

Міністерство освіти і науки України
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ МОРСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Кафедра «Експлуатації суднового електрообладнання
і засобів автоматики»

Методичні вказівки до практичних занять з дисципліни

АВТОМАТИЗАЦІЯ СУДНОВИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ

Спеціальність 271 «Морський та внутрішній водний транспорт»
Спеціалізація «Експлуатація суднового електрообладнання і засобів
автоматики»

Автоматизація суднових електроенергетичних систем: Методичні вказівки до практичних занять для підготовки магістрів спеціальності 271 Морський та внутрішній водний транспорт, спеціалізація 271.03 «Експлуатація суднового електрообладнання і засобів автоматики» / Укл. В.О. Яровенко – Одеса: ОНМУ, 2025 – 40 с

Укладач: Яровенко Володимир Олексійович – завідуючий кафедрою «Експлуатація суднового електрообладнання і засобів автомат

Методичні вказівки схвалено на засіданні кафедри «Експлуатація суднового електрообладнання і засобів автоматики», протокол № N8-24/25 від 30.03.2025 року.

1. ВСТУП

Мета практичних занять - закріплення у студентів теоретичних знань, отриманих при вивченні дисципліни «Автоматизація суднових електроенергетичних систем», набуття навичок використання цих знань при вирішенні конкретних практичних завдань, прищеплення уміння роботи з довідковою і спеціальною літературою.

Заняття включають в себе:

- практичні заняття по аналізу роботи системи управління гвинтами регульованого кроку типу KaMeWa;
- практичні заняття по аналізу роботи системи управління приводом керма типу ROLLS – ROYCE;
- практичні заняття по аналізу роботи системи електронного управління двигунами ЗУЛЬЦЕР RT-FLEX;
- розрахунок струмів короткого замикання в суднових електроенергетичних установках змінного струму;
- розрахунок провалів напруги в суднових електроенергетичних системах;

Методичні вказівки щодо вирішення завдань такого типу наведені у відповідних джерелах:

– Автоматизація суднових електроенергетичних систем: Конспект лекцій для підготовки магістрів зі спеціальності 271.03 «Експлуатація суднового електрообладнання та засобів автоматики»/ Укл. В.О. Яровенко – Одеса: ОНМУ, 2023 – 112 с. <https://onmu-moodle.od.ua/course/view.php?id=1272>

– Суднова електроенергетична система Тренажер суднової електроенергетичної установки ERS 4000 “General Cfrgo” / Яровенко В.О., Машин В.М. / Методичні вказівки / Одеса: ОНМУ. 2021. – 66 с.

<https://onmu-moodle.od.ua/course/view.php?id=1272>

– Букарос А.Ю., Яровенко В.О. Розрахунок та моделювання перехідних процесів в суднових автоматизованих електроенергетичних системах. [методичні вказівки до практичних занять та самостійної роботи] / А.Ю. Букарос., В.О. Яровенко – Одеса: – ОНМУ. 2023 – 59 с.

<https://onmu-moodle.od.ua/course/view.php?id=1272>

– Автоматизовані суднові пропульсивні комплекси: методичні вказівки до самостійної роботи для студентів спеціальності 271.03 «Експлуатація суднового електрообладнання та засобів автоматики» / В.О. Яровенко, О.І. Зарицька. – Одеса: ОНМУ, 2021. – 31 с. (Електронна бібліотека)

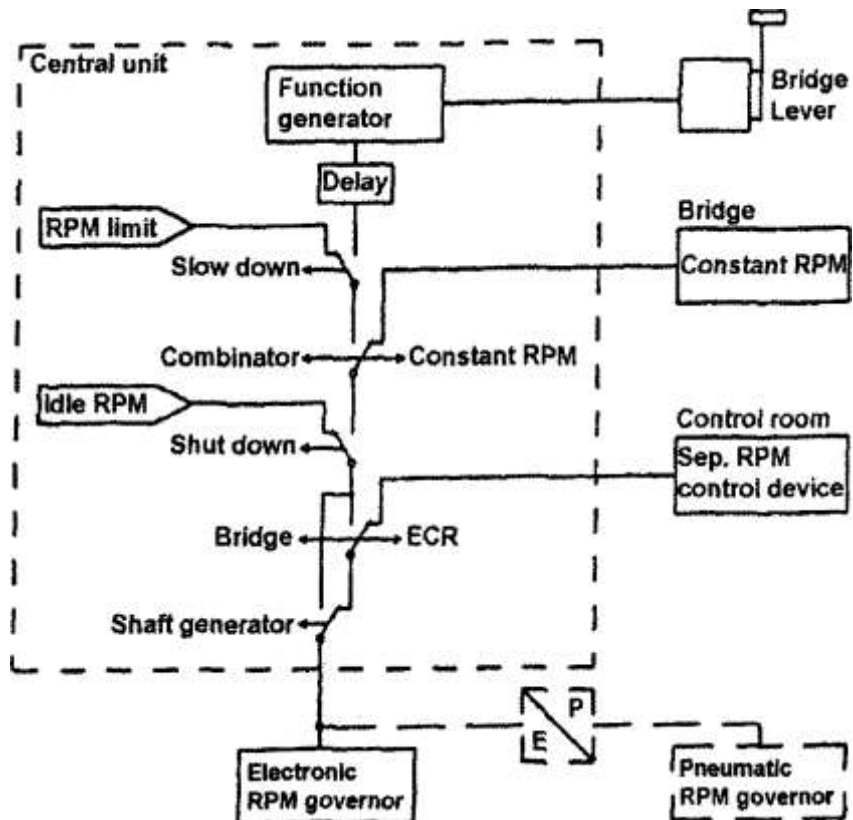
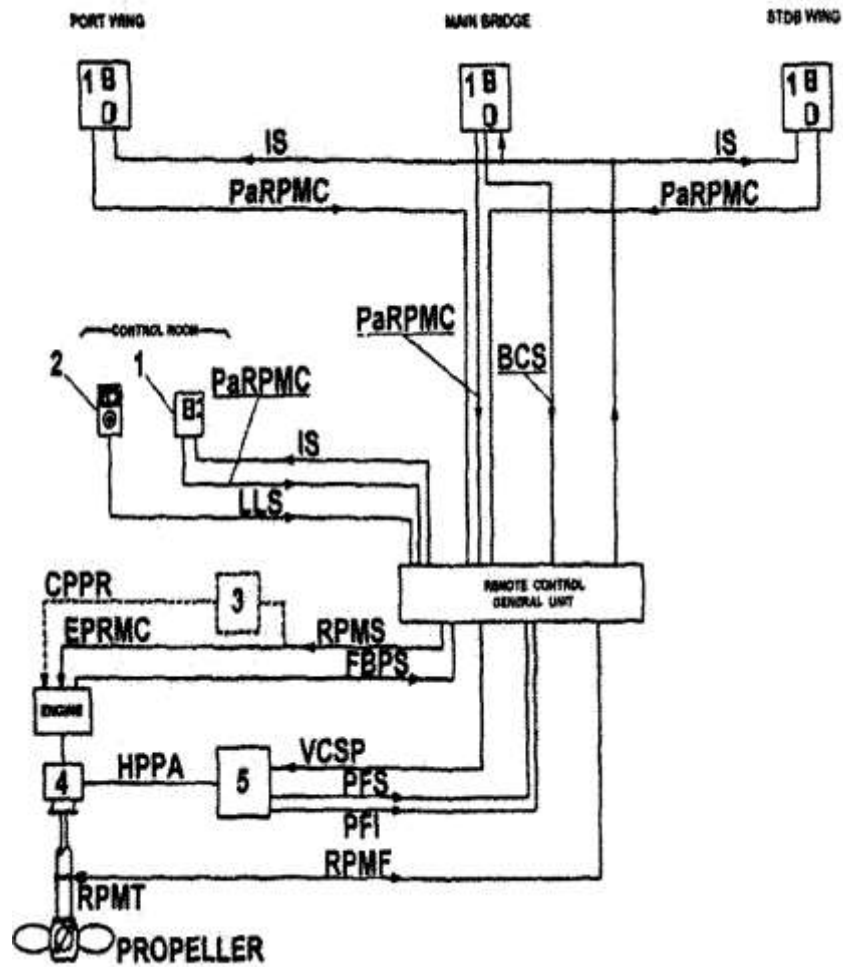
<https://onmu-moodle.od.ua/course/view.php?id=1272>

Робочі матеріали, щодо практичних занять наведено у цих методичних вказівках.

Більш детальну інформацію, довідкові дані і інше студент може почерпнути з довідкової та навчальної літератури.

2. Комплект схем щодо

СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ГРК ТИПУ КАМЕВА
(шведської фірми АВ Karlstad Mekaniska Werkstadt)



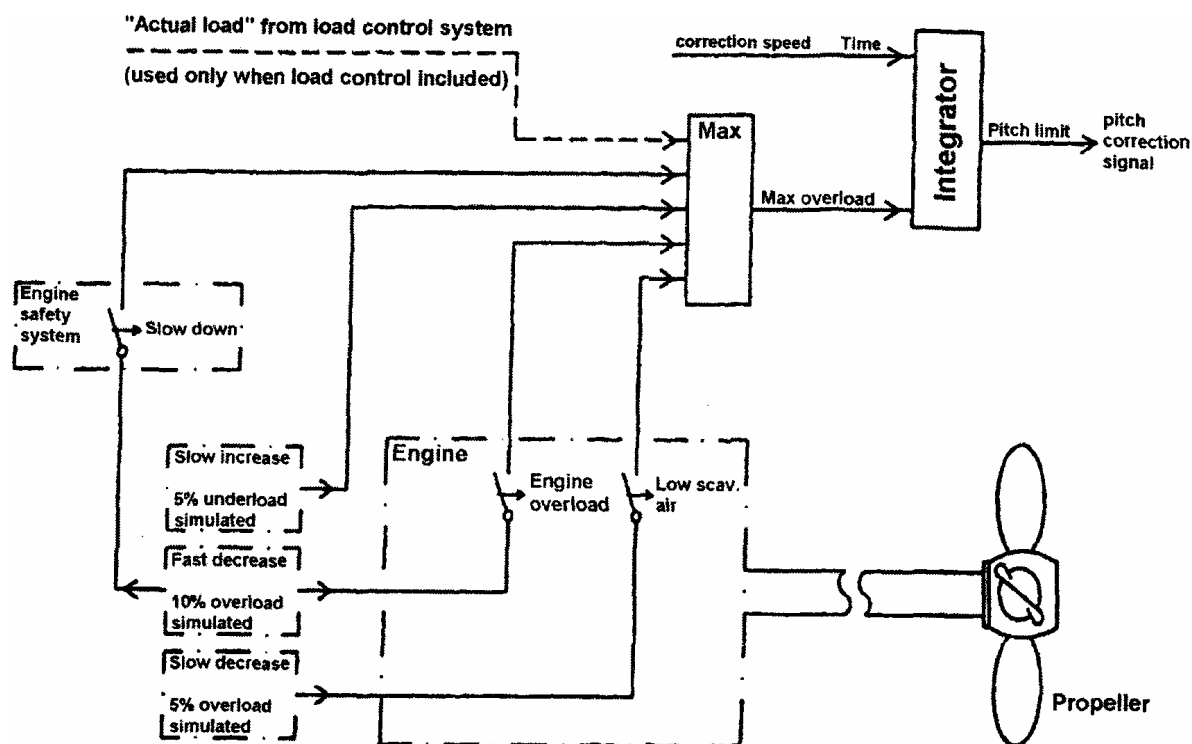
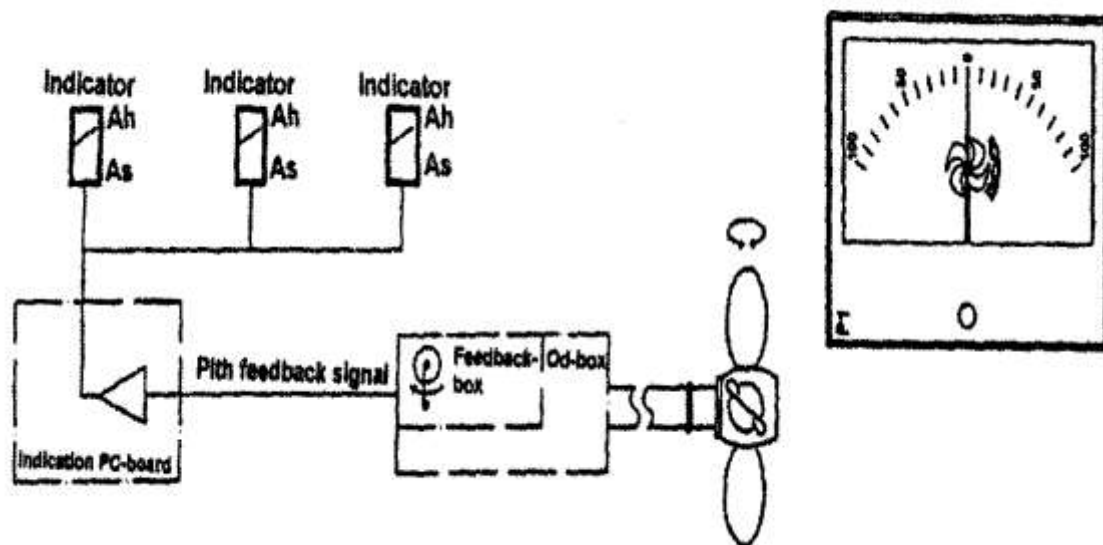


Рис 3.5 Функция защиты от перегрузки



Рис. 1. Пульт мостика



Рис. 2. Пульт машинного відділення

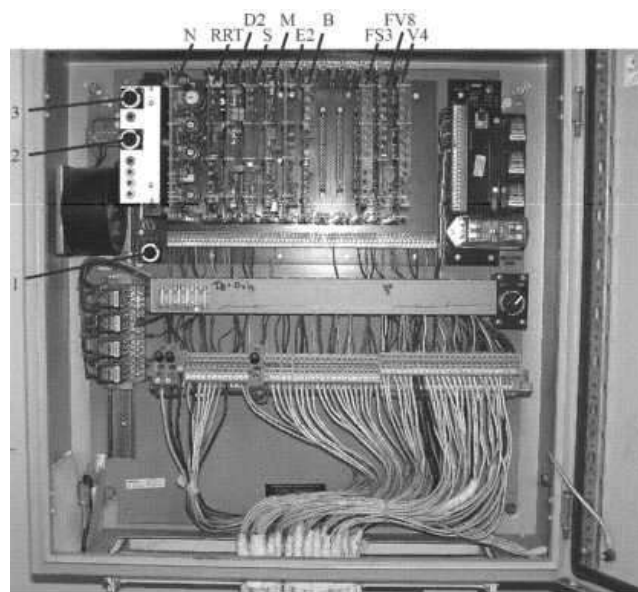


Рис. 3. Центральний блок з потенціометрами:
1 – регулювання «бистродії» плати М; 2 и 3 - налагоджування печатних плат

