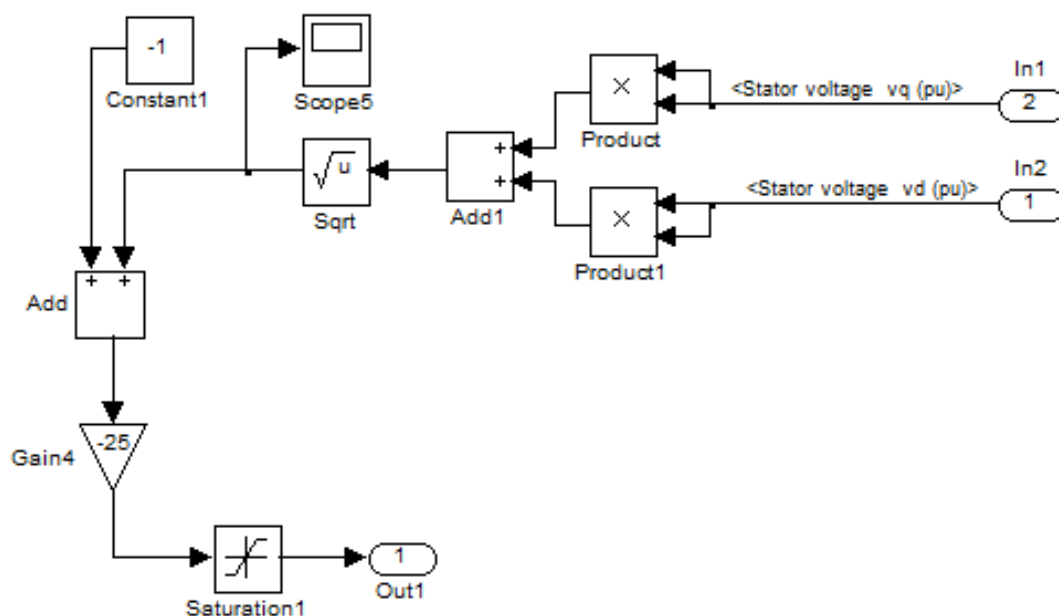


Рисунок 2.10 – Блок автоматичного регулятора збудження

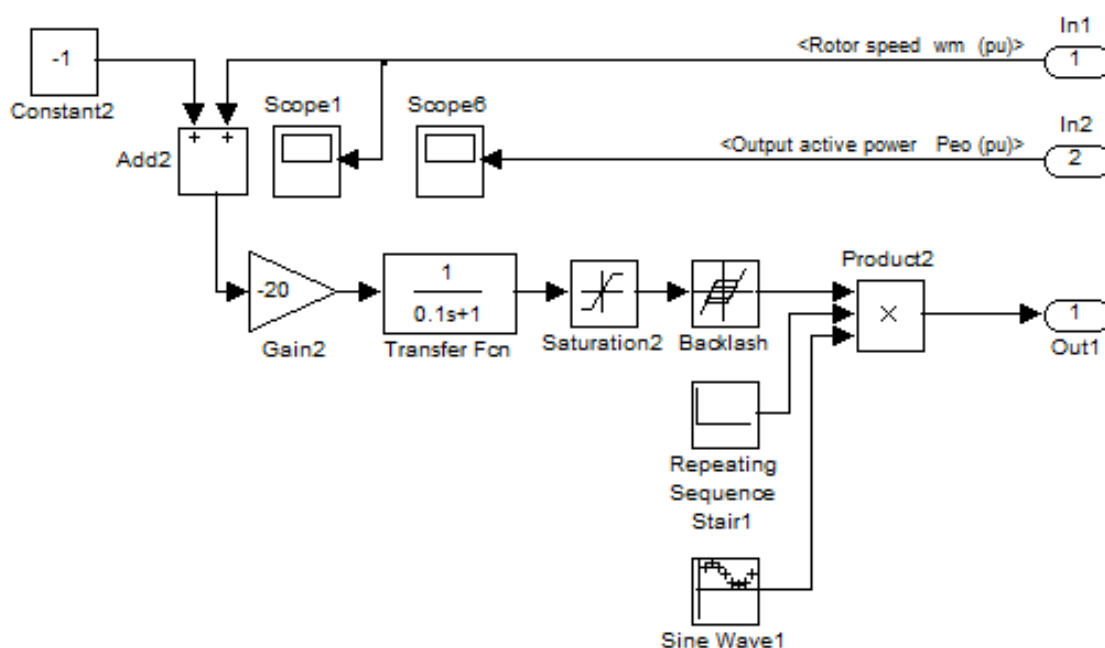


Рисунок 2.11 – Блок автоматичного регулятора частоти – дизель

У нормальному режимі роботи, коли подача палива в усі циліндри дизелів йде рівномірної, а поршні працюють синфазно, виникаючі коливання настільки малі, що ними можна знехтувати.

Коли подача палива в усі циліндри рівномірною, а хід поршнів в дизелях відбувається в протифазі, виходячи з отриманих характеристик (рис. 2.12), ми мо-

жемо зробити висновок, що обмінний коливання активної потужності досягають рівня 3%, величина струму 3А, а частота низькочастотних коливань 11 Гц.

Якщо подача палива в один з циліндрів здійснюється на половину, відповідно до отриманих тимчасовими діаграмами, ми можемо спостерігати, що коливання активної потужності між генераторними агрегатами різко зростають і досягають 40%, струм становить 30А, а частота коливань вже становить 7 Гц (рис.2.13).

У разі повної відсутності подачі палива в один з циліндрів (при цьому поршні дизелів працюють синфазно), коливання активної потужності стають ще більше і в сталому режимі їх амплітуда коливається в діапазоні від 38% до 60%, струм досягає 60А, а частота 7 Гц (рис.2.14).

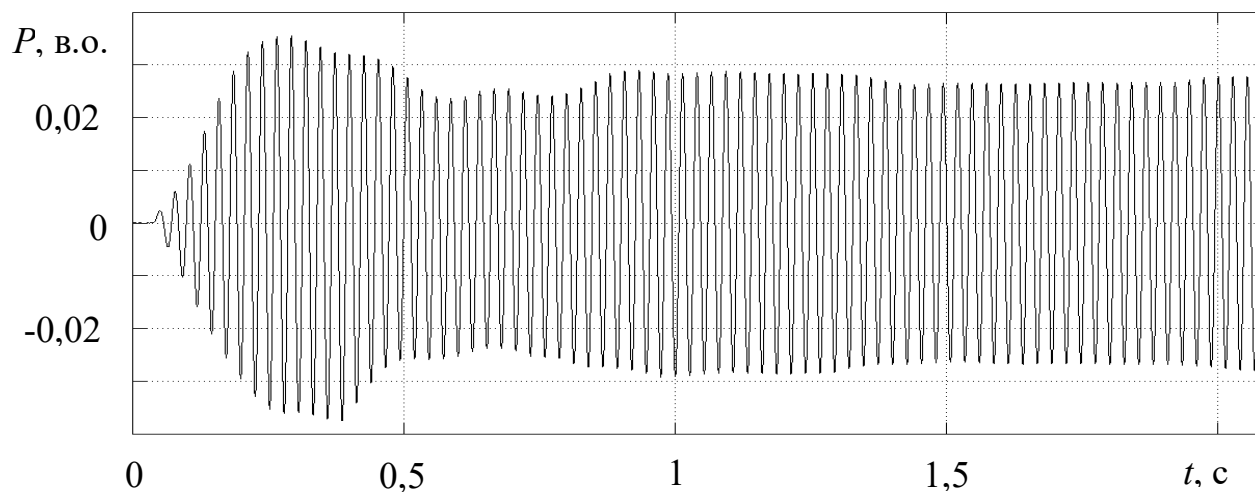
У досліджуваних вище режимах враховувалися ланка запізнювання і ланка зони нечутливості (люфт механічних частин АРЧ та дизеля).

Розглянемо випадок, коли ланка нечутливості (люфту) і подача палива в один з циліндрів відсутні, при цьому хід поршнів синфазний. Коливання активної потужності досягають 58%, струм становить 58А, а частота 7 Гц. Відмінність отриманих діаграм від попереднього випадку полягає в тому, що коливання потужності носять вже синусоїдальний характер з постійною амплітудою. Тобто ще більше посилюються коливання перетікання потужності між генераторами (рис.2.15).

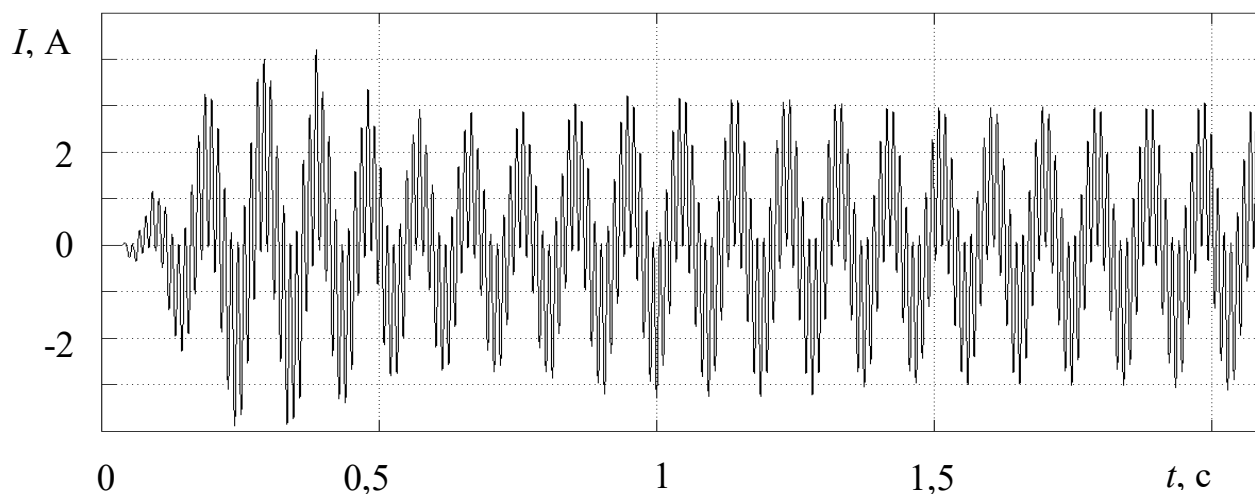
Тепер розглянемо випадок, коли ланка запізнювання відсутня (хід поршнів синфазних, подача палива в один з циліндрів відсутня). Коливання активної потужності досягають 47%, коливання струму становить 55 А з частотою низькочастотної складової 7 Гц (рис. 2.16).

