

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

КОМБІНОВАНІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНІ ПРОПУЛЬСИВНІ КОМПЛЕКСИ

Методичні вказівки до практичних занять з дисципліни

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

Комбіновані електроенергетичні пропульсивні комплекси: 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, А.Ю. Букарос. – Одеса: ОНМУ, 2023 – 54 с.

Укладач: Яровенко Володимир Олексійович – завідуючий кафедрою «Експлуатація суднового електрообладнання і засобів автоматики», Букарос А.Ю., к.т.н., доцент, доцент кафедри "Експлуатація суднового електрообладнання і засобів автоматики"

Методичні вказівки схвалено на засіданні кафедри «Експлуатація суднового електрообладнання і засобів автоматики», протокол № 10-22/23 від 25.05.2023 року.

1. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМІВ ПРОПУЛЬСИВНИХ КОМПЛЕКСІВ ЕЛЕКТРОХОДІВ

Узагальнена структурна схема пропульсивного комплексу електрохода

Проведений аналіз усіх наявних і перспективних систем і схем електроруку дає змогу запропонувати узагальнену структурну схему пропульсивного комплексу електрохода, наведену на рис. 6.1.

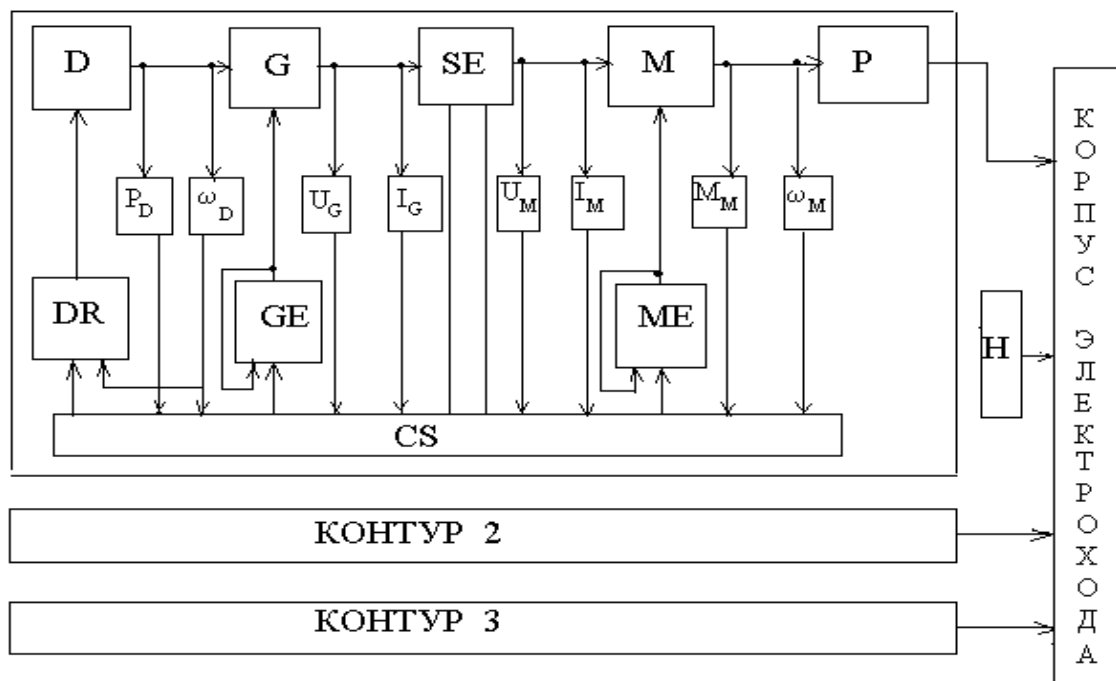


Рис. 6.1. Структурна схема
пропульсивного комплексу електрохода

У кожен "силовий" контур комплексу (їх у електроходів, як правило, не більше трьох) входять:

- D – первинний двигун;
- G – генератор електричного струму;
- SE – перетворювач електроенергії;
- M – гребний електродвигун (ГЕД);
- P – гребний гвинт;
- CS – система автоматичного регулювання;
- DR – регулятор первинного двигуна;
- GE – збуджувальний пристрій генератора;
- ME – збуджувальний пристрій гребного електродвигуна.

На структурній схемі показано також датчики:

- P_D – потужності первинного двигуна;
- ω_D – швидкості обертання первинного двигуна;
- U_G – напруги на виході головного генератора;
- I_G – сили струму головного генератора;
- U_M – напруги на вході гребного електродвигуна;
- I_M – сили струму гребного електродвигуна;
- M_M – обертового моменту гребного електродвигуна;

ω_M – швидкості обертання гребного електродвигуна.

Крім перерахованих елементів, до складу єдиного суднового пропульсивного комплексу входять також кермо – Н і корпус електрохода.

Ці якості первинного двигуна D можуть бути встановлені дизелі, парові турбіни, газові турбіни. У перспективних системах електроруху з безпосередніми перетворювачами енергії первинні теплові двигуни будуть відсутні.