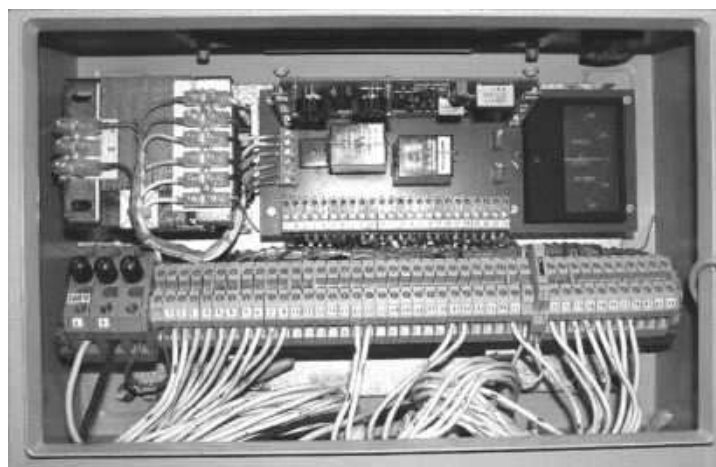


Рис. 4. Блок резервного управління

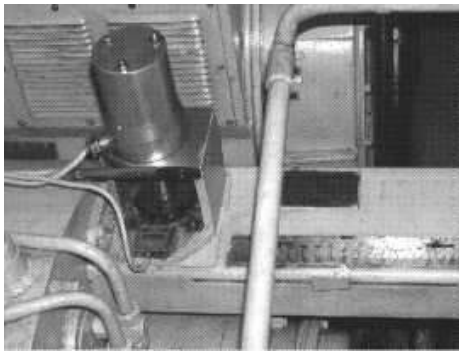


Рис. 5. Датчик ходу допоміжного сервомотору

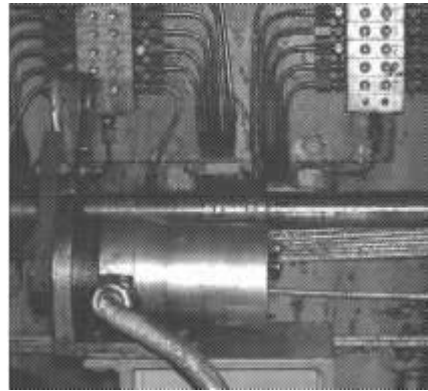


Рис. 6. Датчик ходу рейки паливних насосів

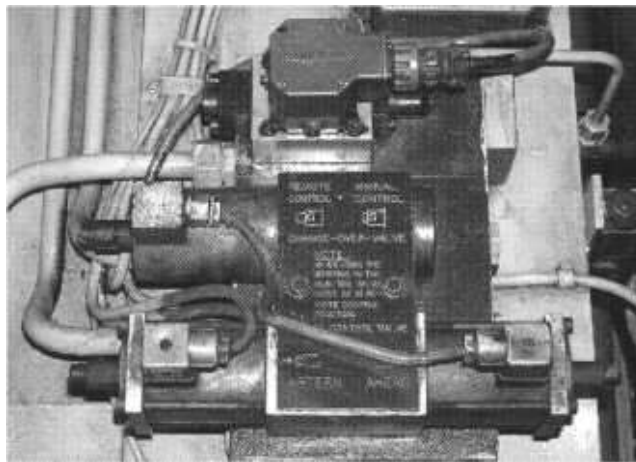


Рис. 7. Клапан управління подачі мастила КЕХЯОТН і елементи ручного управління

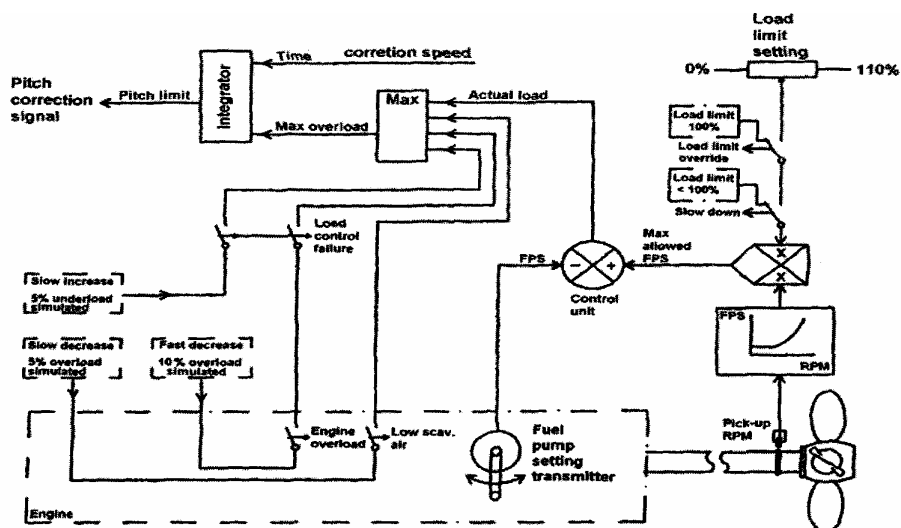
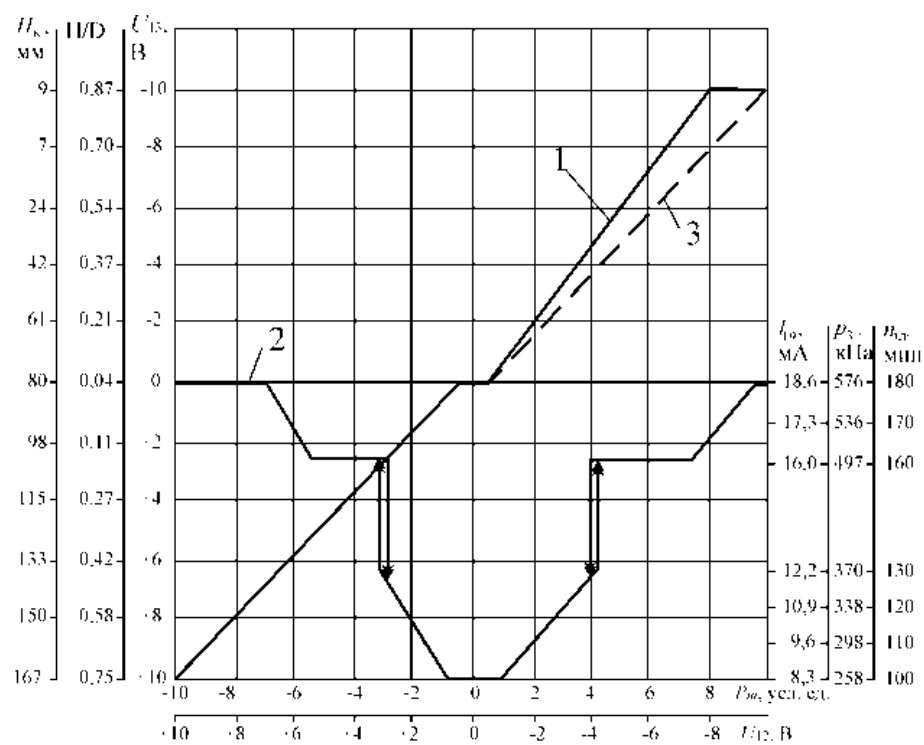


Рис 3.6 Функция оптимального управления нагрузкой



3. Комплект схем щодо

СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПРИВОДОМ КЕРМА

ROLLS – ROYCE

Рис 1 Схема
системи управління
рульовою установкою з
соленоїдними
клапанами

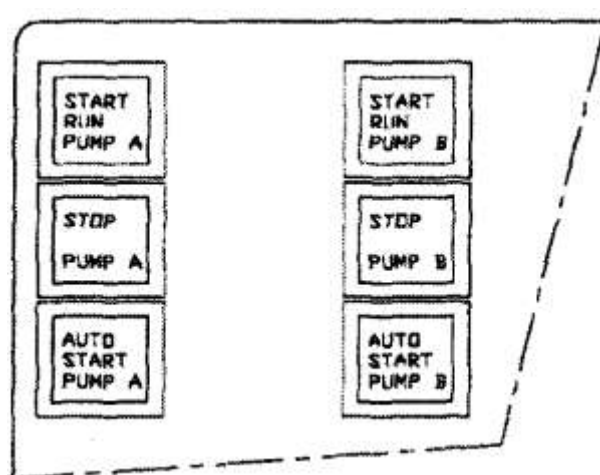
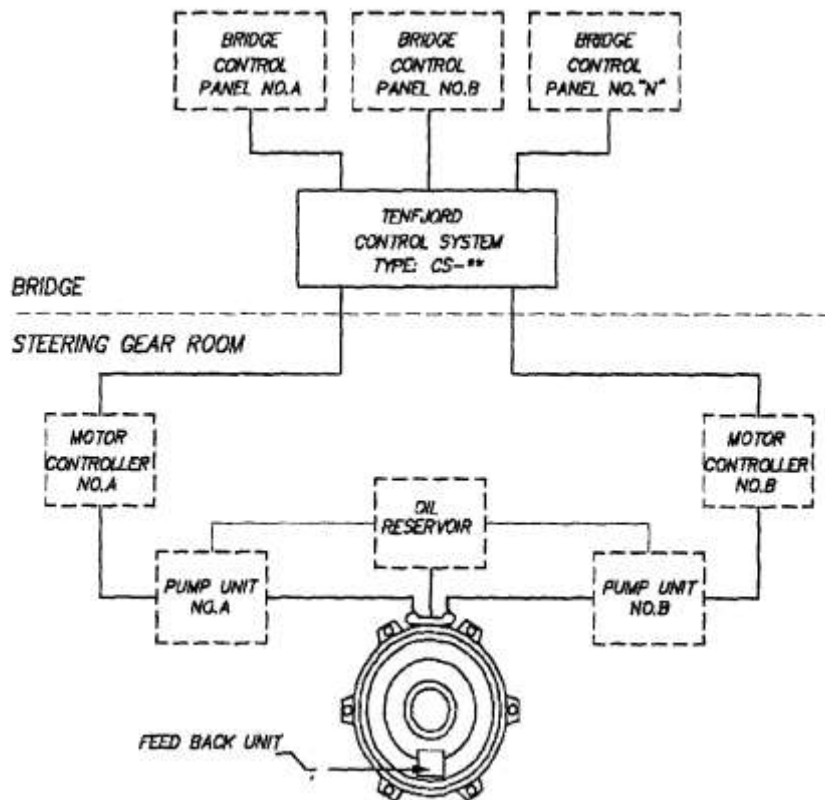


Рис. 2 Панель дистанційного управління насосами

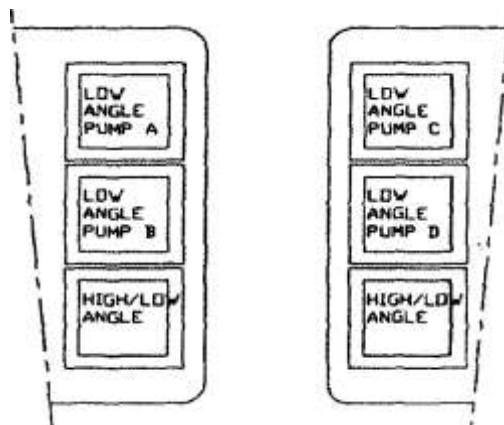


Рис. 3 Панель вибору кута перекладки керма

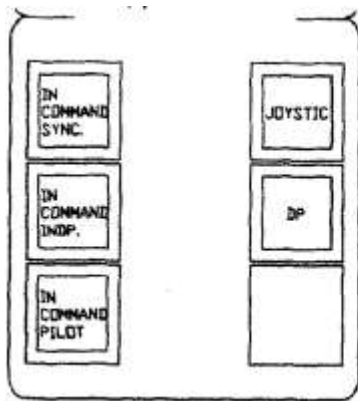


Рис. 4. Панель выбору режима работы приводом керма

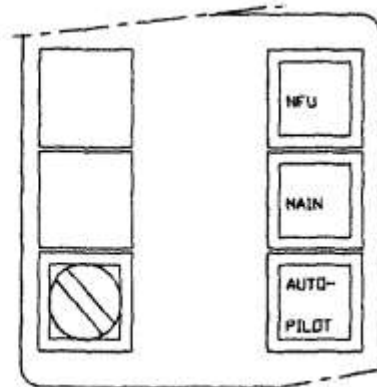


Рис..5 Панель выбору вида управління

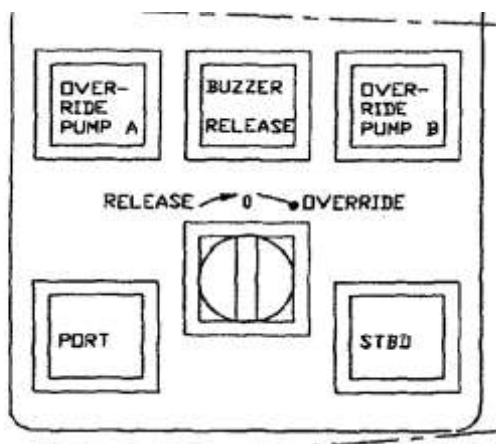


Рис. 6 Панель выбору вида управления

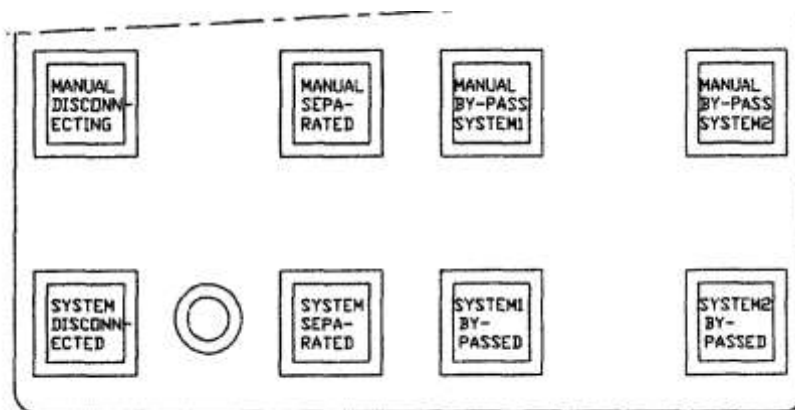


Рис. 7 Панель управління

JUMPER DESCRIPTION

JP1 --> EXTERNAL OVERRIDE.



NORMALLY SET IN POSITION "YES" FOR APPLICATION WITH (2*ACTUATORS, 4*PUMPS). ALL 4 PUMPS WILL BE SET TO POSITION "OVERRIDE" REGARDLESS OF WHICH OF THE UNITS THAT IS ACTIVATED.