Коли обидві ланки відсутні, коливання активної потужності досягають 45%, коливання струму становить 50А з тією ж частотою 7 Гц. Тобто ланка запізнювання і ланка зони нечутливості збільшують коливання потужності між генераторами, однак основний внесок в амплітуду коливань вносить саме нерівномірна подача палива (рис. 2.17).

а)



б)



в)

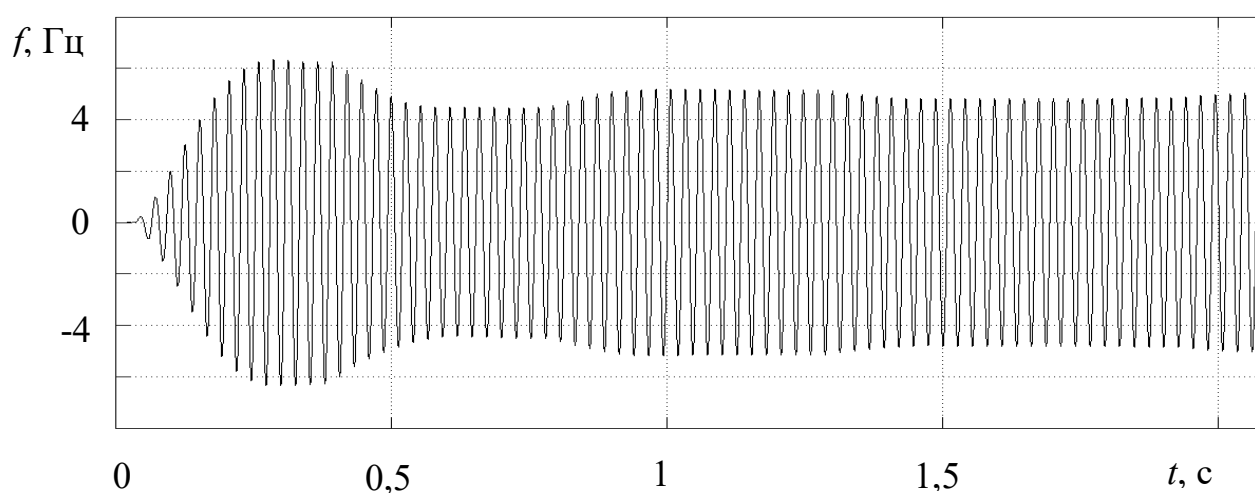
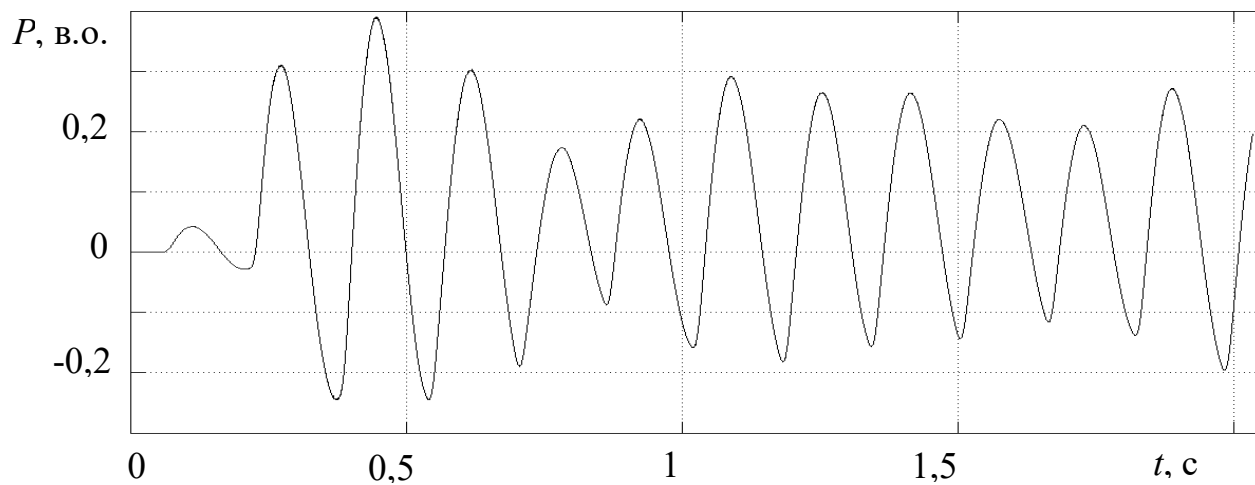
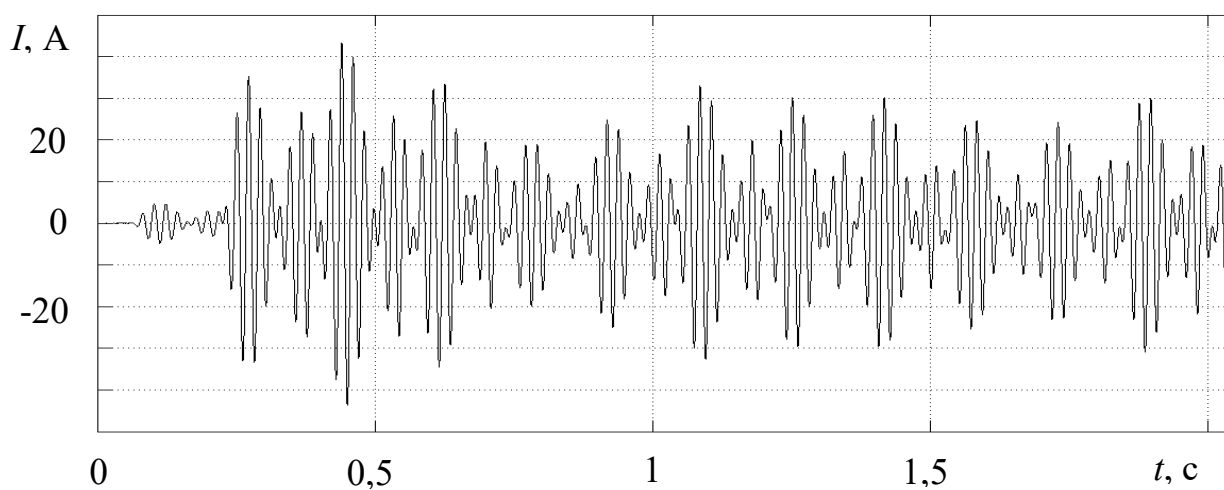


Рисунок 2.12 – Характеристики: а – потужності; б – струму; в – частоти, за умов коли подача палива в усі циліндри рівномірною, а хід поршнів в дизелях відбувається в протифазі

а)



б)



в)

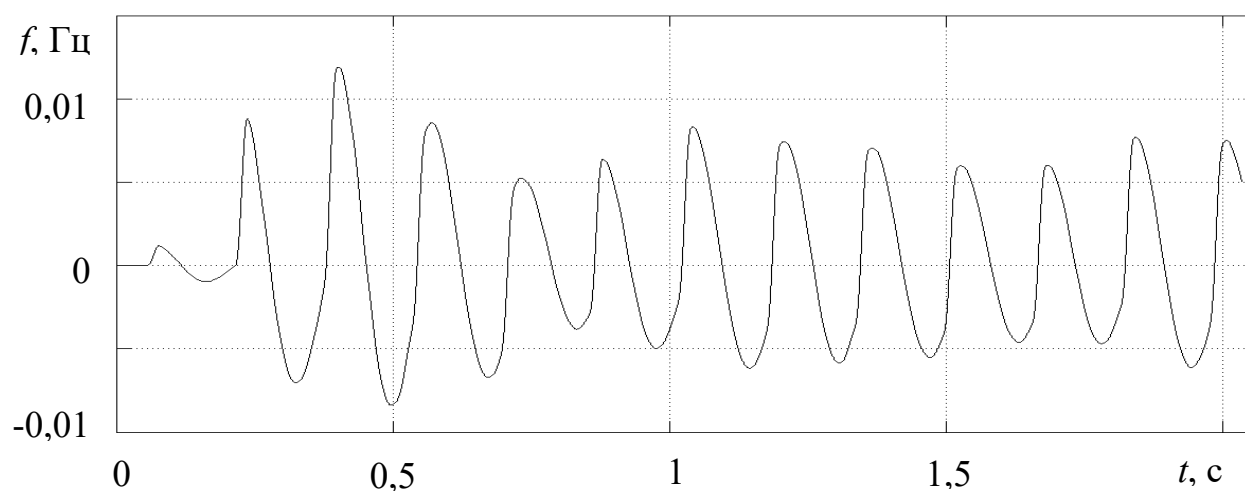
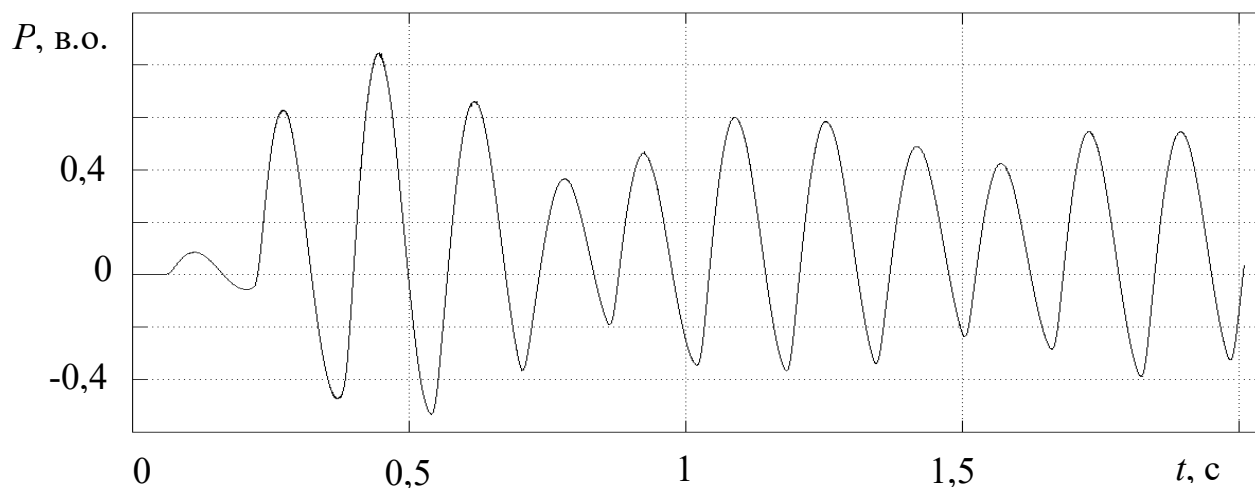
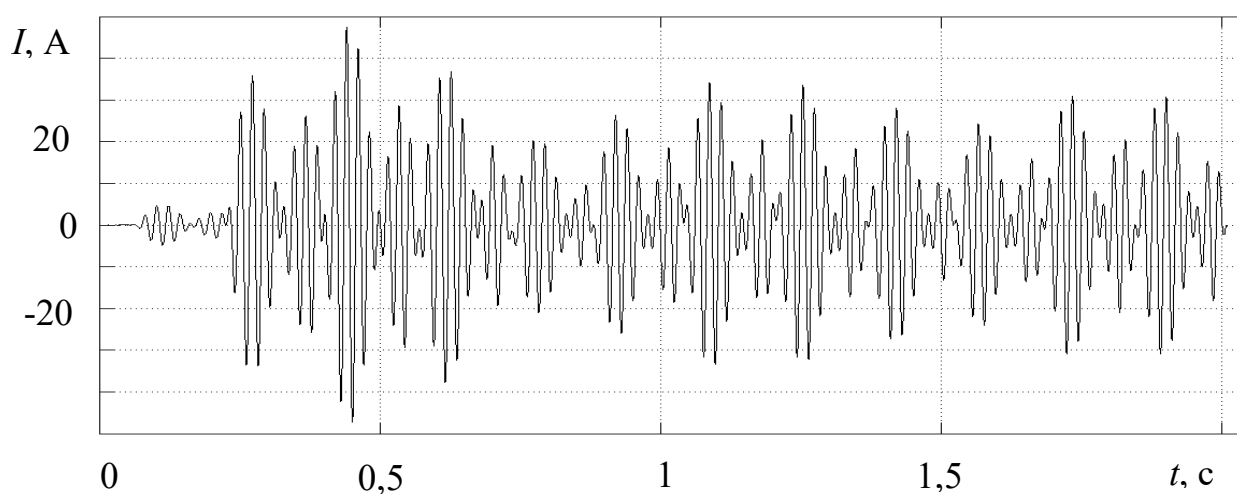