FOR APPLICATION WITH (1*ACTUATOR, 2*PUMPS) THE JUMPER SHALL BE SET TO POSITION "NO"

JP2 --> OVERRIDE LIGHT DIMMED.



NORMALLY SET TO POSITION "NO", OVERRIDE LIGHT NOT DIMMED.

JP3 --> BUZZER CONNECTED.



THE OVERRIDE FUNCTION CAN BE SUPPLIED WITH AN AUDIBLE ALARM.

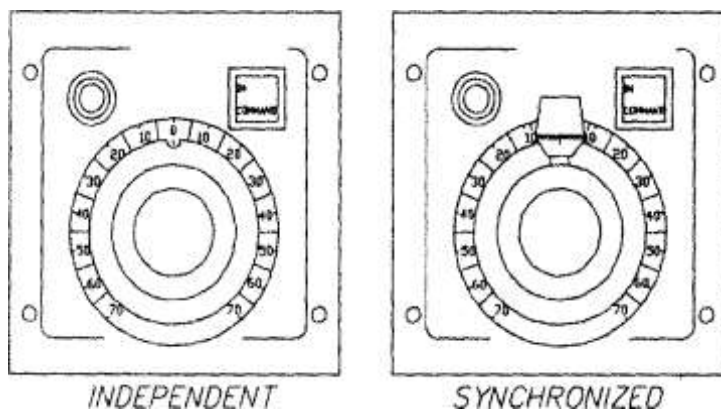


Рис. 8 Рукоятки незалежного і синхронізованого управління двома кермами

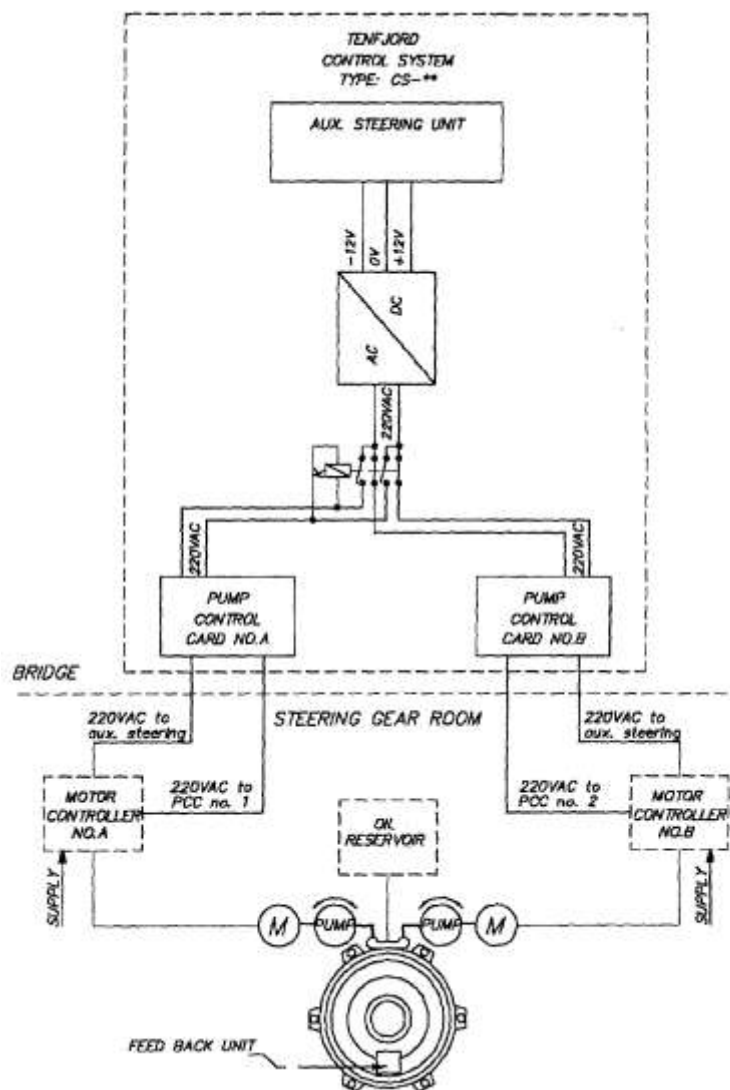
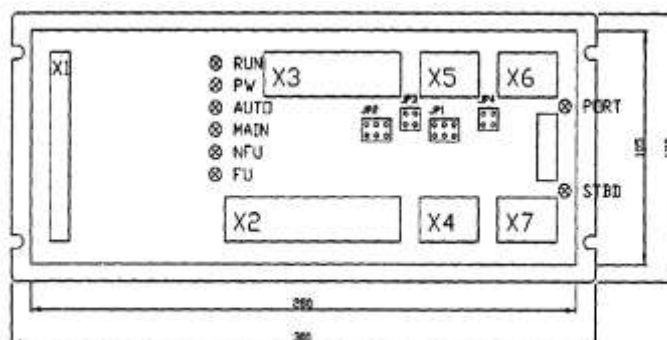


Рис. 9 Узагальнена схема системи управління



LED DESCRIPTION

- ⊗ RUN → PUMP RUN SIGNAL
- ⊗ PW → INTERNAL POWER
- ⊗ AUTO → EXTERNAL AUTOSTART SIGNAL
- ⊗ MAIN → NFU MAIN STEERING SELECTED
- ⊗ NFU → NFU STEERING SELECTED
- ⊗ FU → FU FROM AUX. STEERING SELECTED
- ⊗ PORT → PORT STEERING SIGNAL
- ⊗ STBD → STBD STEERING SIGNAL

JUMPER DESCRIPTION

JP1/2 → STEERING SIGNAL COMMON + OR -

☐ - ☐ +

JP3 → NFU MAIN STEERING OVERRIDE

☐ YES ☐ NO

JP4 → NFU STEERING OVERRIDE

☐ YES ☐ NO

Рис. 10 Карта управління насосом

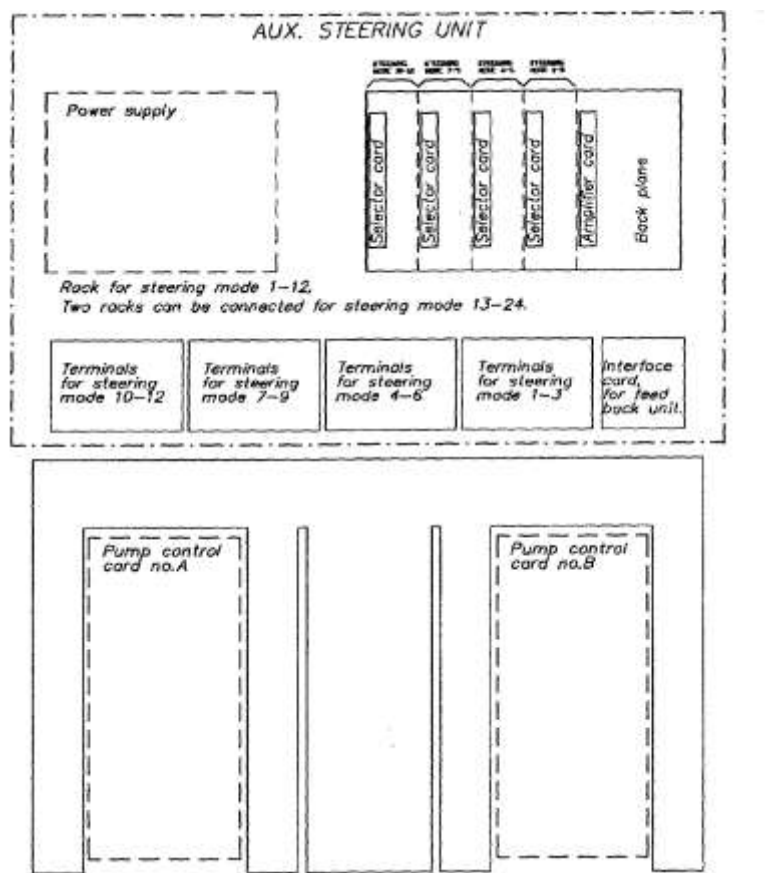


Рис. 11 Плата Aux. Steering unit

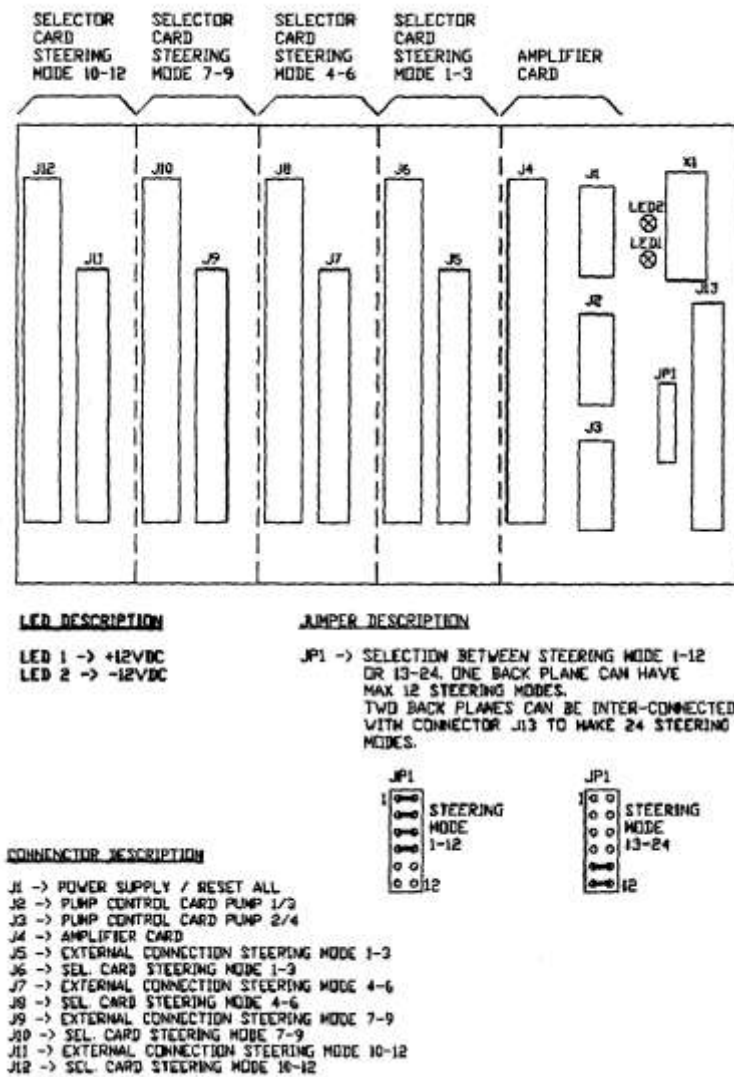
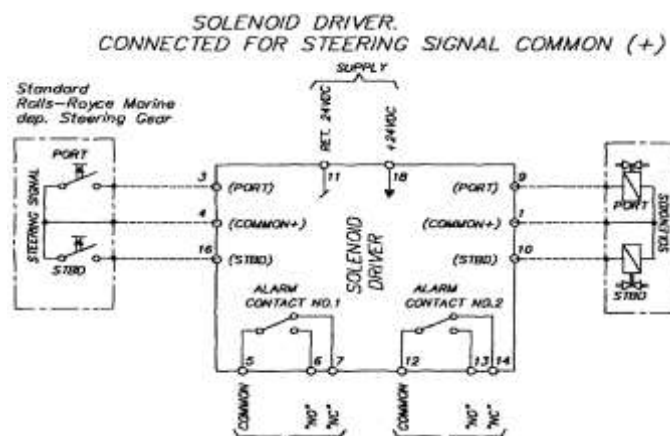


Рис. 12 Схема панелі з'єднання та опис її компонентів



INTERFACE FOR AUTOPILOT

Example (1 * Rudder actuator, NFU, 2* pump)

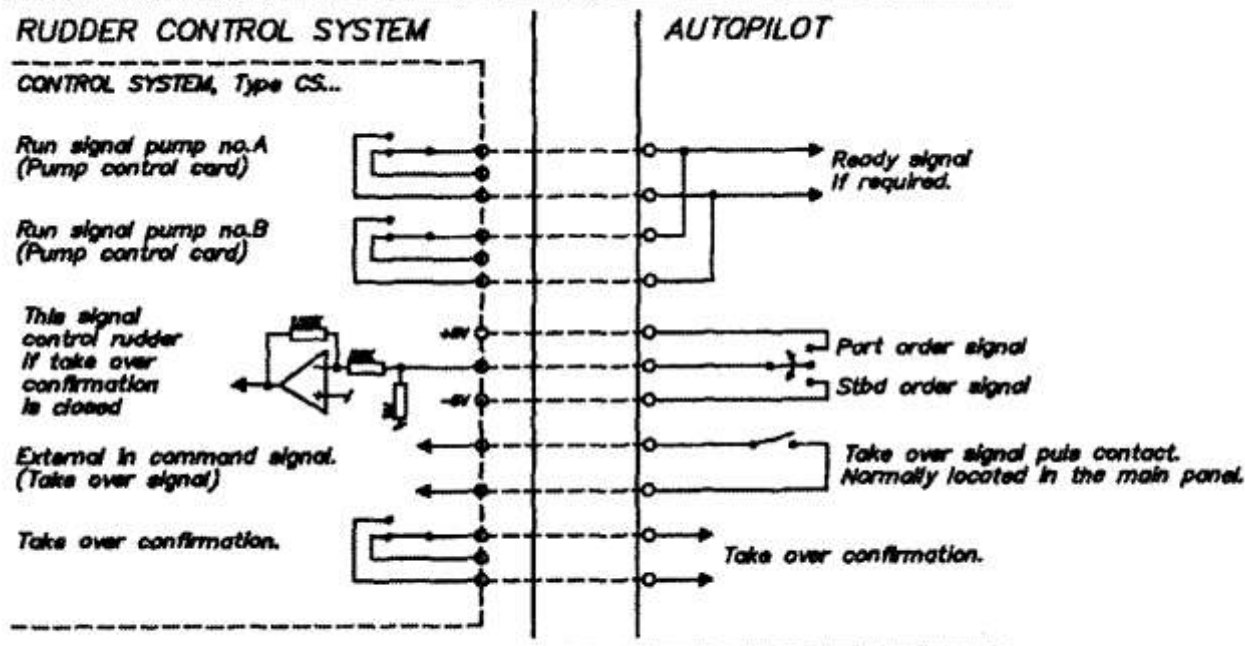
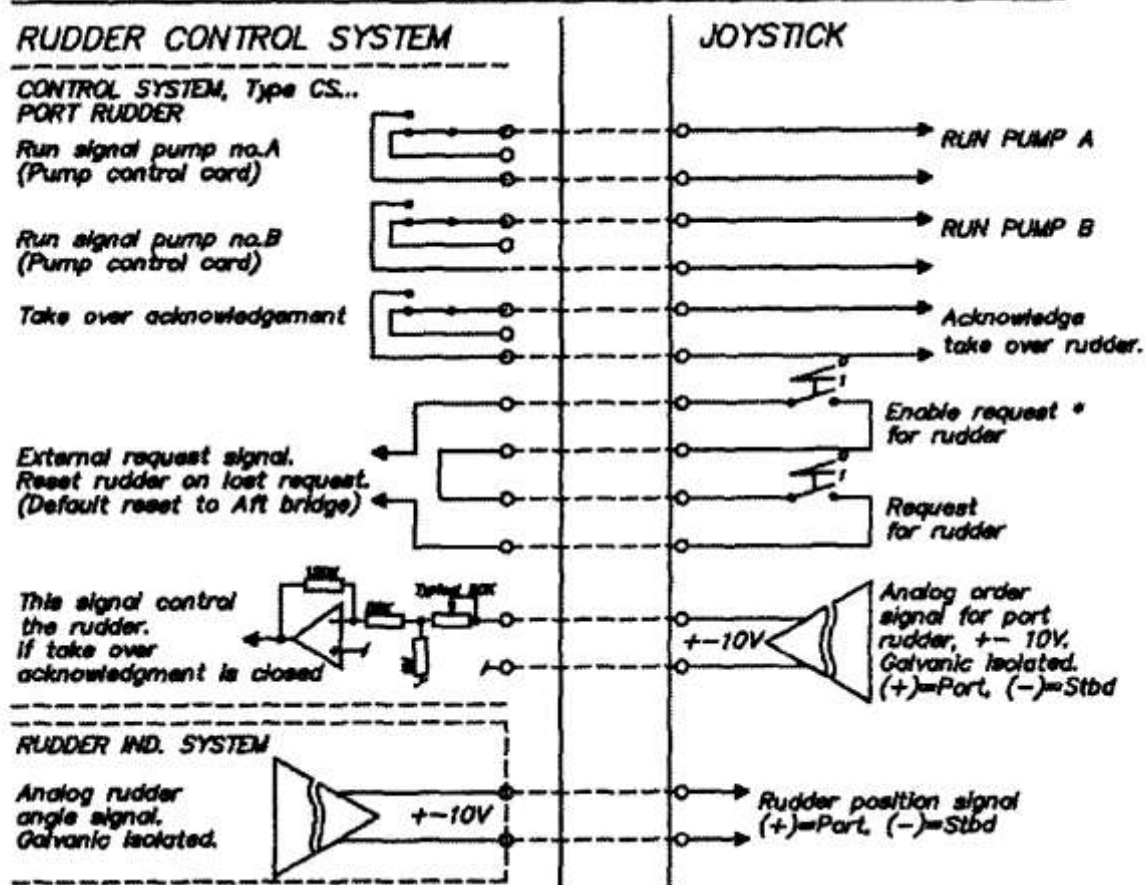


Рис. 4.16 Интерфейс системы управления рулевой установкой с авторулевым

INTERFACE FOR JOYSTICK

Example (1 * Rudder actuator, FU, 2* pump)

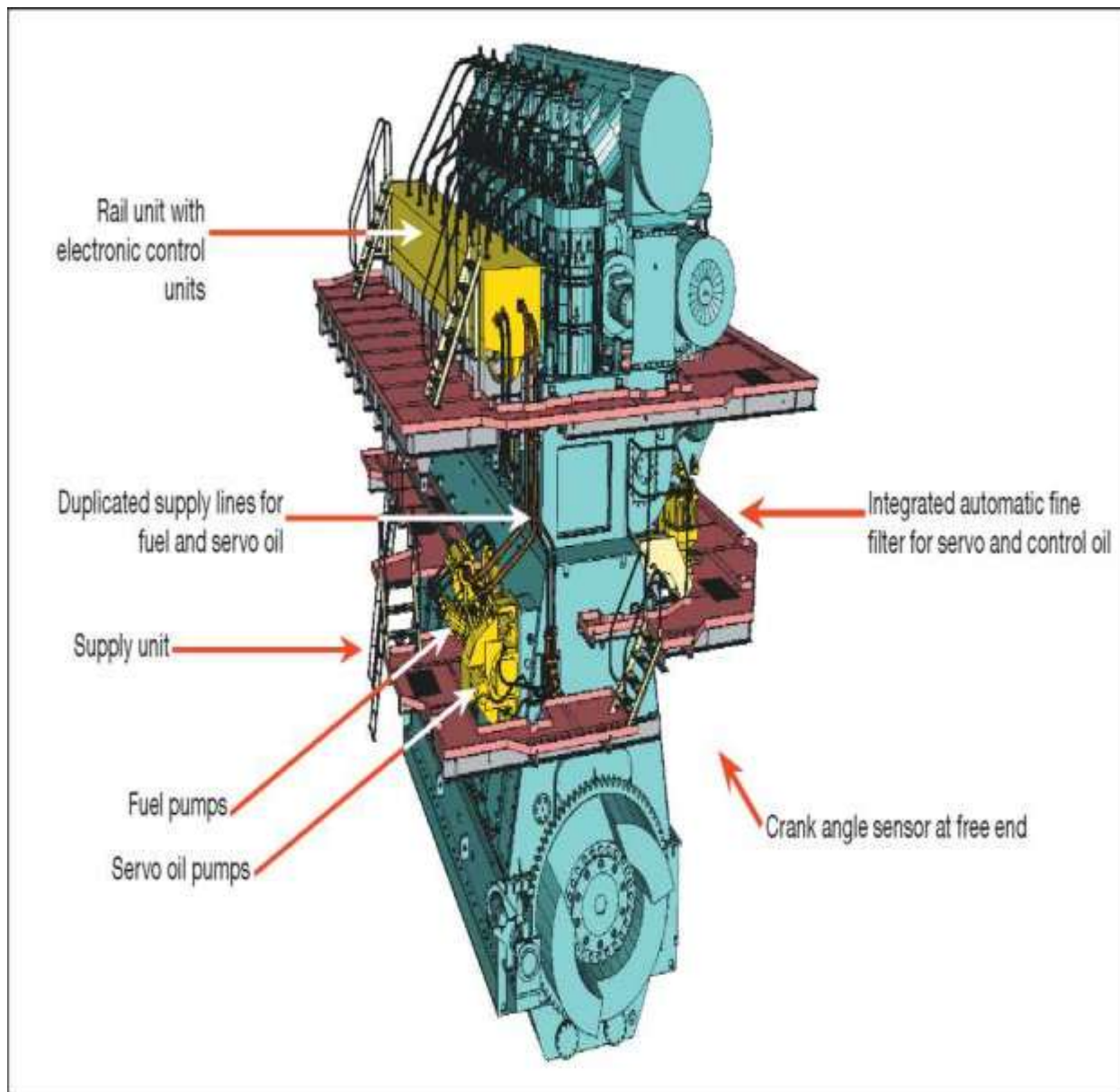


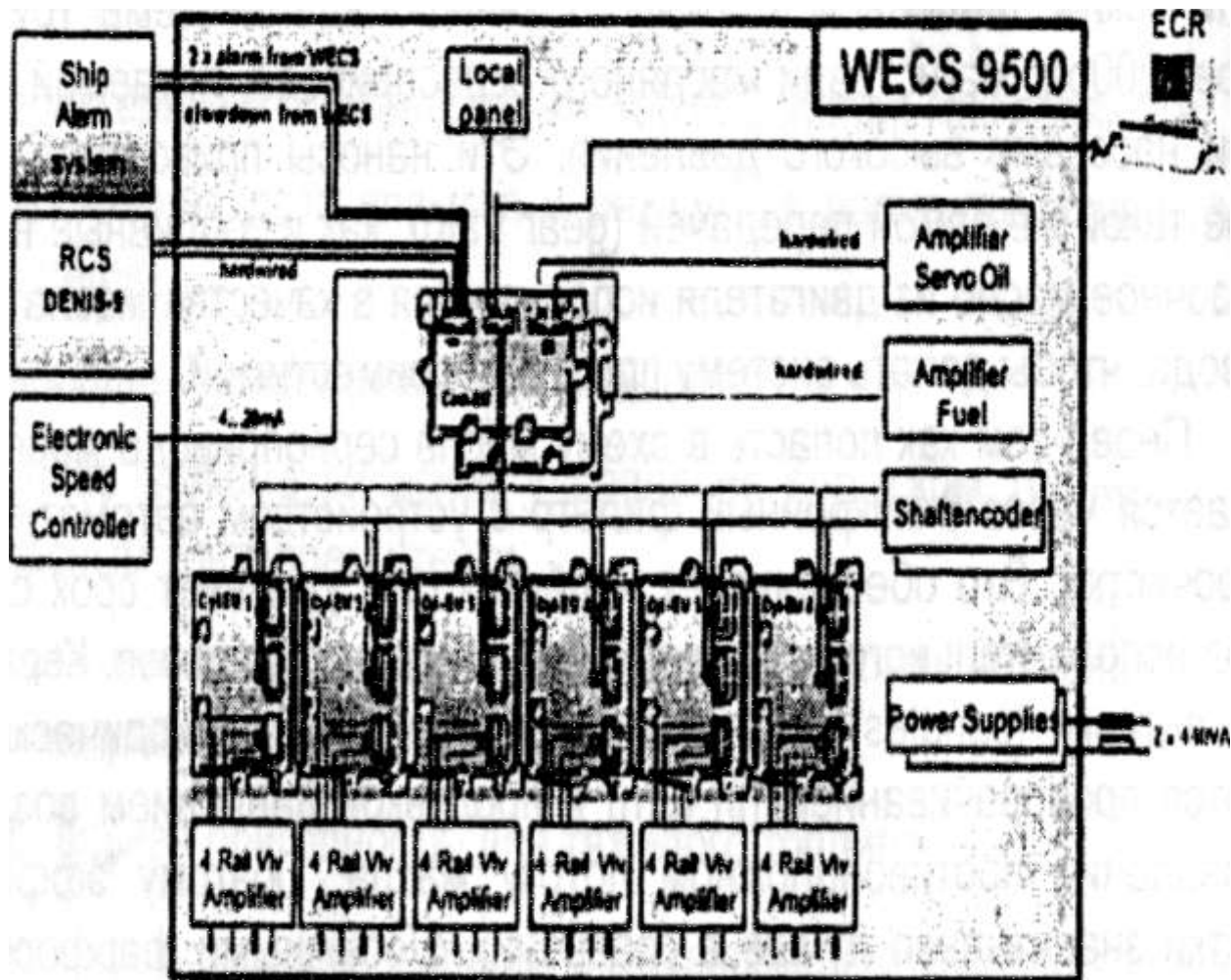
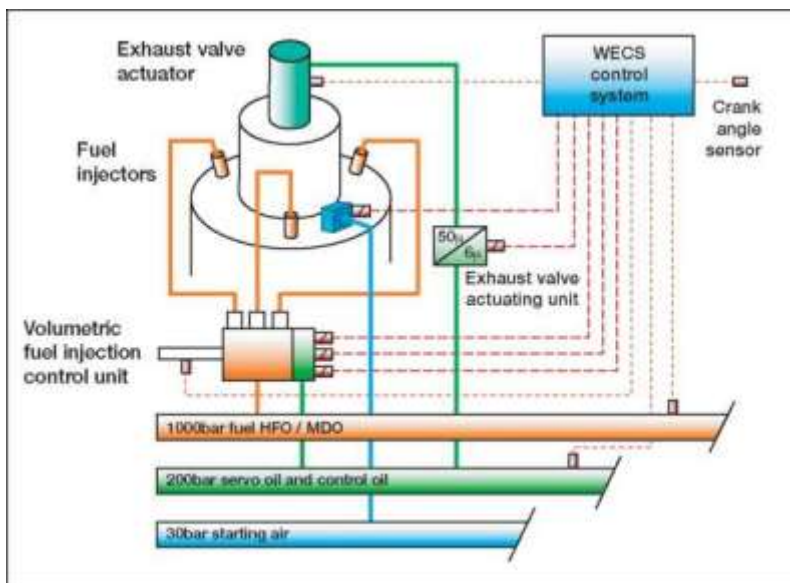
4. Комплект схем щодо

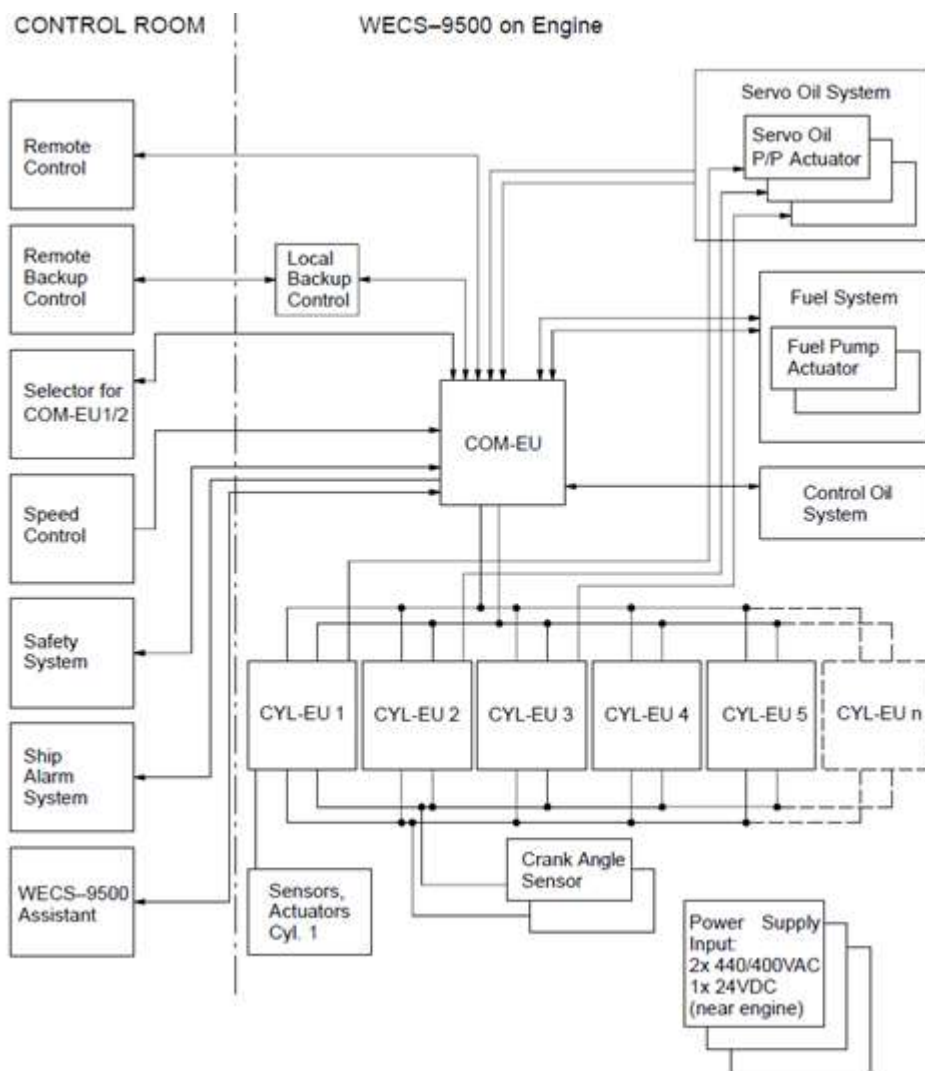
**ЕЛЕКТРОННОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ
ДВИГУНАМИ**