Рисунок 2.13 – Характеристики: а – потужності; б – струму; в – частоти, за умов коли подача палива в один з циліндрів здійснюється на половину, а поршні дизелів працюють синфазно

а)



б)



в)

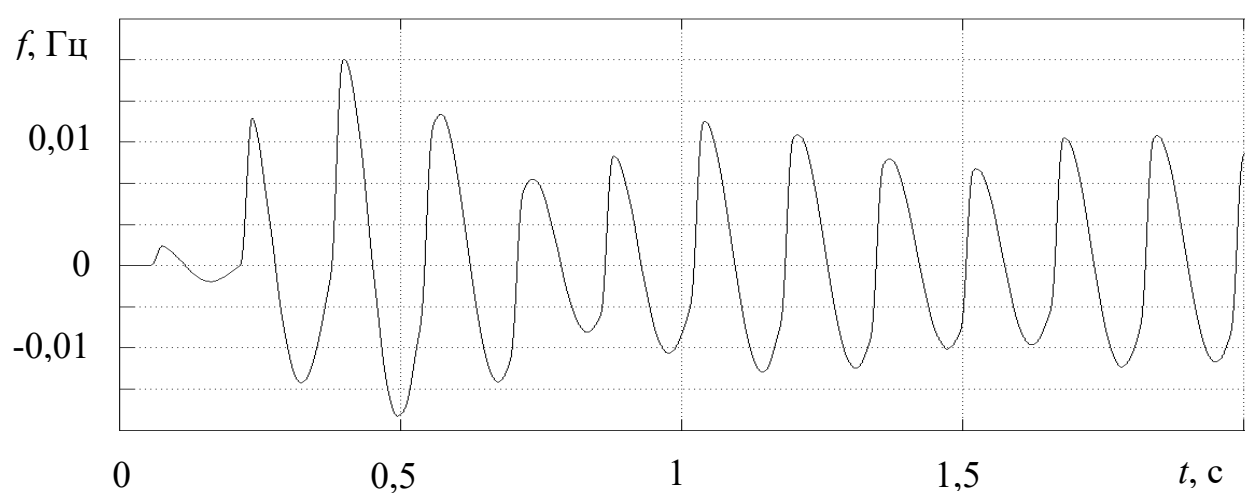
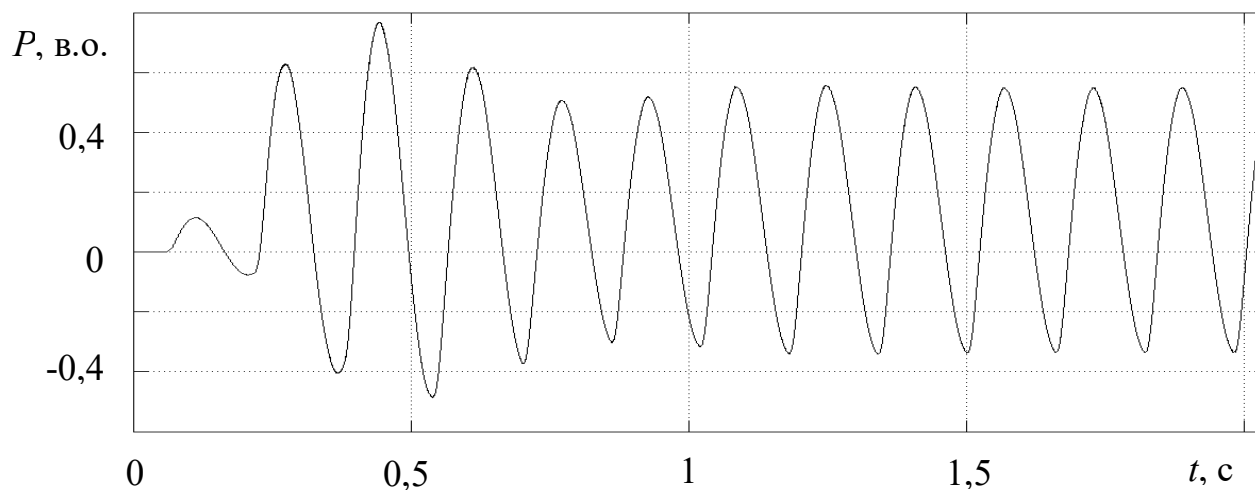
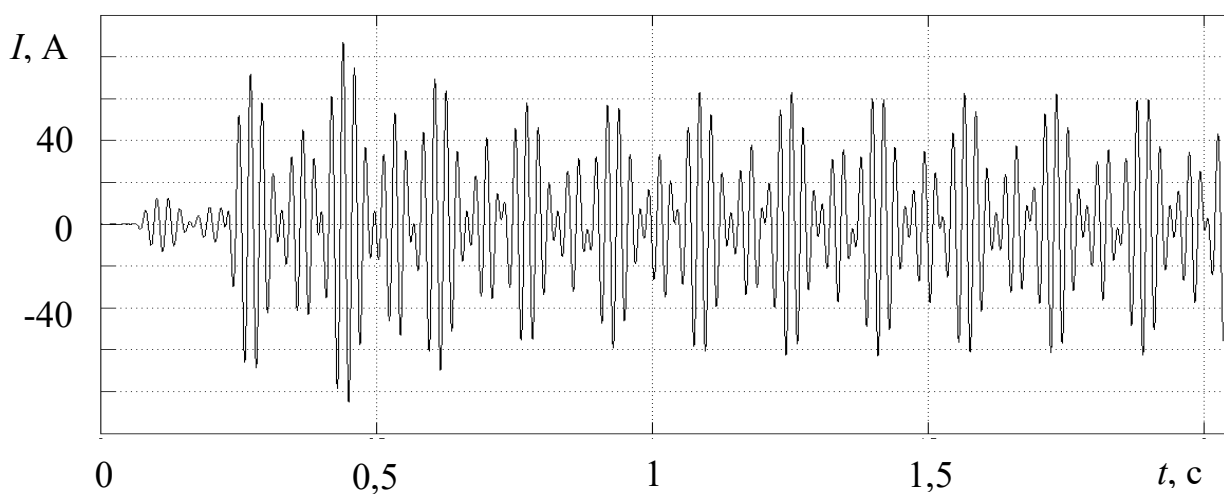


Рисунок 2.14 – Характеристики: а – потужності; б – струму; в – частоти, за умов коли подача палива в один з циліндрів повністю відсутня, а поршні дизелів працюють синфазно

а)



б)



в)