ЗУЛЬЦЕР RT-FLEX

Загальний вид двигуна







Блок-схема системы WECS-9500

COMMON ELECTRONIC UNIT (COM-EU)

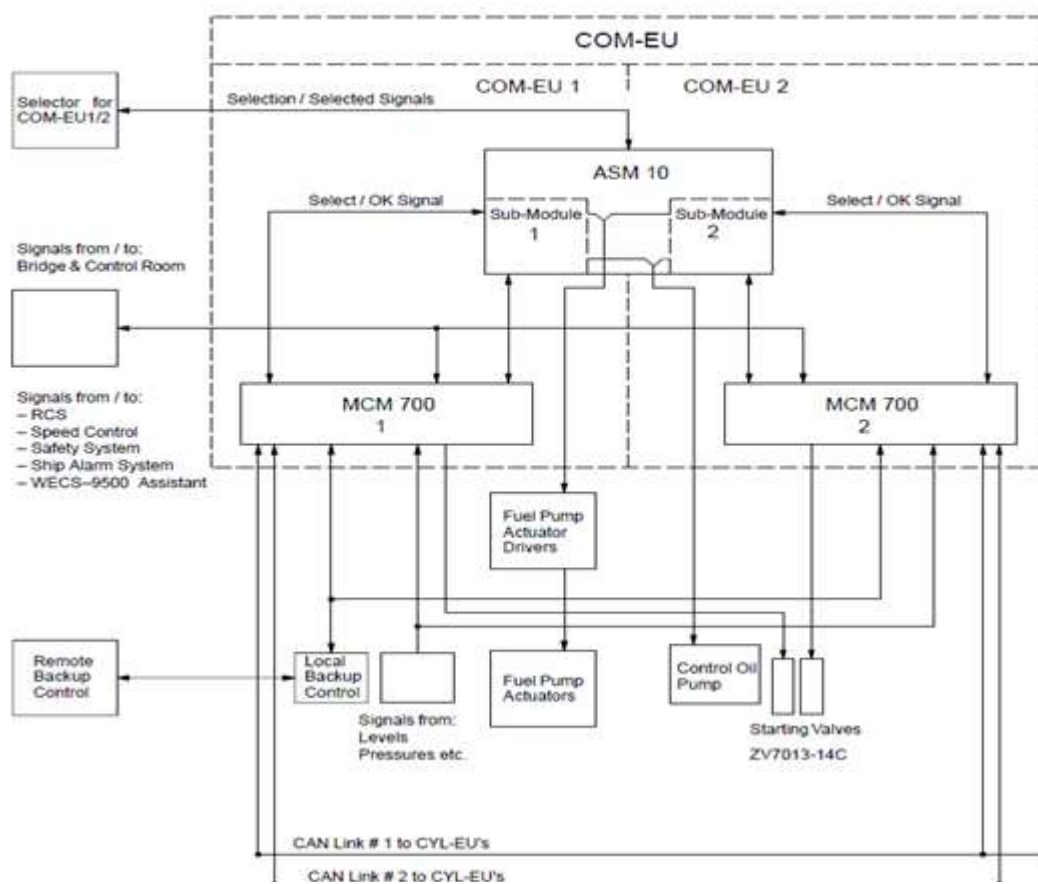
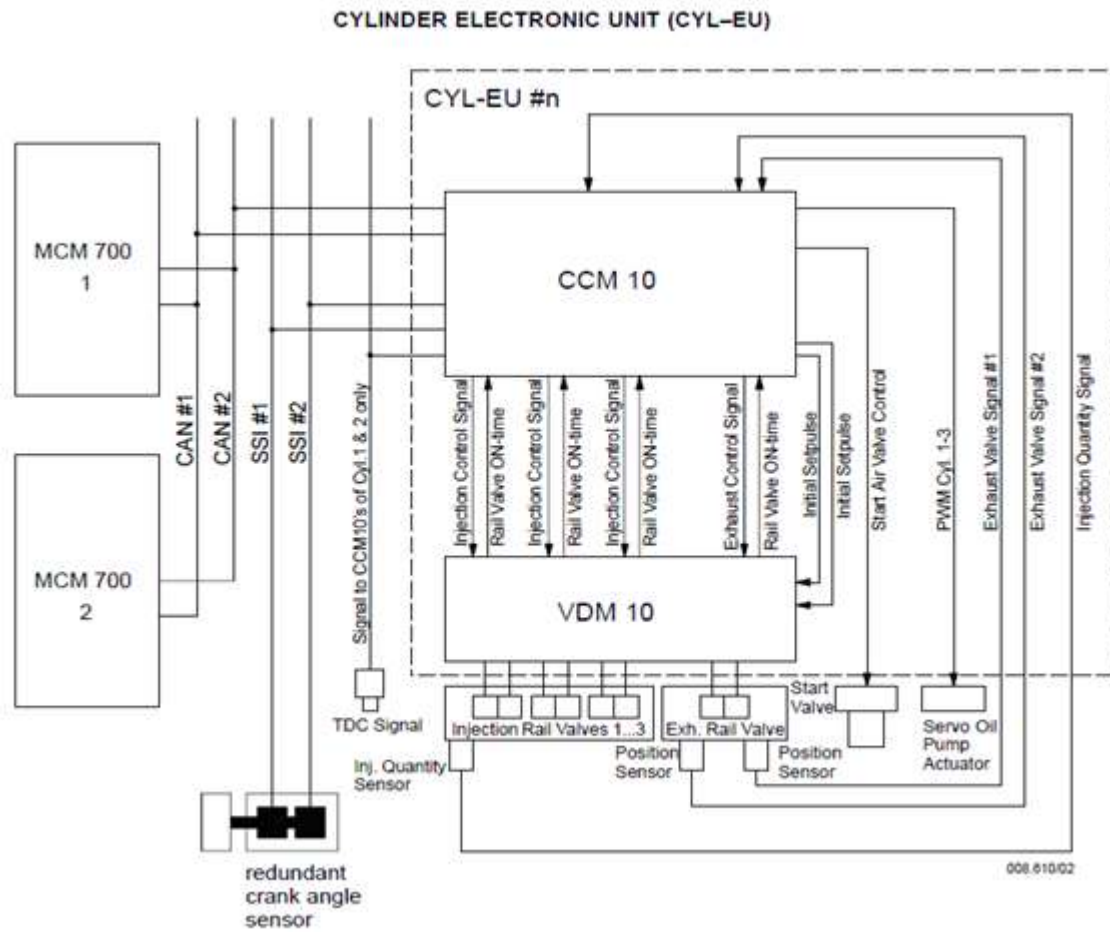


Рис 2.34 Функціональна схема модуля COM-EU



Функціональна схема електронного блоку CYL-EU



Електронні блоки контролю

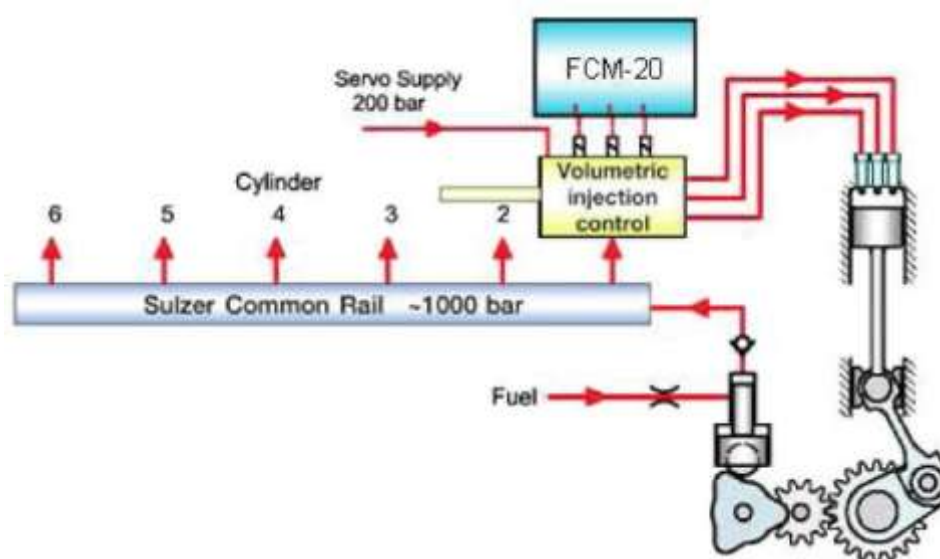


Схема системи управління вприском палива

).

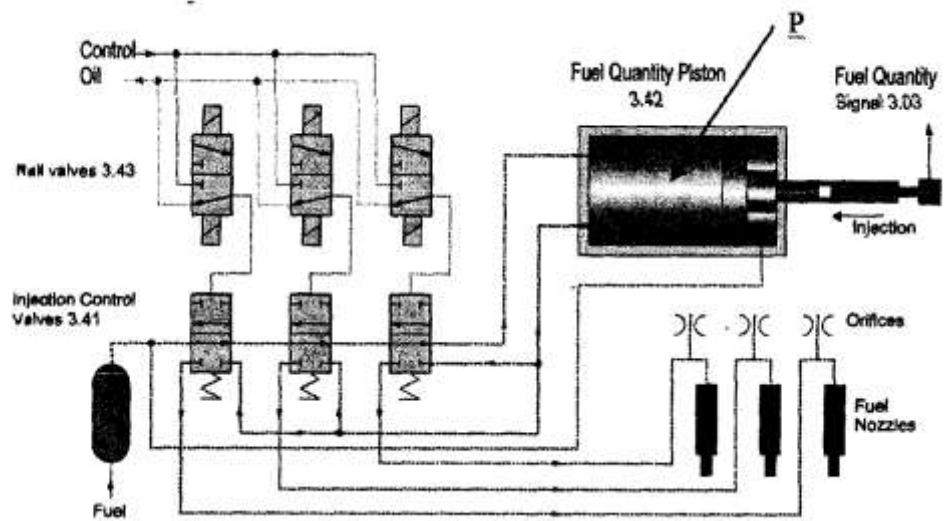
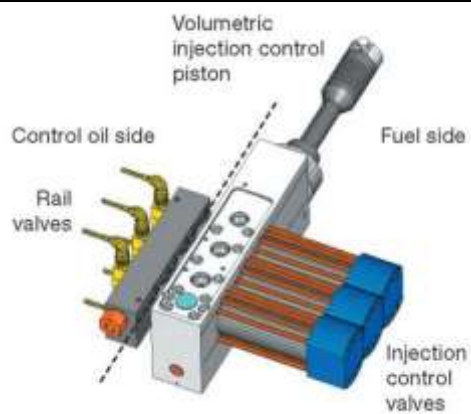
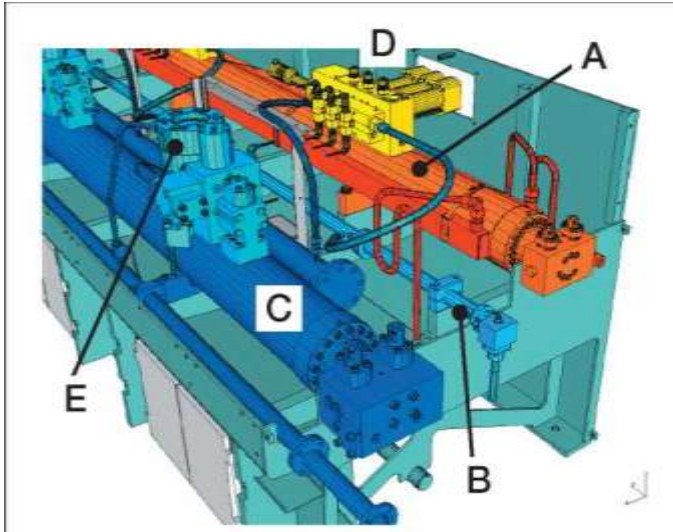
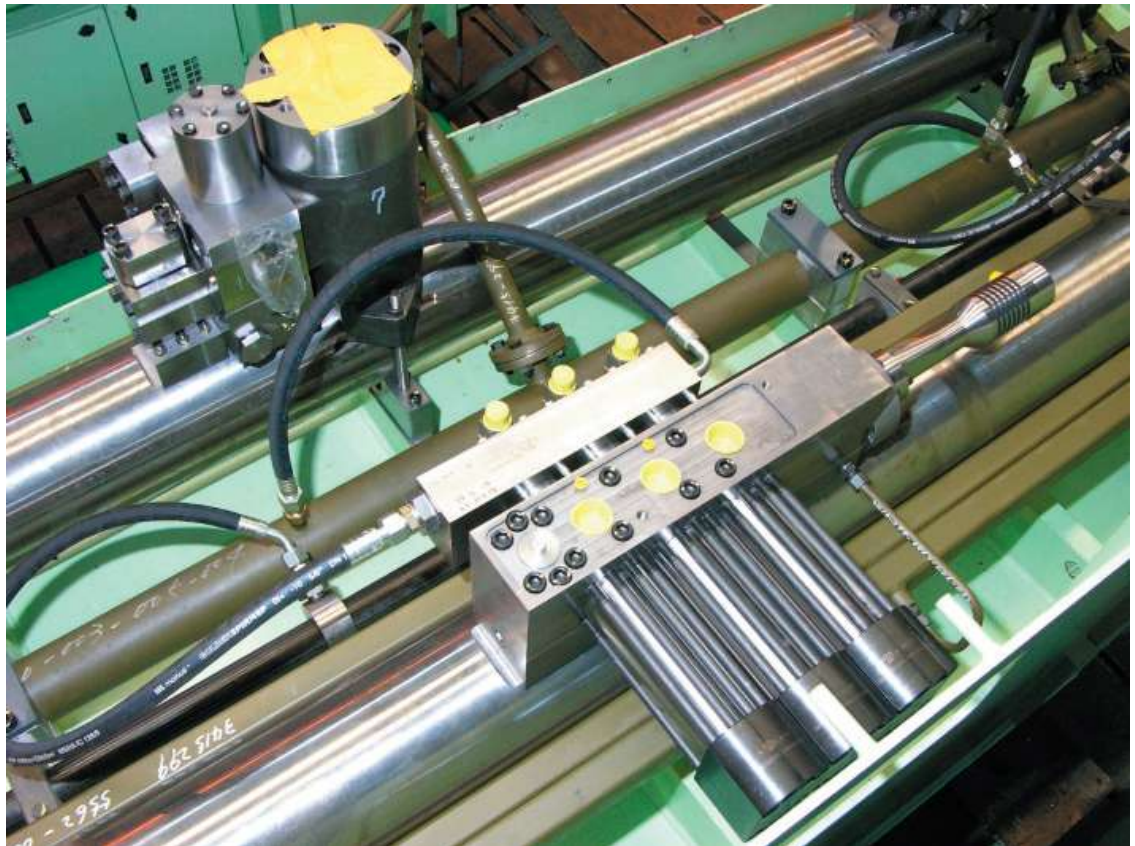