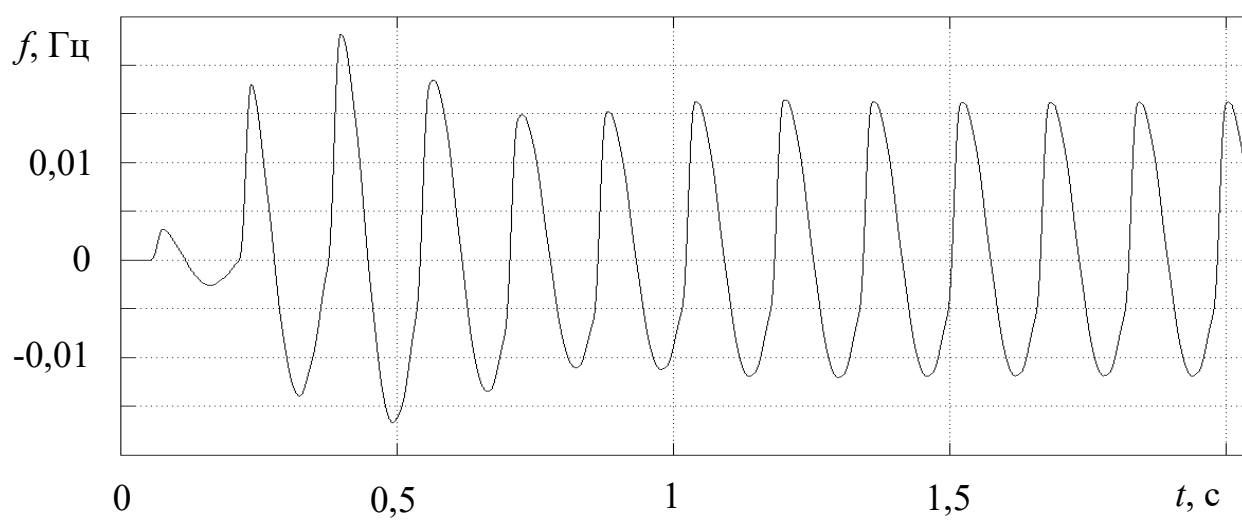
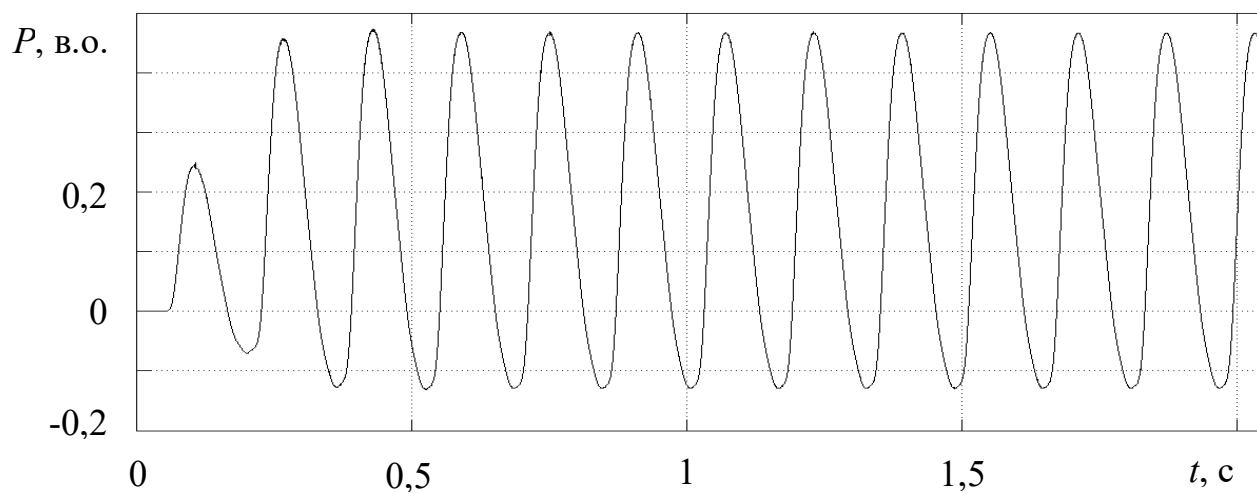
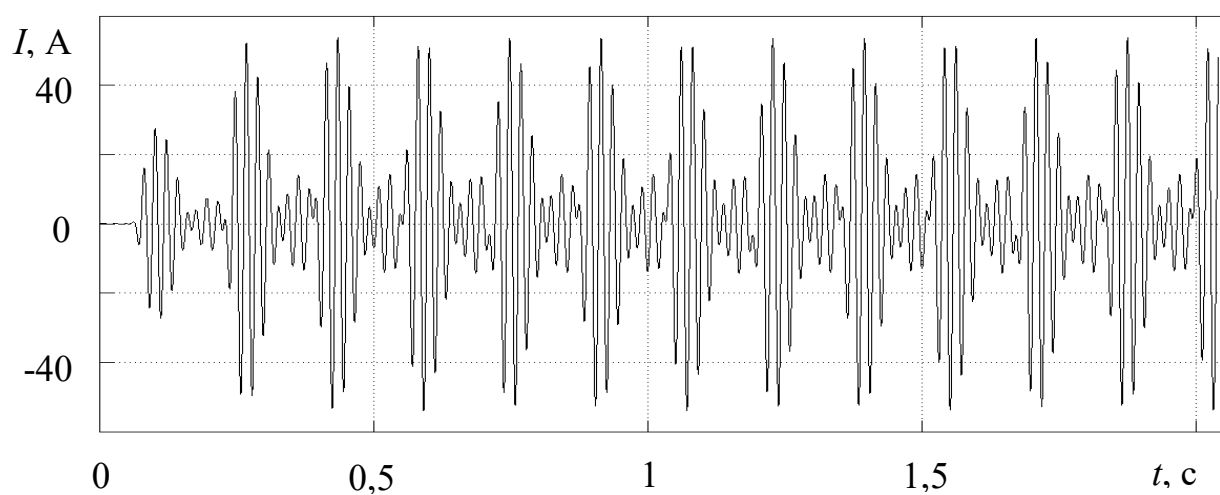


Рисунок 2.15 – Характеристики: а – потужності; б – струму; в – частоти, за умов коли ланка нечутливості (люфту) і подача палива в один з циліндрів відсутні, при цьому хід поршнів синфазний.

а)



б)



в)

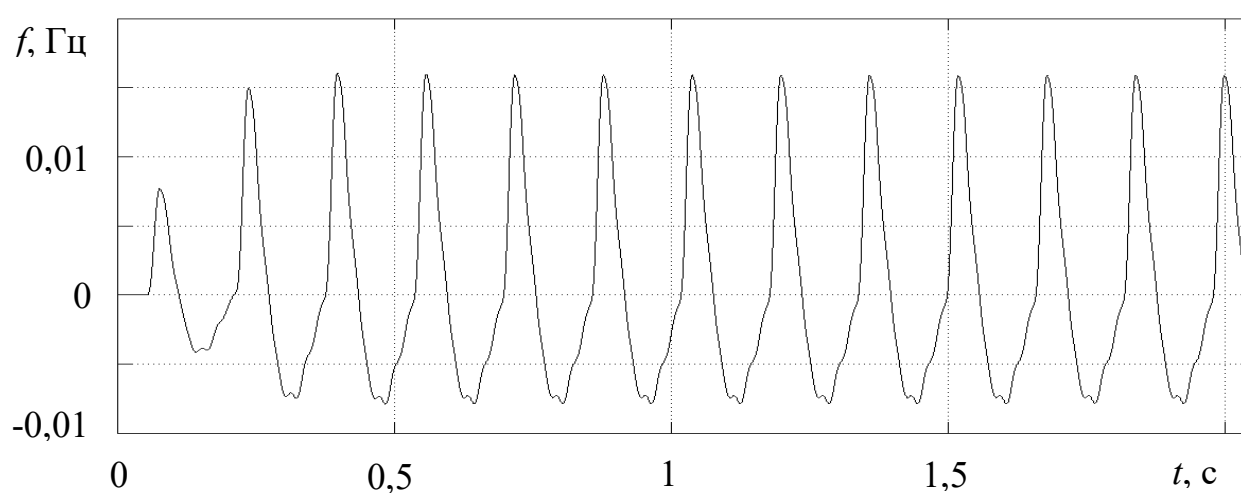
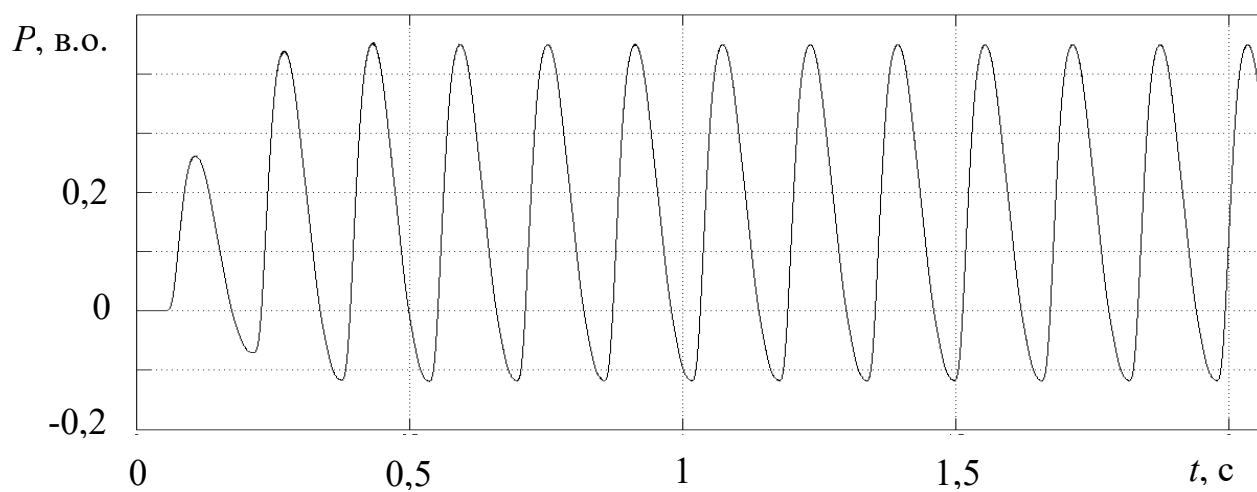
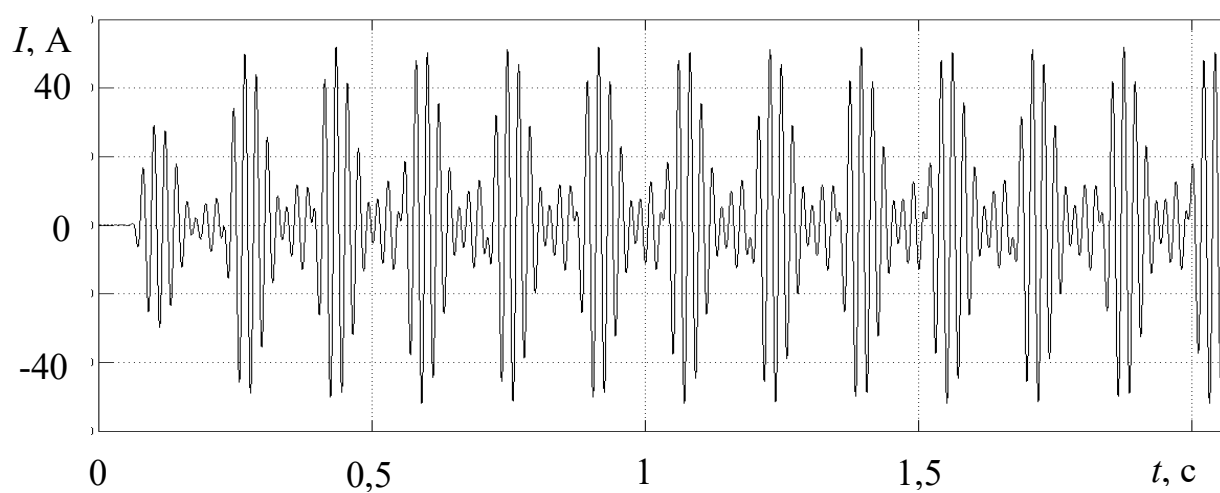


Рисунок 2.16 – Характеристики: а – потужності; б – струму; в – частоти, за умов коли ланка запізнювання відсутня і подача палива в один з циліндрів відсутні, при цьому хід поршнів синфазний

а)



б)



в)