Схема блоку впрыска палива



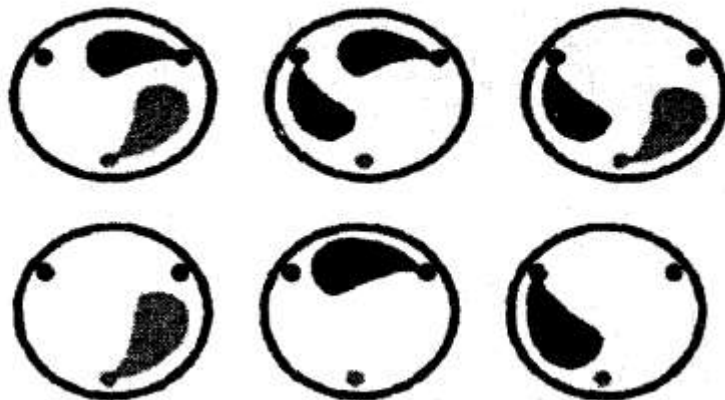


Usual operation
nozzle operation
3 nozzles
in unison

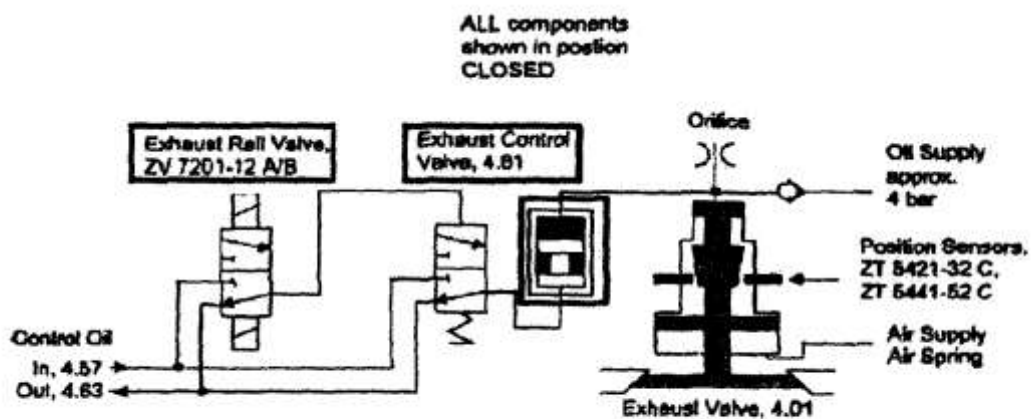


Smokeless operation at low speed

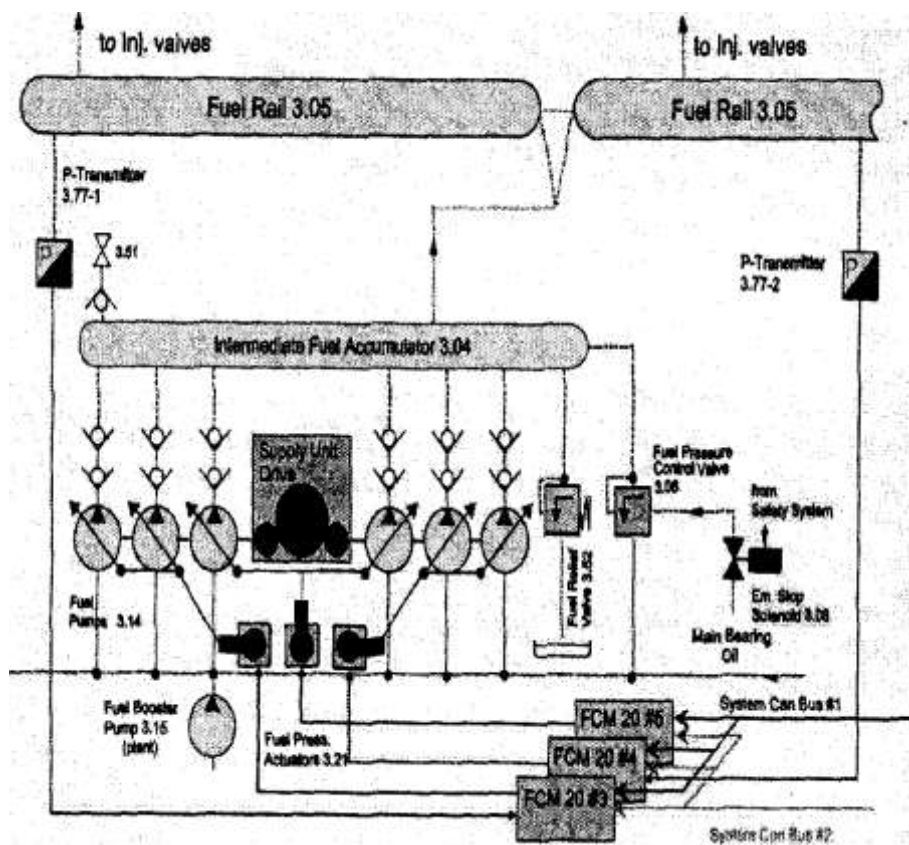
Alternative2

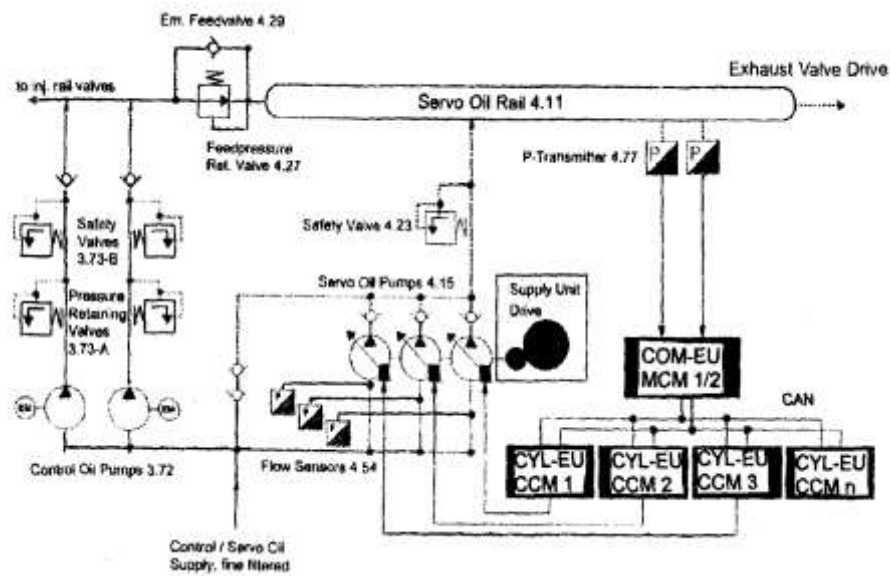
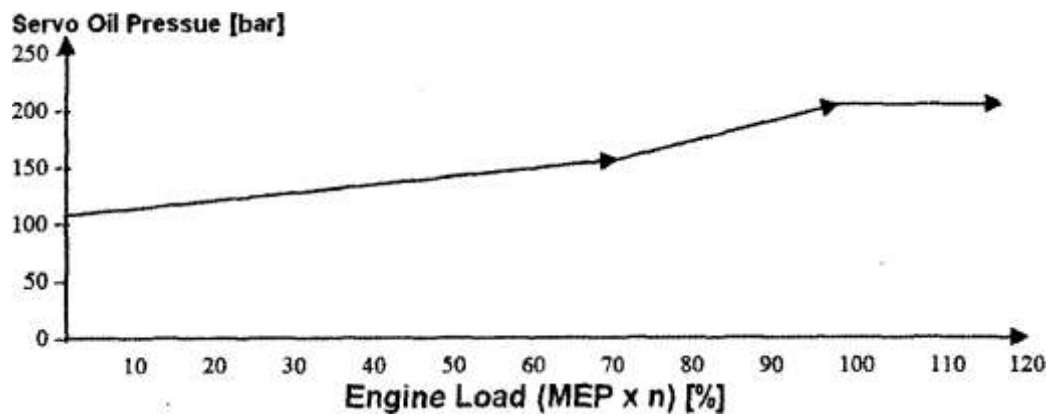
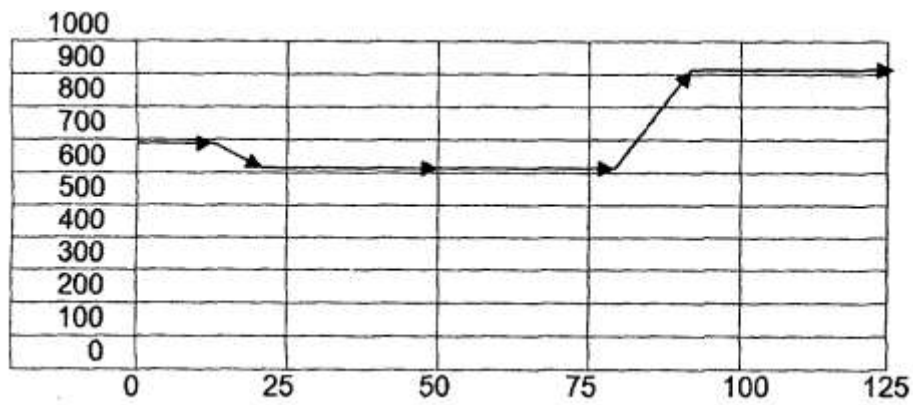


Alternative 1 nozzle operation smokeless operation down to 12% rpm



Block diagram of exhaust valve control





5. РОЗРАХУНОК СТРУМІВ КОРОТКОГО ЗАМКНЕННЯ В СУДНОВИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВКАХ

Розрахунок струмів короткого замикання починають зі складання розрахункової схеми електроенергетичної системи у однолінійному (принциповому) зображенні (рис. 5.1). В розрахункову схему включають усі тривало паралельно працюючі генератори із зазначенням їх типів, потужностей і т.п. На схемі вказують довжину та перетин кабелів і шин, трансформатори струму та напруги, автомати та усі інші елементи, передбачається враховувати в розрахунку. потім на схему наносять передбачувані точки короткого замкнення. Кількість цих точок вибирають зтаким розрахунком, щоб були перевірені всі комутаційні і захисні апарати. Кожну точку короткого замикання для перевірки конкретного апарату слід вибирати так, щоб апарат при короткому замиканні знаходився в найбільш важких умовах, які можуть виникнути в експлуатації.

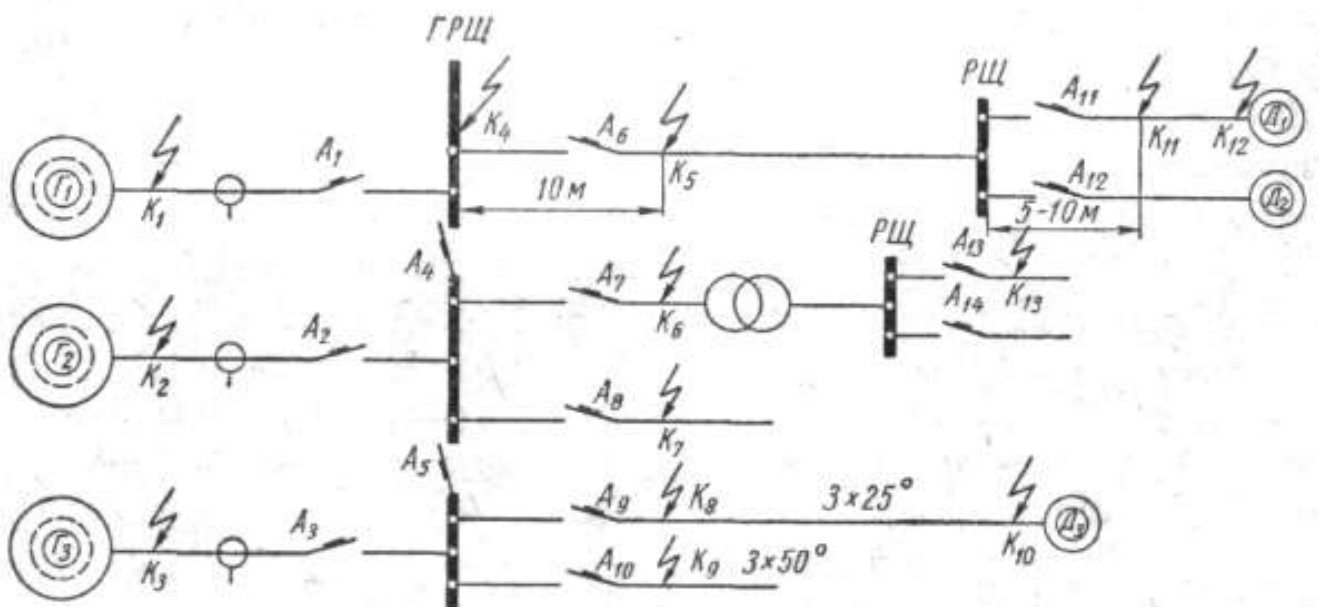


Рис. 5.1. Розрахункова схема струмів короткого замикання СЕС

Генераторний автомат А1 перевіряється по струмом к. з. у точці К1. При цьому через нього буде проходити струм короткого замикання від паралельно працюючих генераторів Г2 і Г3. Автомат А2 перевіряється по струму к. з. у точці К2 и т. п. Якщо потужність всіх генераторів однакова, то досить перевірити тільки один з генераторних автоматів. При паралельній роботі двох генераторів перевірку їх автоматів необхідно проводити по

струму к.з. в точці K4 (т.е. на шинах ГРЩ) У цьому випадку струм буде більше, ніж при к.з. в точці K1 або K2.

По струму к.з. в точці K4 необхідно перевіряти всі секційні автомати A4— A5.

Автомат відходять від ГРЩ живильних ліній A6-A7-A8-A9-A10 перевіряють в загальному випадку по струмів к.з. в точках K5-K6-K7-K8-K9, які вважаються віддаленими від ГРЩ на 10 м. У тому випадку, коли відомо, що даний споживач розташований в одному приміщенні з електростанцією, точку к.з. приймають на затискачах цього споживача (наприклад K10).

При наявності креслень, кабельної траси для споживачів, розташованих поза приміщенням електростанції, точку к.з. приймають на відстань під кабельний через перегородку.