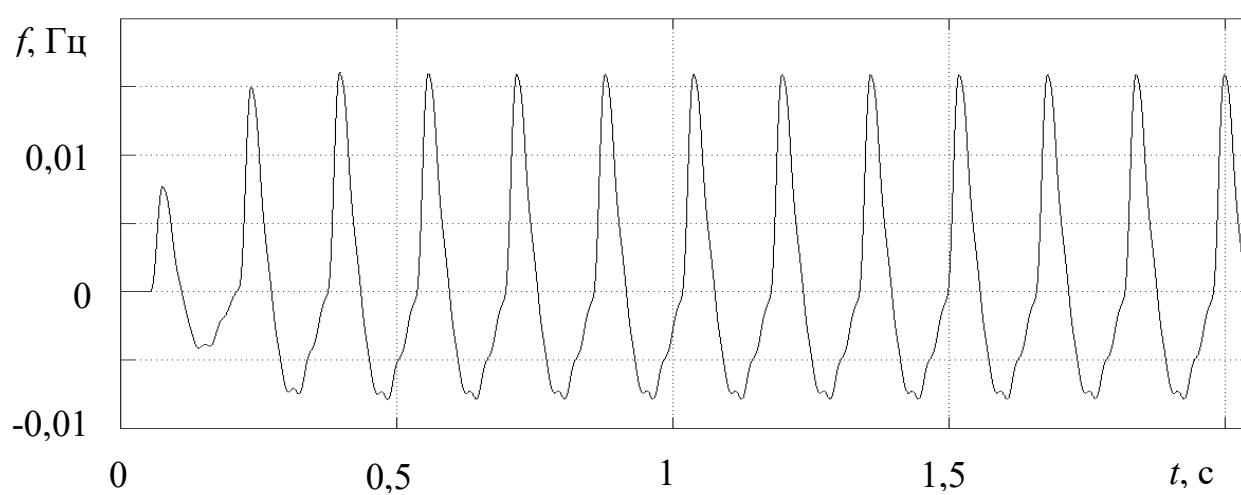


Рисунок 2.17 – Характеристики: а – потужності; б – струму; в – частоти, за умов коли обидві ланки відсутні (ланка запізнювання та ланка нечутливості) і подача палива в один з циліндрів відсутні, при цьому хід поршнів синфазний

Тому моніторинг низькочастотних коливань потужності кожного генератора дозволить контролювати роботу АРЧ і дизеля. У разі погіршення роботи дизеля, пов'язаного з нерівномірною подачею палива, буде спостерігатися збільшення амплітуди взаємних коливань потужності, а значить, і коливання потужності самого генератора. При цьому контрольований частотний діапазон відповідно до отриманих тимчасовими діаграмами треба вибирати 1 ... 15 Гц, щоб охопити основну частоту коливань 7 Гц.

Для контролю амплітуди низькочастотних коливань активної потужності кожного генератора, пропонується розробити наступну схему даного пристрою яка складається з наступних складових.

Побудова датчику активного струму має великий вибір рішень, але серед всіх найбільш вдалим було прийнято вважати застосування синхронного детектора. В якості синхронного детектора був застосований комутатор зі зміною знака вихідної напруги (рис. 2.18).

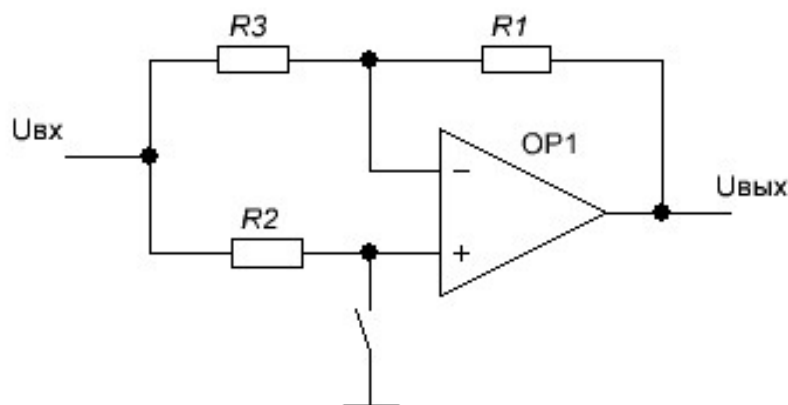


Рисунок 2.18 - Комутатор зі зміною знака вихідної напруги

Принцип дії комутатора полягає в тому, що коефіцієнт підсилення інвертуючої частини схеми дорівнює $-R1/R3$, а неінвертуючої $-1 + (R1/R2)$.

Таким чином умови $R1 = R2 = R3$ і відкритий ключ коефіцієнт посилення схема дорівнює одиниці, а при закритому, при заземленому неінвертуючому вході операційного підсилювача, мінус одиниці. Якщо вхідний сигнал буде пропорційний току фази А, ключем управляти відповідно до фази напруги U_a ,

схема буде працювати як датчик активного струму, а якщо відповідно до фазою напругу U_{cb} , як датчик реактивного струму.

Синхронний детектор виконаний на операційному підсилювачі $OP1$, на його вхід сигнал подається з вимірювального підсилювача датчика струму. Як ключ використовуємо польовий транзистор $VT1$, керований від компаратора $OP2$, на його вхід подається відповідні напруга синхронізації з вимірювального трансформатора.

Схема несприйнятлива до наявності постійної складової напруги на вході (виході вимірювального підсилювача) - ця складова перетворюється в біполярний меандр, який не проходить через фільтр, що знижує вимоги до схем вимірювання струму. Дана схема не вимагає складного налагодження та не критична до номіналів застосовуваних елементів, необхідно лише дотриматися умови, що для вимірювання з точністю не гірше 5% величина опору $R1 - R3$ має бути мінімум на два порядки більше опору транзистора $VT1$ у відкритому стані. Частота зрізу фільтра для отримання досить малою (5%) амплітуди пульсацій не повинна бути вище 20 Гц. Для спрощення налаштування вузлів, з якими буде працювати далі, коефіцієнт посилення фільтра бажано вибрати таким, щоб вихідна напруга фільтра дорівнювало діючим значенням вхідного сигналу.

Так для побудови реле зворотного потужності схему досить доповнити компаратора налаштованим на спрацьовування при негативній напрузі з рівнем на виході датчика, пропорційним 5-10% відсотків номінального струму, і реле часу з часом спрацьовування, встановлення в діапазоні від 1 до 10 секунд.

Суматор являє собою інвертується підсилювач, виконаний на операційному підсилювачі $OP7$ і має кілька входів. Для отримання одиничного коефіцієнта підсилення опори вибираються щодо умови $R7=R14=R21=R22$. На виході пристрою виходить інвертована сума вхідних напруг, тобто виконує математичну операцію складання декількох сигналів.

Смуговий фільтр фільтрує всі частоти, побудований на $OP3$, вирівнює пульсації випрямленої синхронним детектором напруги, пропускаючи тільки частоти, які знаходяться в певному діапазоні. Всі частоти за межами даного ча-

стотного діапазону послаблюються. Щоб розрахувати його параметри за вхідні данні візьмемо деякі значення резонансної частота f , добротності Q та коефіцієнта передачі H_0 . Для отримання значення смуги пропускання скористаємося формулою

$$f_{\max} - f_{\min} = f / Q \quad (2.7)$$

Будемо виходити з того, що $C1 = C2 = C$. Тоді опору резисторів можна розрахувати за такими формулами:

$$R23 = \frac{Q}{H_0 \cdot \omega_0 \cdot C} \quad (2.8)$$

$$R31 = \frac{Q}{(2Q^2 - H_0) \omega_0 \cdot C} \quad (2.9)$$

$$R32 = \frac{2Q}{\omega_0 \cdot C} \quad (2.10)$$

$$\omega_0 = 2\pi f \quad (2.11)$$

Для отримання якісного фільтра параметри резисторів і конденсаторів повинні якомога ближче відповідати розрахунковим значенням.

Однофазний випрямний міст, один з декількох типів випрямлячів, які активно застосовуються в електроніці. Оскільки випрямлення виходить двопівперіодним, частоту зрізу фільтра можна вибрати досить великою, що дозволяє максимально збільшити швидкодію системи. Опір $R26$ виконує роль обмежувачого опору.

В якості вимірювального приладу служить стрілочний мА, призначений для отримання значень вимірюваного струму в установленому діапазоні.

Схема пристрою для моніторингу обмінних коливань потужності представлена на рис. 2.19.