Автомати розподільних щитів A11-A12 перевіряють по струмів к.з. в точці K11 на відстані 10 м від РЩ для великих суден і 5 м для малих суден або на відстані, що визначається в залежності від розташування споживача, як викладено вище

Автомат розподільних щитів A13 і A14, розташованих за трансформаторами напруги, перевіряють по струмів к.з., якщо потужність трансформатора становить не менше сумарної потужності генераторів електростанції.

Якщо, наприклад, автомати A10 і A9 однакового типу, що мають однакові номінальні струми, живлять рівновіддалені споживачі, то треба починати розрахунок з перевірки автомата A10 по точці K9 на кабелі більшого перетину (до автомата A9 підключено кабель меншого перерізу). Якщо при цьому автомат A10 буде динамічно і термічно стійкий при к.з. в точці K9, то автомат A9 можна не перевіряти по струму к.з. в точці K8.

В цілому це може значно скоротити кількість точок, в яких необхідно вважати струми к.з.

На підставі розрахункової схеми складають схему заміщення (рис. 5.2). У неї включають зверхперехідний опір генераторів x_1 , x_5 , x_9 , активні опори обмоток статорів генераторів r_1 , r_5 , r_9 і всі інші активні і реактивні опори елементів розрахункової схеми, попередньо приведені до прийнятим в розрахунку базисних умов.

За базисом потужність приймається сумарна потужність всіх генераторів, включених в розрахункову схему, а за базисну напругу - номінальна напруга на шинах електростанції. Потім схему заміщення перетворюють до найпростішого виду щодо кожної прийнятої для розрахунку точки короткого замикання. При цьому враховують, що точка короткого замикання має напругу, рівне нулю; а в міру віддалення від точки короткого замикання до джерела напруги збільшується. Електрорушійні сили всіх паралельно працюючих генераторів приймають однаковими. Тому опору генераторних гілок вважають включеними паралельно. Опору всіх інших гілок вважаються включеними між собою послідовно.

Схему заміщення перетворюють стільки раз, скільки заплановано до розрахунку точок короткого замикання. Кожен раз в результаті перетворення

схеми заміщення знаходять результуючий (еквівалентний) опір $Z_p = \sqrt{r_p^2 + x_p^2}$, по якому за допомогою так званих розрахункових кривих визначають струми короткого замикання.

Наприклад, для знаходження результуючого опору при к.з. в точці К4 необхідно скласти в кожній генераторній гілці активні й реактивні опори (окремо). Потім знайти еквівалентну со-опір трьох паралельних гілок.

Знаходження опору при к.з. в точках К5-К6 і т.д. необхідно додавати до опору, отриманого для точки К4, опір гілок відповідних живильних ліній.

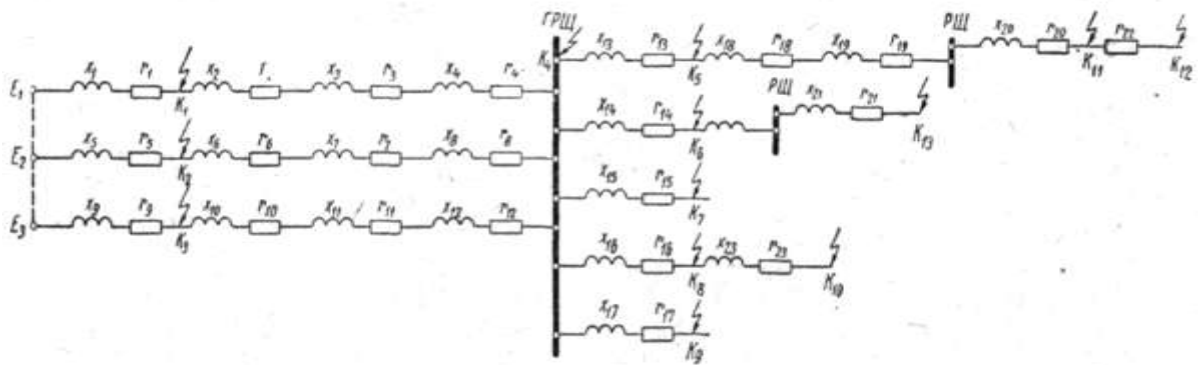


Рис. 5.2. Розрахунок струмів короткого замикання СЕС змінного струму

Досить простим і зручним для практики методом розрахунку струмів к.з. в електроенергетичних системах змінного струму є метод розрахункових кривих.

Розрахункові криві представляють собою в відносних одиницях (рис. 2.3) залежність діючого значення періодичної складової струму короткого замикання I_k (в різні моменти часу від початку до. 3.) Від величини результуючого опору Z_p до розрахункової точки короткого замикання. Сімейство розрахункових кривих побудовано за середніми параметрами генераторів серії МС з урахуванням дії системи автоматичного регулювання напруги при наявності вугільного регулятора напруги. При розрахунках струмів короткого замикання в СЕС з іншими типами генераторів (МСК, ГСС і ін.), параметри яких дуже сильно відрізняються від генераторів. Криві, зображені на рис. 3, можна використовувати при цьому тільки для орієнтованих розрахунків.

Наприклад, генератори серії МСК мають великі активні й реактивні опори і менші постійні часу в порівнянні з генератором МС. Тому струми короткого замикання в СЕС з генераторами МСК менше по амплітуді і швидше загасають (розрахункові криві для МСК можна знайти в літературі)

Криві рис. 2.3 побудовані для різних моментів часу після початку короткого замикання, а саме: для t , яке дорівнює 0; 0,01; 0,05; 0,1; 0,15; 0,25; 0,4 та 0,6 сек. та $t = \infty$.

Граничним значенням опору короткого замикання прийнято $Z_p = 2,0$, так як при $Z_p > 2,0$ періодичність складова струму к.з. змінюється незначно і можна вважати, що її початкове значення залишається незмінним протягом усього процесу замикання. Характерною особливістю розрахункових кривих струмів к.з. для генераторів з автоматичним регулятором напруги є взаємне перетин кривих, так як при наявності автоматичного регулятора і достатньої віддаленості точки короткого замикання струм к. з. після деякого зниження знову зростає (у часі).

Для побудови розрахункових кривих використана найпростіша схема, ВКВ надана на рис. 1.3. У цьому випадку прийнято, що генератор до виникнення короткого замикання працював з навантаженням, що дорівнює 75% від номінальної, при $\cos\varphi = 0,8$ і номінальному

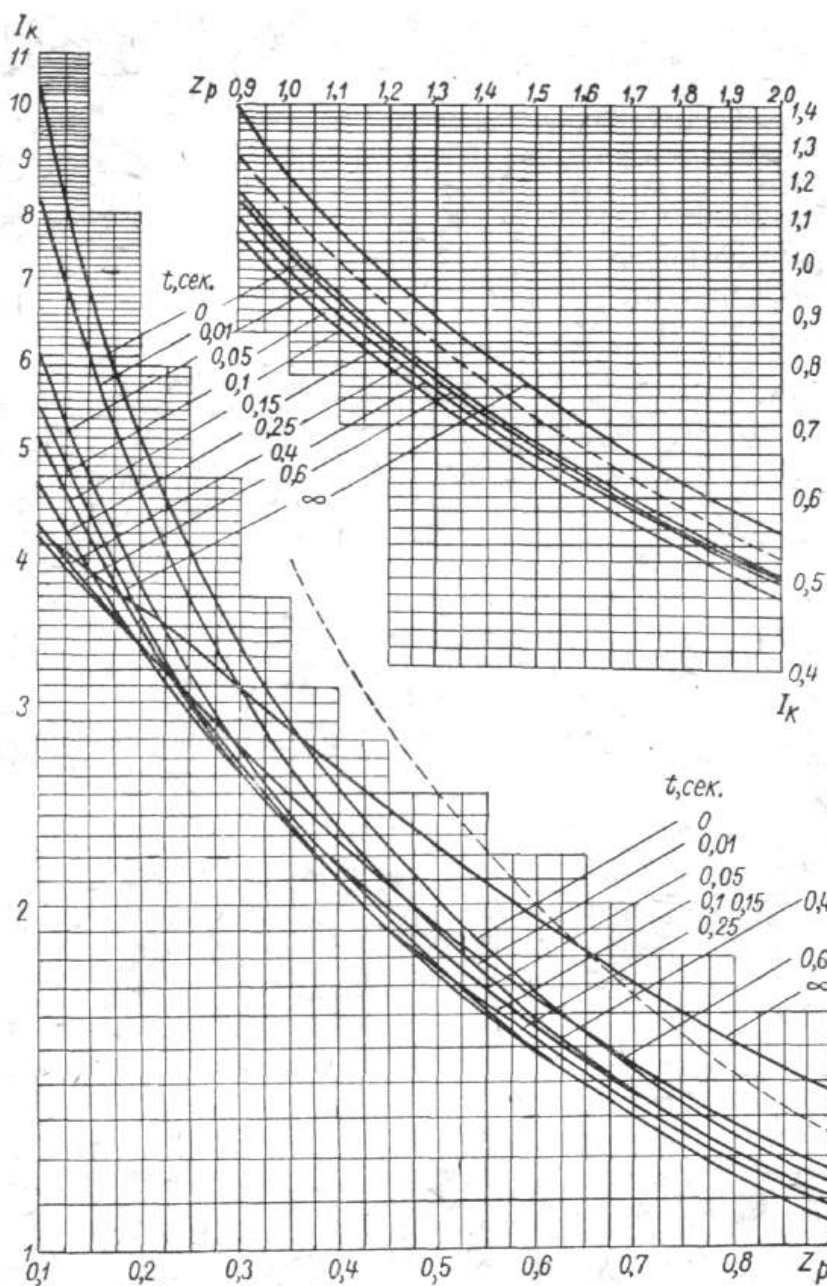


Рис. 5.3. Розрахункові криві струму к. з. для типового генератора МС з системою автоматичного регулювання напруги напругі.

Для цієї схеми, прийнявши середні параметри генератора і задавши різної віддаленістю точки короткого замикання (різними значеннями Z_k), вираховали значення опору Z_p і струму в місці короткого замикання для ряду моментів часу. При цьому опір Z_p було знайдено за формулою

$$Z_p = \sqrt{(x_d'' + x_k)^2 + (r_a + r_k)^2} = \sqrt{r_p^2 + x_p^2}$$

де x_d'' - реактивний опір обмотки статора генератора;

r_a — активний опір обмоток статора генератора і елементів, що становить генераторну гілку;

x_k — реактивний опір ділянки кабелю, на якому сталося коротке замикання;

r_k — активний опір цієї ділянки.

Таким чином, для знаходження струму к.з. за розрахунковими кривим досить визначити Z_p щодо точки короткого замикання. Для цього дійсну схему електроенергетичної системи в режимі короткого замикання необхідно привести до найпростішої схемою рис. 47, як це викладено в попередньому параграфі.

Відповідно кожному значенню результуючого опору по розрахунковим кривим знаходять діючі значення періодичної складової струму к.з. при всіх необхідних t після початку короткого замикання I_0 ; $I_{0.01}$; $I_{0.05}$; $I_{0.1}$; $I_{0.15}$; ... ; I_∞ .

Амплітудне значення цих струмів будуть у $\sqrt{2}$ разів більше.

З формули (18) випливає, що ударний струм к.з. є сумою початкового періодичного струму к.з. (який вважається в даному випадку нестихаючим) і періодичному струму к.з. з урахуванням його, загасання через час

$$t = \frac{1}{2f} \text{ с.}$$

При розгляді перехідних процесів в синхронних генераторах було встановлено, що періодичний струм к.з. також є загасаючим, що підтверджується і розрахунковими кривими рис. 5.3. Тому при наявності розрахункових кривих для генераторів частотою 50 Гц більш правильним буде визначення ударного струму за формулою

$$i_{\delta.\bar{a}} = \sqrt{2}I_{0.01} + \sqrt{2}I_0 e^{-\frac{1}{2f\tau}}.$$

Так як

$$1 + e^{-\frac{1}{2f\tau}} = p,$$

то

$$e^{-\frac{1}{2f\tau}} = p - 1,$$

отже

$$i_{\delta.\bar{a}} = \sqrt{2}I_{0.01} + \sqrt{2}I_0(p - 1),$$

де перший доданок є амплітудне значення періодичної складової струму к.з.

для $t = 0,01$ сек., а другий доданок амплітудне значення аперіодичної складової струму к.з. для $t = 0,01$ сек. Для визначення значення ударного коефіцієнта неважко побудувати спеціальну криву, користуючись виразом

$$1 + e^{-\frac{1}{2f\tau}} = p.$$

Оскільки

$$\frac{1}{2f\tau} = \frac{1}{2f \frac{x_p}{\omega r_p}} = \frac{1}{2f \frac{x_p}{2\pi f r_p}} = \frac{\pi}{\frac{x_p}{r_p}},$$

то

$$p = 1 + e^{-\frac{\pi}{\frac{x_p}{r_p}}}$$

Приймаючи різні значення $\frac{x_p}{r_p}$ короткозамкненого ланцюга, можна побудувати залежність $p = \varphi\left(\frac{x_p}{r_p}\right)$. Така залежність показана на рис. 5.3 (вона справедлива при будь-якій частоті)

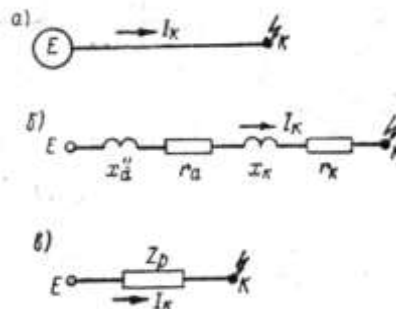


Рис. 5.4. Схема, прийнята для побудови розрахункових кривих.