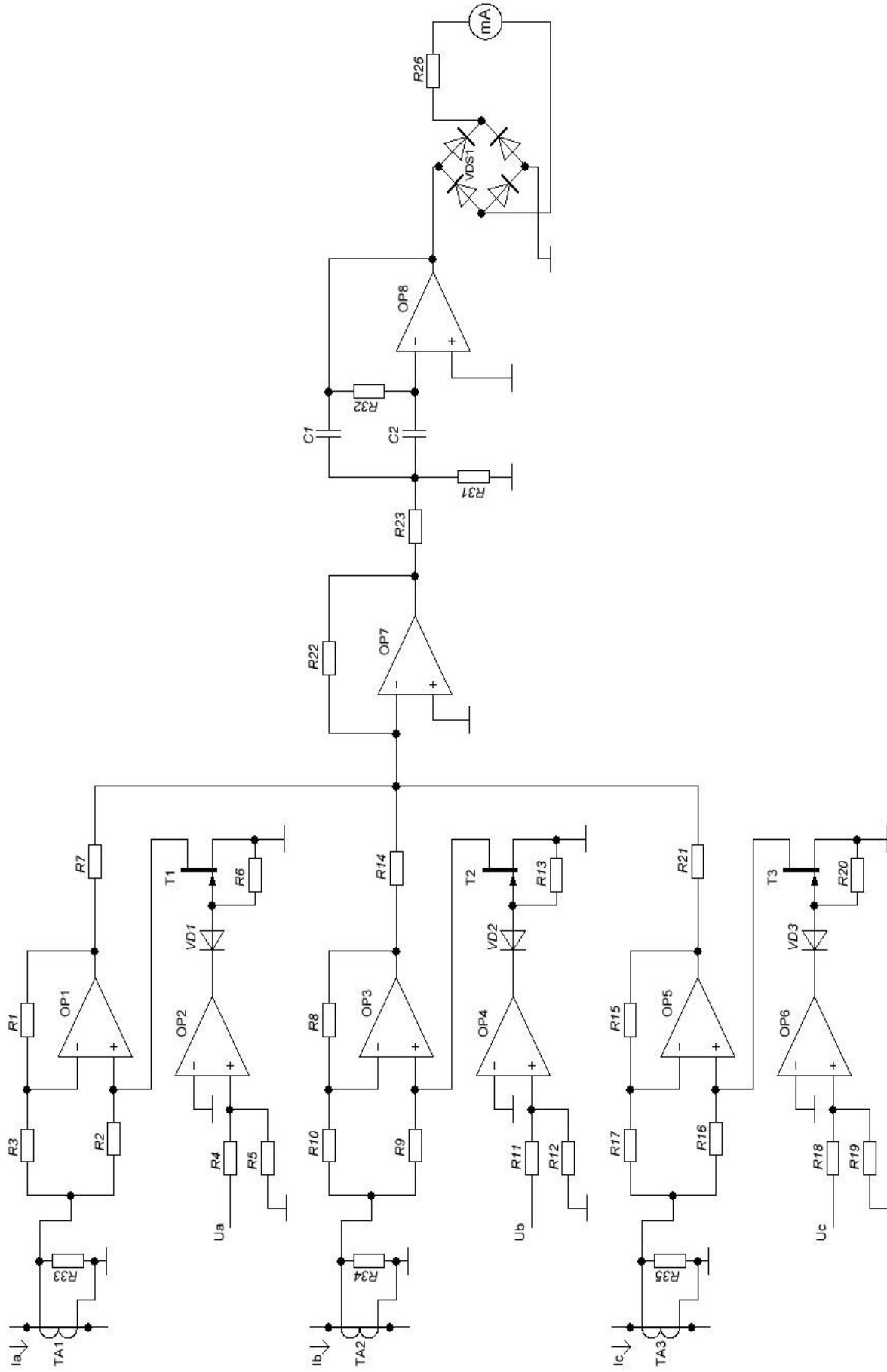


Рисунок 2.19 – Схема пристрою для контролю амплітуди низькочастотних коливань активної потужності

РОЗДІЛ 3. ВИМОГИ ПОЛОЖЕНЬ МІЖНАРОДНОЇ КОНВЕНЦІЇ МАРПОЛ 73/78 ЩОДО ПРИСТРОЇВ КОНТРОЛЮ СКИДУ НАФТИ НА НАФТОНАЛИВНИХ СУДНАХ

3.1. Технічні вимоги щодо сепараторів

Будь-яке судно валовою місткістю 400 і більше повинно бути оснащено сепаратором на 15 млн^{-1} , за винятком випадків, коли Адміністрація може не застосовувати цю вимогу відповідно до правила 14.5 Додатку I до МАРПОЛ 73/78 з поправками, внесеними резолюцією ІМО МЕРС.265 (68).

Будь-яке судно валовою місткістю менше 400 рекомендується оснащувати сепаратором на 15 млн^{-1} . На стаціонарних судах, що здійснюють тільки рейси без вантажу з метою зміни свого становища (судна-готелі, судна для зберігання і т.д.), сепаратори на 15 млн^{-1} можуть не встановлюватися при наявності збірного танка достатньої місткості для повного збереження на борту нафтовмісних льяльних вод.

Сепаратори на 15 млн^{-1} повинні мати схвалену конструкцію відповідно до положень застосовних резолюцій ІМО (А.393 (X), МЕРС.60 (33), МЕРС.107 (49)) і забезпечувати таку фільтруючу здатність, щоб після проходження через це обладнання будь-якої нафтової суміші, що скидається в море, вміст нафти в ній не перевищував 15 млн^{-1} .

До сепараторів на 15 млн^{-1} , що запобігає скиданню нафтових льяльних вод з вмістом нафти понад 15 млн^{-1} , повинні пред'являтися технічні вимоги та вимоги до випробувань з метою їх типового схвалення відповідно до положень резолюції ІМО МЕРС.107 (49) в наступних випадках:

.1 сепаратори на 15 млн^{-1} змонтовані на судах, килі яких закладені 1 січня 2005 року або після цієї дати;

.2 сепаратори на 15 млн^{-1} замовлені 1 січня 2005 року або після цієї дати для установки на судах, килі яких закладені до цієї дати.

Зважаючи на низьку або середню пропускну здатність цих сепараторів, через них можуть пропускатися тільки льяльні води, що містять нафту, і водяний баласт з паливних танків.

Електричні і електронні частини сепараторів на 15 млн^{-1} повинні функціонувати задовільно по завершенню екологічних випробувань відповідно до частини 3 додатка до резолюції ІМО МЕРС.107 (49).

Сепаратори на 15 млн^{-1} , що працюють при надлишковому тиску, повинні бути забезпечені запобіжними пристроями. Запобіжний пристрій повинен бути відрегульований на тиск $P_{\text{відкр}} = 1,1 p$, де p – робочий тиск.

Сепаратори на 15 млн^{-1} повинні мати надійну конструкцію. Вузли та деталі, що підлягають періодичному контролю і обслуговуванню, повинні бути легко доступні для персоналу. Подача насоса сепаратора повинна відповідати його пропускну здатності. У будь-якому випадку подача насоса сепаратора не повинна перевищувати більш ніж в 1,1 рази пропускну здатність сепаратора.

Повинна бути передбачена можливість осушення сепаратора. Якщо в конструкції сепаратора 15 млн^{-1} передбачений підігрів суміші, що містить нафту, він може здійснюватися за допомогою парових або водяних змішувиків.

Сепаратор повинен бути сконструйований для роботи в автоматичному режимі. Однак повинні бути передбачені засоби, які виключають скид в разі виникнення несправностей. Для введення в роботу сепаратора на 15 млн^{-1} не повинно виникати необхідності в регулюванні клапанів або іншого обладнання. Обладнання повинно працювати без спостереження протягом 24 год.

Зміна середовища, що подається до сепаратора на 15 млн^{-1} (від нафтовмісної льяльної води до нафти, від нафтовмісної льяльної води до водяної емульсії або від нафти і / або води до прохвата повітря), не повинно призводити до зливу за борт будь-якої нафтовмісної суміші з вмістом нафти понад 15 млн^{-1} . Сепаратори, насоси та інше обладнання повинні бути оснащені приладами для контролю тиску, температури і рівня, а також системою аварійно-попереджувальної сигналізації і захисту.

Сепаратори на 15 млн^{-1} , насоси та інше обладнання в місцях можливого витоку нафтових залишків (шламу) повинні бути забезпечені пристроями для збору витоків. На вертикальній ділянці трубопроводу зливу очищеної води після сепаратора має бути передбачено пристрій для відбору проб якомога ближче до випускного отвору сепаратора.

Якщо є обмеження (робочі і/або установчі), які Регістр вважає необхідними, це повинно бути вказано в прикріпленій до обладнання табличці.

Будь-яке електричне обладнання, яке є частиною сепаратора, має бути встановлено у вибухонебезпечному місці або має бути визнано Адміністрацію як безпечне для використання у вибухонебезпечному місці. Будь-які рухомі частини сепаратора, встановлено у вибухонебезпечному місці, повинні мати конструкцію, що унеможливорює утворення статичної електрики.

Для можливості перевірки роботи сепаратора 15 млн^{-1} , а також сигналізатора на 15 млн^{-1} і автоматичного запірнього пристрою при закритому бортовому зливному клапані на ділянці зливного трубопроводу між цим клапаном і автоматичним запірним пристроєм повинен бути передбачений відвід із клапаном для зливу води назад в льяла або танк нафтовмісних льяльних вод.

Трубопроводи зливу очищеної води після сепаратора не повинні мати з'єднань з трубопроводами осушувальної (в тому числі, системи нафтовмісних льяльних вод) і баластної системи, за винятком відведення, зазначеного в попередньому абзаці, і трубопроводу рециркуляції після автоматичного запірнього пристрою.

Приймальні трубопроводи сепаратора на 15 млн^{-1} не повинні мати з'єднань з трубопроводами систем заборотної або прісної вода. Трубопроводи сепаратора можуть мати з'єднання з вищевказаними трубопроводами для цілей промивання відповідно до схваленої конструкцією сепаратора.

Рекомендована пропускна здатність сепараторів на 15 млн^{-1} , в залежності від валової місткості судна, приведена в табл. 3.1.

Таблиця 3.1.

Валова місткість судна	Пропускна здатність сепараторів на 15 млн ⁻¹ , що рекомендується, м ³ /год.
400 та більше, але менше 1600	0,5
1600 та більше, але менше 4000	1,0
4000 та більше, але менше 15000	2,5
15000 та більше	5,0

При добровільній модернізації існуючого сепаратора на 15 млн⁻¹, що має Свідоцтво про типові схвалення Адміністрації відповідно до вимог резолюції ІМО МЕРС.60 (33), з метою його удосконалення для відповідності вимогам резолюції ІМО МЕРС.107(49) шляхом установки додаткового обладнання, випробування й огляд цього додаткового обладнання повинні проводитися відповідно до резолюції ІМО МЕРС.205(62) «Керівництво та технічні вимоги 2011 року по додатковому обладнанню з метою модернізації устаткування, для фільтрації нафти, що відповідає вимогам резолюції МЕРС.60(33)».

При позитивних результатах випробувань і огляду на додаткове обладнання оформляється Свідоцтво про схвалення типу додаткового обладнання.

3.2. Технічні вимоги щодо сигналізаторів.

Сигналізатори на 15 млн⁻¹ повинні бути встановлені відповідно до правила 14 Додатку І до МАРПОЛ 73/78:

на будь-якому судні валовою місткістю 10000 і більше;

на будь-якому судні валовою місткістю 400 і більше, але менше 10000, яке перевозить водяний баласт в танках нафтового палива, в разі необхідності використання сепаратора на 15 млн⁻¹ для скидання в море такого баласту;

на будь-якому судні валовою місткістю 400 і більше, але менше 10000 в разі необхідності використання сепаратора на 15 млн⁻¹ в рейсах в межах особливих районів, визначених МАРПОЛ 73/78.

Конструкція сигналізатора на 15 млн⁻¹ повинна відповідати положенням резолюцій ІМО (А.393 (X), МЕРС.60 (33), МЕРС.107 (49)). Судна, обладнані сигналізатором, повинні мати пристрій автоматичного припинення скидання.

Розглянемо технічні вимоги нормативних документів до сигналізаторів.

Конструкція сигналізатора на 15 млн⁻¹ повинна мати типове схвалення відповідно до резолюції ІМО МЕРС. 107 (49) з поправками, внесеними резолюцією ІМО МЕРС.285 (70), (з урахуванням положень циркуляра ІМО МЕРС. 1 / Circ.643) в наступних випадках:

.1 сигналізатори на 15 млн⁻¹ змонтовані на судах, килі яких закладені 1 січня 2005 року або після цієї дати;

.2 сигналізатори на 15 млн⁻¹ замовлені 1 січня 2005 року або після цієї дати для установки на судах, килі яких закладені до цієї дати (див. Циркуляр ІМО МЕРС / Circ.420).

Сигналізатор на 15 млн⁻¹ повинен бути стійким до корозії в умовах морського середовища. У його конструкції не повинні міститися або застосовуватися будь-які небезпечні речовини, якщо тільки не буде вжито заходів, схвалені Регістром, для усунення небезпеки при його експлуатації.

Будь-яке електричне обладнання, яке є частиною сигналізатора, має бути встановлено у вибухонебезпечному місці або має бути визнано Адміністрацією як безпечне для використання у вибухонебезпечних умовах. Будь-які рухомі частини сигналізатора, встановленого у вибухонебезпечному місці, повинні мати конструкцію, що унеможливорює утворення статичної електрики.

Електричні і електронні частини сигналізаторів повинні функціонувати задовільно по завершенню екологічних випробувань відповідно до частини 3 додатка до резолюції ІМО МЕРС. 107 (49).

Час спрацювання сигналізатора на 15 млн⁻¹, тобто час, що минув з моменту зміни складу проби води, що надходить в сигналізатор, і до видачі їм остаточних свідчень, не повинно перевищувати 5 с.

Сигналізатор повинен бути оснащений електричним / електронним пристроєм, попередньо налаштованим виробником на спрацювання, коли вміст

нафти в стоці перевищує 15 млн^{-1} з одночасною подачею команди на управління автоматичним запірним пристроєм для припинення скидання за борт. Цей пристрій також має автоматично спрацьовувати щоразу, коли сигналізатор вийде з ладу, коли йде прогрів пристрою або коли пристрій знеструмлено в силу інших причин.

Рекомендується мати на борту прості засоби для перевірки відхилень показань приладу і здатності перевстановлення приладу на «нуль».

Сигналізатор повинен записувати дату, час роботи, стан сигналізації, а також робочий стан сепаратора на 15 млн^{-1} . Записуючий пристрій має також зберігати дані, щонайменше, протягом вісімнадцяти місяців і має бути здатним виводити на екран або роздруковувати протокол для офіційних перевірок в тій мірі, в якій це потрібно. У разі якщо проводиться заміна сигналізатора, слід вжити заходів з метою забезпечення збереження записаних даних протягом вісімнадцяти місяців.

З метою запобігання навмисної зміни налаштувань сигналізаторів повинні бути передбачені наступні засоби:

.1 будь-який розкриття сигналізатора, за винятком операцій по перевірці показань приладу, повинно супроводжуватися зняттям пломби;

.2 сигналізатор на 15 млн^{-1} повинен бути сконструйований так, щоб сигналізація спрацьовувала щоразу, коли йде промивка приладу чистою водою або відбувається налаштування на «нуль».

Точність показань сигналізаторів повинна бути в межах $\pm 5 \text{ млн}^{-1}$ і перевірятися калібруванням і тестуванням приладу з періодичністю, що не перевищує 5 років, або як зазначено в інструкціях виробника приладу, в залежності від того, який період менший. Калібрування і тестування сигналізаторів повинні бути виконані виробником або представниками організації, уповноваженої виробником. Акт калібрування сигналізатора на 15 млн^{-1} , що підтверджує дату його останньої перевірки, повинен бути на борту судна і його наявність і дія повинна перевірятися при оглядах для відновлення Свідоцтва ІОРР, проміжних і щорічних оглядах.

Сигналізатор на 15 млн^{-1} повинен бути змонтований на судні щодо сепаратора на 15 млн^{-1} таким чином, щоб загальний час спрацьовування (включаючи час спрацьовування самого сигналізатора) в проміжку часу між початком зливу води з вмістом нафти понад 15 млн^{-1} з сепаратора і припиненням зливу води за борт при спрацьовуванні автоматичного запірною пристрою було б настільки мало, наскільки це можливо. У будь-якому випадку цей час не має перевищувати 20 с.

Змонтований на судні пристрій для відводу нафтовмісткої льяльної води із зливного трубопроводу сепаратора на 15 млн^{-1} до сигналізатора на 15 млн^{-1} має забезпечувати потік води з необхідним тиском і витратою.

Пристрій автоматичного припинення скидання повинен забезпечувати припинення скидання нафтової суміші по сигналу сигналізатора. Пристрій повинен складатися з системи клапанів, встановлених на трубопроводі зливу очищеної води після сепаратора на 15 млн^{-1} . У разі якщо зміст нафти в скиданні перевищує 15 млн^{-1} пристрій автоматично перепускає льяльну воду, що містить нафту, в суднові льяла або танки нафтовмісних льяльних вод, запобігаючи скидання за борт.

3.3. Система автоматичного заміру, реєстрації та управління скиду нафти

Відповідно до правила 31 Додатку I до МАРПОЛ 73/78 нафтоналивні судна валовою місткістю 150 і більше, а також ПНК (FPSO і FSO) повинні бути обладнані схваленими системами автоматичного виміру, реєстрації і управління скиданням нафти (ODMCS), за винятком випадків, обумовлених в правилі 3 Додатку I до МАРПОЛ 73/78, з урахуванням резолюції ІМО МЕРС.265 (68). Застосування вищевказаного правила для FPSO і FSO має розглядатися в світлі виконання правила 34 Додатку I до МАРПОЛ 73/78. Якщо скидання всіх нафтовмісних сумішей з FPSO і FSO здійснюється в приймальні пристрої, то установка ODMCS не потрібна. ODMCS є системою, яка контролює скидання в мо-

ре нафтовмісного водяного баласту або інших нафтовмісних вод з району вантажних танків.

Вимоги до скидання при експлуатації ODMCS визначені в правилі 34 Додатку I до МАРПОЛ 73/78 з поправками, внесеними резолюцією ІМО МЕРС.265 (68).

Вимоги правила 31 Додатку I до МАРПОЛ 73/78 застосовуються до суден, які не є нафтоналивними, але мають вантажні приміщення, що спеціально побудовані і використовуються для перевезення нафти, сумарна місткість яких становить 1000 м³ і більше.

Розглянемо технічні вимоги нормативних документів до ODMCS.

До ODMCS повинні пред'являтися технічні вимоги відповідно до положень резолюції ІМО МЕРС. 108 (49) з поправками, внесеними резолюцією ІМО МЕРС.240 (65).

Вищевказана резолюції ІМО МЕРС. 108 (49) з поправками поширюється на устаткування, встановлене на нафтоналивних судах, килі яких закладені 1 січня 2005 року або після цієї дати. До нафтоналивних суден, що побудовані до цієї дати, застосовуються технічні вимоги, прийняті згідно з резолюціями ІМО А.393 (Х), А496 (ХІІ), МЕРС.13 (19) і А.586 (14).

ODMCS повинна включатися при будь-якому скиданні стоку в море і забезпечувати автоматичне припинення скидання нафтовмісної суміші, коли миттєва інтенсивність скидання нафти перевищує значення, що допускається правилом 34 Додатку I до МАРПОЛ 73/78.

ODMCS повинна ефективно функціонувати в будь-яких умовах навколишнього середовища, в яких може опинитися нафтоналивне судно при нормальній експлуатації. ODMCS повинна бути спроектована і виконана таким чином, щоб виконувалися вимоги до надійності роботи за кліматичними умовами і при механічних впливах відповідно до положень частини 2 додатка до резолюції ІМО МЕРС.108 (49) з поправками.

ODMCS повинна включати в себе обладнання, вказане в 6.1.4 резолюції ІМО МЕРС.108 (49) з поправками, в тому числі, прилад для визначення вмісту

нафти. Прилад повинен бути схвалений відповідно до положень цієї резолюції і повинен мати Свідоцтво про типове схвалення, в якому зазначено, для перевезення яких видів вантажів він може бути використаний. Прилади для визначення вмісту нафти, випробувані і представлені для типового схвалення 17 травня 2013 року або після цієї дати, повинні мати свідоцтво про типове схвалення, оформлені за формою, наведеною в резолюції ІМО МЕРС.240 (65) незалежно від того, чи призначений цей прилад для контролю сумішей біо-палив з нафтою чи ні.

Будь-яка несправність ODMCS повинна призводити до припинення скидання. Передбачається дублююче ручне управління системою, яке може бути використане в разі такої несправності.

3.4 Прилади для визначення вмісту нафти

Точність показання приладів для визначення вмісту нафти повинна бути в межах ± 10 млн⁻¹ або $\pm 10\%$ від фактичного вмісту нафти в випробуваній пробі, в залежності від того, що більше. Точність показань приладу повинна залишатися в вищевказаних межах, незважаючи на наявність в пробній воді таких відмінних від нафти забруднюючих речовин, як захоплені повітря, іржа, бруд і пісок.

Прилад повинен бути спроектований так, щоб він нормально працював в зазначених вище межах, коли подача енергії (електроенергії, стисненого повітря і т.д.) коливається в межах 10% від номінальної величини, на яку спроектовано прилад.

Прилад не повинен потребувати калібрування на борту судна при зміні типу нафти, крім внесення заздалегідь передбачених змін в калібрування відповідно до інструкції виробника. Точність показань завжди повинна залишатися в вищезазначених межах.

Час спрацювання приладу не повинен перевищувати 20 с.

Прилад може мати кілька шкал у відповідності до його передбачуваного використання. Діапазон градування шкали повинен бути не менше 1000 млн⁻¹.

Для перевірки правильності роботи приладу повинні передбачатися прості засоби для перевірки його функціонування судновим персоналом шляхом введення сигналу імітації, величина якого приблизно має відповідати половині повного діапазону шкали приладу.

Прилад або будь-яке електричне обладнання, яке є частиною приладу, повинні бути встановлені у вибухонебезпечному місці або повинні бути визнані Адміністрацією як безпечні для використання у вибухонебезпечних умовах. Будь-які рухомі частини приладу, розташовані в небезпечній зоні, виконуються таким чином, щоб виключалося утворення статичної електрики.

В приладі не повинно міститися або використовуватися ніяких небезпечних речовин, якщо не передбачені спеціальні заходи безпеки, схвалені Регістром. Прилад повинен бути стійким проти корозії в морських умовах, і має бути виготовлений з матеріалів, сумісних з нафтовмісними сумішами.

3.5. Прилади для визначення межі розділу "нафта-вода"

Відповідно до правила 32 Додатку I до МАРПОЛ 73/78 на нафтоналивних суднах валовою місткістю 150 і більше, а також на ПНК (FPSO і FSO) для швидкого і точного визначення положення поверхні розділу «нафта-вода» в відстійних танках передбачаються прилади для визначення межі розділу «нафта-вода», за винятком випадків, визначених в правилі 3 зазначеного Додатка. Для FPSO і FSO установка приладу не потрібно, якщо всі нафтовмісні суміші здаються в приймальні пристрої.