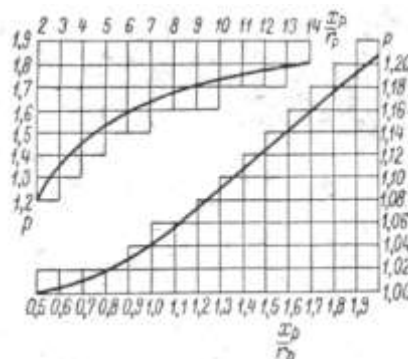


Рис. 5.5. Залежність ударного коефіцієнту від відносини $\frac{x_p}{r_p}$

Так як струм короткого замикання змінюється в часі, то під діючим значенням струму к. з. для будь-якого моменту процесу короткого замикання

умовно розуміють середньоквадратичне значення струму за один період, в центрі якого знаходиться розглянутий момент. При цьому для спрощення обчислення діючого значення струму к. З. приймають допущення, що за аналізований період обидва його доданків не змінюються і залишаються рівними миттєвому значенню в даний момент часу. При такому допущенні найбільше значення періодичної складової струму к. З. генератора дорівнюватиме (при 50 Гц)

$$\frac{\sqrt{2}I_{0.01}}{\sqrt{2}} = I_{0.01}.$$

Найбільше значення аперіодичної складової – амплітудне значенням, т. е.:

$$\sqrt{2}I_0(p-1).$$

Виходячи з цього, найбільше значення струму к.з. (його іноді називають діючим значенням повного струму к.з.) Визначається (як середньоквадратичне значення) формулою

$$I_{p\epsilon} = \sqrt{I_{0.01}^2 + [\sqrt{2}I_0(p-1)]^2}.$$

Для отримання ударного струму к. З. в амперах необхідно праву частину формули помножити на базисний струм I_6 тоді отримаємо

$$i_{p\epsilon} = \sqrt{2}I_6[I_{0.01} + I_0(p-1)]$$

Відповідно найбільше значення струму к. З. в амперах одно

$$I_{p\epsilon} = I_6 \sqrt{I_{0.01}^2 + [\sqrt{2}I_0(p-1)]^2}.$$

Формулами визначається тільки ударний струм к.з. генераторів. Асинхронні двигуни також створюють певний ударний струм. Отже, загальний ударний струм в точці короткого замикання буде дорівнює

$$i_p = i_{p\epsilon} + i_{p\delta\epsilon};$$

$$i_p = \sqrt{2}I_{0.01} + \sqrt{2}I_0(p-1) + \sqrt{2}I_{\delta\epsilon},$$

або в амперах

$$i_p = \sqrt{2}I_6[I_{0.01} + I_0(p-1) + I_{\delta\epsilon}].$$

Відповідно, найбільше значення ударного струму к. З. з урахуванням підживлення двигунів одно

$$i_p = \sqrt{I_{0.01}^2 + [\sqrt{2}I_0(p-1)]^2} + I_{\partial\phi}$$

При частоті 400 Гц в формулах (33) - (38) можна вважати $I_{0.01} = I_0$

Діюче значення періодичної складової струму підживлення двигунів визначається формулою

$$I_{\partial\phi} = \frac{E - \Delta U}{Z_{\partial\phi}}$$

При цьому в відносних одиницях E приймається рівним 0,9. Залишкова напруга на шинах головного розподільного щита при короткому замиканні на кабелі, тим, хто відходить від щита, так само

$$\Delta U = I_0 Z_k.$$

Опір двигуна $Z_{\text{дв}}$ в відносних номінальних одиницях визначається по кратності його пускового струму з приведенням до прийнятих в конкретному розрахунку базисних умов.

Беручи кратність пускового струму двигунів рівній п'яти, отримуємо

$$Z_{\partial\phi} = \frac{1}{5} \frac{S_{\phi}}{S_{\text{ндв}}} = 0,2 \frac{S_{\phi}}{S_{\text{ндв}}}$$

де $S_{\text{ндв}}$ - номінальна потужність еквівалентного двигуна, що визначається як ступінь завантаження генераторів електростанції. Найбільш ймовірна завантаження генераторів суднових електростанцій - близько 75% їх номінальної потужності, тому

$$Z_{\partial\phi} = 0,2 \frac{S_{\phi}}{0,75 S_{\phi}} = 0,266.$$

При визначенні струму к.з. для часу $t = 0,05$ с від початку короткого замикання струм підживлення двигунів завдяки його швидкого загасання не враховується. Аперіодична складова струму к.з. при цьому може бути врахована коефіцієнтом, рівним 1,05 від періодичної складової, т. е. $1,05 I_{0.05}$ (по розрахунковим кривим рис. 5.3)

При визначенні струмів к.з. наступних моментів часу ($I_{0.1}$; $I_{0.15}$ і т. д.) струм підживлення двигунів і аперіодична складова струму к. з. не враховуються.

При відсутності розрахункових кривих ударний струм к. з. з деяким наближенням можна визначити наступним шляхом. Початкове діюче значення періодичного струму к.з. в відносних одиницях знаходять за формулою

$$I_0 = \frac{1}{Z_p}.$$

Ударний струм к.з., що посиляється генераторами,

$$i_{p\epsilon} = p\sqrt{2}I_0.$$

Загальний ударний струм в точці короткого замикання

$$i_p = i_{p\epsilon} + i_{p\delta\epsilon} = p\sqrt{2}I_0 + \sqrt{2}I_{\delta\epsilon},$$

або в амперах

$$i_p = I_{\epsilon}\sqrt{2}(pI_0 + I_{\delta\epsilon}).$$

Підрахований ударний струм к.з. не враховує загасання періодичної складової струму короткого замикання. Це дає деяке завищення результату, яке зменшується в міру віддалення точки короткого замикання. При $Z_p > 1$ діюче значення струму, як видно з кривих рис. 4б, майже не змінюється і можна орієнтовно приймати

$$I_0 = I_{0.01} = \dots = I_{\infty}$$

Таким чином, розрахунок струмів короткого замикання в СЕС змінного струму з використанням розрахункових кривих виконують в наступному порядку:

1) становлять розрахункову схему, що містить номінальні параметри всіх вхідних в неї елементів, а також передбачувані для розрахунку точки короткого замикання;

2) складають схему заміщення, що містить опору всіх елементів, що входять в розрахункову схему (користуючись додатками); при цьому всі опори висловлюють в відносних одиницях по відношенню до прийнятих в розрахунку базисних умов;

3) перетворюють схеми заміщення з визначенням результуючого опору; схему перетворюють стільки раз, скільки заплановано до розрахунку точок короткого замикання;

4) за допомогою розрахункових кривих, відповідно до результуючого опору Z_p , отриманого для даної точки к.з., визначають (у відносних одиницях) діючі значення струму к.з. для всіх моментів часу від $t = 0$ до $t = \infty$;

5) знаходять ударний коефіцієнт p по кривій рис. 5,5 в залежності від $\frac{x_p}{r_p}$ і потім ударний струм к.з.;

6) знаходять величину залишкової напруги на шинах ГРЩ ΔU , а також чинне і амплітудне значення струму підживлення двигунів;

7) визначають загальний ударний струм к.з. в даній точці короткого замикання у відносних одиницях і в амперах;

8) визначають в амперах діючі значення струмів к.з. для всіх необхідних моментів часу.

6. РОЗРАХУНОК ПРОВАЛАВ НАПРУГИ У СУДНОВИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ

В якості вихідних даних задається підключається привід або активне навантаження. Виходячи із заданої таким чином потужності навантаження, миттєво підключається до шин електростанції, необхідно розрахувати провал напруги в мережі і оцінити можливість реалізації такого режиму при заданому допустимому значенні провалу напруги.

Розрахунок провалів напруги здійснюється аналітичним і графоаналітичним методами.

Аналітичний метод. При розрахунку аналітичним методом провалу напруги від включення статичного навантаження відшукують подовжню u_d і поперечну u_q складові напруги генератора в перший момент після порушення встановленого режиму роботи. Для цього необхідно знати параметри генератора, параметри навантаження і значення струмів у вихідному режимі.

Миттєве зміна напруги генератора знаходять за формулами

$$u = \sqrt{u_d^2 + u_q^2};$$

$$\Delta u = u - 1.$$

Початкове значення струму генератора при зміні навантаження може бути визначено з рівнянь навантаження:

$$i_d = g_{nr}U_d + b_{nz}u_q;$$

$$i_q = g_m U_q - b_m u_d;$$

$$i = \sqrt{i_d^2 + i_q^2}.$$

Для визначення провалу напруги попередньо навантаженого генератора послідовно розраховуються наступні параметри:

- повна провідність включається і попереднього навантаження у відносних одиницях

$$Y_{\text{вкл}} = \frac{S_{\text{вкл}}}{S_{\text{нг}}};$$

$$Y_0 = \frac{S_0}{S_{\text{нг}}},$$

- активна і реактивна провідності включається і попереднього навантаження

$$g_{\text{вкл}} = Y_{\text{вкл}} \cos \varphi_{\text{вкл}};$$

$$b_{\text{вкл}} = Y_{\text{вкл}} \sin \varphi_{\text{вкл}};$$

$$g_0 = Y_0 \cos \varphi_0;$$

$$b_0 = Y_0 \sin \varphi_0,$$

- провідності навантаження генератора в перехідному режимі

$$g_{\text{нг}} = g_{\text{вкл}} + g_0;$$

$$b_{\text{нг}} = b_{\text{вкл}} + b_0.$$

Розрахунки показують, що активний опір статора генератора практично не впливає на провал напруги. Тому всі розрахунки зазвичай ведуться без урахування цього опору. При розрахунку вихідного режиму спочатку визначаються:

- складові напруги генератора при $u_0 = 1$ о.е.

$$u_{do} = \frac{x_q g_o}{\sqrt{(1 + x_q b_o)^2 + (x_q g_o)^2}};$$

$$u_{qo} = \frac{1 + x_q b_o}{\sqrt{(1 + x_q b_o)^2 + (x_q g_o)^2}},$$

- складові струму статора і струм збудження генератора

$$i_{do} = g_{\text{ou}} d_o + b_{\text{ou}} q_o;$$

$$i_{qo} = \frac{u_{do}}{x_q};$$

$$i_{fo} = u_{qo} + x_d i_{do},$$

- складові напруги генератора з урахуванням демпферних обмоток в перший момент після включення навантаження

$$u_{d1} = \frac{x_q'' g_{\text{нг}} [i_{fo} - (x_d - x_d'') i_{do}] + (1 + x_d'' b_{\text{нг}}) \mu_q x_q i_{qo}}{(1 + x_d'' b_{\text{нг}})(1 + x_q'' b_{\text{нг}}) + x_d'' x_q g_{\text{нг}}^2};$$

$$u_{q1} = \frac{(1 + x_q'' b_{\text{нг}}) [i_{fo} - (x_d - x_d'') i_{do}] + \mu_q x_q i_{qo} x_d'' g_{\text{нг}}}{(1 + x_d'' b_{\text{нг}})(1 + x_q'' b_{\text{нг}}) + x_d'' x_q g_{\text{нг}}^2},$$

де x_q, x_q'', x_d, x_d'' —параметри генератора; $b_{\text{нг}}, g_{\text{нг}}$ —параметри навантаження. Напруга в перший момент і провал напруги генератора визначаються формулами

$$u_1 = \sqrt{u_{d1}^2 + u_{q1}^2};$$

$$\Delta u_1 = (u_1 - 1)100\%.$$

Складові напруги, напруга в перший момент і провал напруги в перший момент після включення навантаження на генератор без урахування демпферних контурів розраховуються за формулами

$$u_{d2} = \frac{x_q g_{нг} [i_{fo} - (x_d - x'_d) i_{do}]}{(1 + x'_d b_{нг})(1 + x_q b_{нг}) + x'_d x_q g_{нг}^2};$$

$$u_{q2} = \frac{[i_{fo} - (x_d - x'_d) i_{do}](1 + x_q b_{нг})}{(1 + x'_d b_{нг})(1 + x_q b_{нг}) + x'_d x_q g_{нг}^2};$$

$$u_2 = \sqrt{u_{d2}^2 + u_{q2}^2};$$

$$\Delta u_2 = (u_2 - 1)100\%.$$

Максимальний провал напруги генератора визначиться з формули

$$\Delta u = \frac{\Delta u_2 + \Delta u_1}{2}.$$

Провал напруги при включенні **асинхронних двигунів** розраховується в припущенні, що складові провідності ланцюга двигуна в початковій стадії перехідного процесу зберігають постійне значення, яке дорівнює вихідному, до досягнення напругою своєї мінімальної величини. Тому, аналітичний розрахунок провалу напруги при включенні асинхронного двигуна виконується так само, як і при включенні статичного навантаження. Вихідні для розрахунку величини $g_{вкл}$ та $b_{вкл}$ визначаються за розрахунковими формулами двигуна з урахуванням частоти обертання його ротора в момент включення.

З розрахункових формулярів на двигун можна отримати активний опір статора r_a , індуктивний опір розсіювання статора x_1 , індуктивний опір взаємодукції x_m , активний опір ротора r'_2 , індуктивний опір ротора x'_2 .

Параметри двигуна, необхідні для розрахунку, визначаються за формулами

$$x = x_1 + x_m;$$

$$x_r = x_2 + x_m;$$

$$\mu = x_m^2 / x;$$

$$T_r = \frac{x_r}{r'_2}.$$

де r_a – активний опір статора;

μ – коефіцієнт зв'язку обмоток статора і ротора двигуна;

x - індуктивний опір статора;

$S_{дв}$ – ковзання двигуна;

T_r – постійна часу ротора.

Вводячи в систему рівнянь позначення

$$x' = (1 - \mu)x;$$

$$r_{экв} = r_a + \frac{\mu x S_{дв} T_r}{1 + (S_{дв} T_r)^2};$$

$$r_{\text{эКВ}} = x' + \frac{\mu x}{1 + (S_{\text{дв}} T_r)^2},$$

отримаємо

$$r_{\text{эКВ}} i_d - x_{\text{эКВ}} i_q = u_d;$$

$$r_{\text{эКВ}} i_q - x_{\text{эКВ}} i_d = u_q.$$

Складові еквівалентної провідності асинхронного двигуна визначаються за формулами

$$g_{\text{нг}} = \frac{r_{\text{эКВ}}}{r_{\text{эКВ}}^2 + x_{\text{эКВ}}^2};$$

$$b_{\text{нг}} = \frac{x_{\text{эКВ}}}{r_{\text{эКВ}}^2 + x_{\text{эКВ}}^2}.$$

Подальший розрахунок ведеться так само, як і випадку включення статичного навантаження.

Графоаналітичний метод. Розрахунок графоаналітичним методом ґрунтується на тому, що для кожного генератора існує функціональна залежність максимального провалу напруги від провідності і коефіцієнта потужності навантаження.

Попередньо обчислені сімейства таких залежностей $\Delta u = f(Y_{\text{нг}})$ для кількох значень коефіцієнта потужності (наприклад, 0,4, 0,7, 0,8) гранично спростують процедуру визначення Δu , яка зводиться до наступного. Знаходять повну провідність включається навантаження у відносних одиницях

$$Y_{\text{нг}} = \frac{S_{\text{вкл}}}{S_{\text{нг}}}.$$

Далі, за розрахунковою кривою, що відповідає коефіцієнту потужності включення навантаження, визначають максимальний провал напруги генератора. Якщо навантаження має коефіцієнт потужності, відмінний від значень, які прийняті в розрахункових кривих, то доцільно застосовувати інтерполяцію (або екстраполяцію). Розрахункові графіки залежностей максимальних провалів напруги найбільш поширених суднових синхронних генераторів потужністю від 30 до 1500 кВт від провідності навантаження $Y_{\text{нг}}$ (при значеннях коефіцієнта потужності 0,4, 0,7 і 0,8) наведено на відповідних рисунках. Провал напруги при включенні асинхронного двигуна можна визначити по розрахунковим кривим, вважаючи, що двигун еквівалентується сумою активної і реактивної провідності, які відповідають частоті обертання його ротора в момент включення.