До приладів для визначення межі розділу «нафта-вода» повинні пред'являтися технічні вимоги відповідно до положень резолюції ІМО МЕРС.5 (ХШ). Прилад повинен бути схвалений відповідно до положень цієї резолюції і мати Свідоцтво про типові випробування приладів для визначення межі розділу «нафта-вода» в відстійних і інших танках.

Прилади для визначення межі розділу «нафта-вода» можуть бути стаціонарними і переносними. При застосуванні тільки стаціонарних приладів їх установка повинна бути передбачена в кожному відстійному танку. Прилади повинні визначати положення межі розділу «нафта-вода» в танку на будь-якому рівні.

Місцезнаходження стаціонарного приладу або лючки для переносного приладу повинно обиратися з урахуванням конструкції танка і впливу качки судна. Органи управління і індикатор положення межі розділу «нафта-вода» стаціонарних приладів повинні розташовуватися в посту управління вантажними операціями або в подібному приміщенні.

Стаціонарні прилади повинні витримувати силу удару струменя мийного обладнання танка. Прилад може бути сконструйований для визначення розділу межі рідин, що значно відрізняються по щільності. Прилад повинен бути забезпечений табличкою із зазначенням умов його застосування і необхідних обмежень. Конструкція приладу повинна допускати його установку у вибухонебезпечних приміщеннях. Прилад не повинен створювати радіюми.

Прилад повинен бути зручним і надійним. Він повинен бути виготовлений з матеріалів, стійких до впливу морської води. Прилад повинен надійно працювати в діапазоні температур навколишнього середовища від -30 до $+50$ °C.

Спрацювання приладу при переході з нафти в воду і навпаки має бути швидким і чітким. Прилад повинен забезпечувати індикацію межі розділу «нафта-вода» за допомогою пристрою, що показує. Постійна індикація межі розділу не обов'язкова. Точність приладу повинна забезпечувати індикацію межі розділу «нафта-вода» в межах ± 25 мм від фактичної. Має бути передбачена перевірка роботи приладу на борту судна.

Вимоги правила 32 Додатку I до МАРПОЛ 73/78 застосовуються також до суден, які не є нафтоналивними, але мають вантажні приміщення, що спеціально побудовані і використовуються для перевезення нафти, сумарна місткість яких становить 1000 м^3 і більше.

ВИСНОВКИ

1. Проаналізовані особливості режимів роботи ДГА змінного струму суднових електротехнічних комплексів та виявленні причини виникнення обмінних коливань потужності.

2. Побудовано модель паралельно працюючих дизель-генераторів та здійснено дослідження різних режимів роботи, з яких отримано характеристики, які дозволили визначити причини обмінних коливань потужності між паралельно працюючими дизель-генераторами.

3. У досліджуваних режимах враховувалися нерівномірна подача палива в циліндри дизеля та ланка запізнювання і ланка зони нечутливості (люфт механічних частин АРЧ та дизеля). З отриманих осцилограм можна підбити підсумки, що ланка запізнювання і ланка зони нечутливості збільшують коливання потужності між генераторами, однак основний внесок в амплітуду коливань вносить саме нерівномірна подача палива.

4. Відсутність моніторингу змін коливань активної потужності між генераторами може призвести до аварійного стану системи в цілому та невчасне реагування на проблеми паливної системи допоміжних дизелів.

5. Розроблена електрична принципова схема пристрою оцінки амплітуди низькочастотних обмінних коливань для моніторингу стану електростанції і вироблення відповідних керуючих впливів для стабілізації роботи системи в цілому.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Баранов А. П. Судовые автоматизированные электроэнергетические системы / А. П. Баранов. – М.: Транспорт, 1988. – 328 с.
2. Конкс Г. А. Мировое судовое дизелестроение. Концепции конструирования, анализ международного опыта / Г. А. Конкс, В. А. Лашко. – М.: Машиностроение, 2005 г. – 512 с.
3. Савенко А. Е. Управление параллельной работой современных судовых многогенераторных электростанций / Л. В. Вишневский, А. Е. Савенко, И. П. Козырев // Судовые энергетические установки. – 2007. – №19. – С. 87–91.
4. Токарев Л. Н. Математическое описание, расчет и моделирование физических процессов в судовых электростанциях / Л. Н. Токарев – Л.: Судостроение, 1980 г. – 119 с.
4. Болотин Б. И. Инженерные методы расчетов устойчивости судовых автоматизированных систем / Б. И. Болотин, В. Л. Вайнер. – Л.: Судостроение, 1974. – 332 с.
6. Байков П. М. Исследование периодического перераспределения нагрузки между синхронными генераторами судовых электроэнергетических систем: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.09.03 / Байков Павел Михайлович – Л., 1970. – 23с.
7. Баловнев Д. И. Исследование и управление качеством электрической энергии синхронных генераторов автономных энергоустановок: дис. канд. техн. наук. : 05.09.01 / Баловнев Денис Иванович. – Смоленск, 2003. – 219 с.
8. Болотин Б. И. Исследование параллельной работы разнотипных автоматизированных судовых ГА / Б. И. Болотин, В. Л. Вайнер // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1973 – № 5. – С. 108–117.
29. Вишневский Л. В. Управление процессом синхронизации судовых генераторов / Л. В. Вишневский, А. М. Веретенник, И. П. Козырев // Автоматизация судовых технических средств. – Вып. 15. – Одесса: ОНМА. – 2009. – С. 3–7.

10. Епифанова О. В. Оптимизация режимов работы автономных систем электроснабжения с мощными тихоходными генераторами с дизельным приводом: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.14.02 / Епифанова Ольга Викторовна. – СПб, 2007. – 22 с.

11. Дворак В.Н. Совершенствование системы регулирования генераторных агрегатов автономной судовой электростанции: дис. канд. техн. наук: 05.09.03 / Дворак Василий Николаевич. – Севастополь, 2008. – 143 с.

12. Константинов В. Н. Системы и устройства автоматизации судовых электроэнергетических установок / В. Н. Константинов. – Л.: Судостроение, 1988. – 312 с.

13. Костюк О. М. К вопросу синтеза систем автоматического регулирования возбуждения синхронных машин / О. М. Костюк // В сб.: “Проблемы технической электродинамики. Автоматизация и релейная защита электрических систем”. – Киев, Наукова думка. –1966. – С. 9–26.

14. Куцик А. С. Аналіз та синтез систем збудження машин змінного струму електромашиновентильних комплексів генерування електроенергії: Автореф. дис.

д-ра техн. наук: 05.09.03 / Куцик Андрій Степанович. – Національний ун-т "Львівська політехніка", 2007. – 40 с.

15. Климанов О. Н. Особенности математического описания параллельной работы при исследовании колебаний мощности генераторов / О. Н. Климанов, Л. Н. Токарев, В. Н. Толчеев // Труды ЦНИДИ. –1968. – вып. 56. – С. 171–189.

16. Костюк О. М. Колебания и устойчивость синхронных машин / О. М. Костюк, М. И. Соломаха. – Киев: Наук. думка, 1991. – 200 с. – ISBN 5-12-002101-8.

17. Мельник Д. А. Аналітичний адаптивний регулятор збудження синхронного генератора з інформацією про активну потужність / Д. А. Мельник, Н. П. Лукаш // Електроінформ. – 2009. – №4. – С. 9–11.

18. Морозова Ю. А. Параметры и характеристики вентильных систем возбуждения мощных синхронных генераторов / Ю. А. Морозова. – М.: Энергия, 1976. – 152 с.
19. Лозинський А. О. Структура нечіткого регулятора системи керування збудження синхронного генератора / А. О.Лозинський, А. С. Куцик // Електромашинобудування та електрообладнання. – 2006. – Вип. 66. – С. 386–388.
20. Литкенс И. В. Нелинейные колебания в регулируемых электрических системах / И. В. Литкенс. – М.: Изд. МЭИ, 1974. – 144 с.
21. Мелешкин Г. А. Переходные режимы судовых электроэнергетических систем / Г. А. Мелешкин. – Л.: Судостроение, 1971. – 158 с.
22. Савенко А. Е. Теоретичне та експериментальне дослідження роботи багатогенераторної суднової електроенергетичної системи / А. Е. Савенко // Вістник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – № 3. – С. 58–62.
23. Толшин В. И. Устойчивость параллельной работы дизель-генераторов / В. И. Толшин. – Л.: Машиностроение, 1968. – 430 с.
24. Сергиенко Л. И. Электроэнергетические системы морских судов / Л. И., Сергиенко, В. В. Миронов. – М.: Транспорт, 1991. – 264 с.
25. Шейнихович В. В. Качество электрической энергии на судах / В. В. Шейнихович, О. Н. Климанов, Ю. И. Пайкин, Ю. Я. Зубарев – Л.: Судостроение, 1988. – 160 с.
26. Правила классификации и постройки морских судов. – СПб: Российский морской регистр судоходства, 2013. – Том 2. – 718 с.
27. Acha E. Power Electronic Control in Electrical Systems / E. Acha, V. G. Agelidis, O. Anaya-Lara, T. J. Miller. – MPG Books Ltd, Bodmin, Cornwall, 2002. – 451 p. – ISBN: 0-7506-5126-1.
28. Klempner G. Operation and maintenance of large turbo generators / G. Klempner, I. Kerszenbaum. – John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2004. – 580 p. – ISBN 0-471-61447-5.

29. Hiyama T. A. Fuzzy Logic Excitation System for Stability Enhancement of Power Systems with Multi-mode Oscillations / T. Hiyama, K. Miyazaki, H. Satoh // IEEE Trans, on Energy Conversion. – 2006. – Vol. 11. – No. 2. – P. 449–454.

20. Toliyat H. A. Design of Augmented Fuzzy Logic Power System Stabilizers to Enhance Power Systems Stability / H. Toliyat, J. Sadeh, R. Ghazi // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2006. – Vol. 11. – No. 1. – P. 97–103.

21. Venayagamoorthy G.K. Two Separate Continually Online-Trained Neuro-controllers for Excitation and Turbine Control of a Turbogenerator / G. K. Venayagamoorthy, R. G. Harley // IEEE Trans, in industry applications. – 2002. – Vol. 38. – No. 3. – P. 887–893.

23. Справочник судового электротехника: в 3 т. / под ред. Китаенко Г.И. – Л. : Судостроение. – Т.1: Судовые электроэнергетические системы и устройства. – 1980. – 528с.