Джерелами електроенергії G можуть бути електромашинні генератори постійного або змінного струму та безпосередні перетворювачі енергії.

Перетворювачами електроенергії SE у загальному випадку можуть бути некеровані або керовані випрямлячі, інвертори напруги або інвертори струму, безпосередні перетворювачі частоти і перетворювачі частоти з ланкою постійного струму.

У якості гребних електродвигунів M на судах розглянутого типу застосовують двигуни постійного струму, асинхронні або синхронні електродвигуни з використанням частотного керування, вентильні електродвигуни.

Запропонована на рис. 6.1 структурна схема універсальна. З неї, як окремі випадки, можуть бути отримані всі сучасні та перспективні системи електроруху, з будь-яким варіантом їхнього компонування. Зокрема, система подвійного роду струму виходить набором: первинний двигун – синхронний генератор – випрямляч – двигун постійного струму. Одна з перспективних систем змінного струму: первинний двигун – синхронний генератор – перетворювач частоти – асинхронний двигун. Аналогічним чином можна отримати й інші можливі варіанти компонування систем електроруху.

Математичний опис перехідних і сталих режимів роботи

Первинні двигуни з регуляторами швидкості.

Рівняння руху первинного двигуна в загальному випадку має вигляд

$$J_D \frac{d\omega_D}{dt} = M_D - M_G - M_{TD}, \quad (6.1)$$

де J_D – приведений до валу первинного двигуна момент інерції первинного двигуна і генератора;

M_D – рухомий момент первинного двигуна;

ω_D – кутова швидкість обертання первинного двигуна;

M_G – момент опору генератора;

M_{TD} – сумарний момент сил тертя в системі первинний двигун – генератор електричного струму.

Під час дослідження маневрених режимів роботи пропульсивних комплексів допустима похибка може доходити до 13%. У цих умовах відносний рушійний момент первинного двигуна, що задається обмежувальною, частковими і регуляторами характеристиками, можна представити наближеними залежностями:

$$\text{при } \omega_D^0 \leq \frac{\omega_{DP}}{\omega_{D0}} \cdot \psi_D \quad \text{и} \quad \frac{\omega_{D0}}{\omega_{DP}} \leq 1$$

$$M_D^0 = \frac{M_D}{M_{D0}} = \xi_D \cdot \frac{1 + \left(\frac{\omega_{DP}}{\omega_{D0}} - \omega_D^0 \right) \cdot \beta_D}{1 + \left(\frac{\omega_{DP}}{\omega_{D0}} - 1 \right) \cdot \beta_D};$$

$$\text{при } \frac{\omega_{DP}}{\omega_{D0}} \psi_D < \omega_D^0 \leq \frac{\xi_D \cdot (c_{DP} - 1) + 1}{\frac{\omega_{D0}}{\psi_D \cdot \omega_{DP}}} \quad \text{и} \quad \frac{\omega_{D0}}{\omega_{DP}} \leq 1$$

$$M_D^0 = \frac{M_D}{M_{D0}} = \frac{\left[1 + \frac{\omega_{DP}}{\omega_{D0}} (1 - \psi_D) \beta_D \right] \left[\frac{c_{DP} - \frac{\omega_D^0}{\psi_D \cdot \omega_{DP} / \omega_{D0}}}{c_{DP} - 1} + \xi_D - 1 \right]}{1 + \left(\frac{\omega_{DP}}{\omega_{D0}} - 1 \right) \beta_D}; \quad (6.2)$$

$$\text{при } \omega_D^0 \leq \frac{\omega_{DP}}{\omega_{D0}} \psi_D \text{ и } \frac{\omega_{00}}{\omega_{DP}} > 1$$

$$M_D^0 = \frac{M_D}{M_{D0}} = \xi_D \cdot \frac{\left[1 + \left(\frac{\omega_{DP}}{\omega_{D0}} - \omega_D^0 \right) \cdot \beta_D \right] \cdot (c_{DP} - 1)}{c_{DP} \cdot \frac{\omega_{D0}}{\omega_{DP}}};$$

$$\text{при } \frac{\omega_{DP}}{\omega_{D0}} \cdot \psi_D < \omega_D^0 \leq \frac{\xi_D \cdot (c_{DP} - 1) + 1}{\frac{\omega_{D0}}{\psi_D \cdot \omega_{DP}}} \text{ и } \frac{\omega_{00}}{\omega_{DP}} > 1$$

$$M_D^0 = \frac{M_D}{M_{D0}} = \frac{\left[1 + \frac{\omega_{DP}}{\omega_{D0}} (1 - \psi_D) \beta_D \right] \cdot \left[(\xi_D - 1)(c_{DP} - 1) + c_{DP} - \frac{\omega_D^0}{\psi_D \cdot \omega_{DP} / \omega_{D0}} \right]}{c_{DP} - \frac{\omega_{D0}}{\omega_{DP}}}$$

де ξ_D – відносна подача теплоносія;

ψ_D – відносний ступінь затягування пружини регулятора;

β_D – тангенс кута нахилу зовнішньої характеристики двигуна;

c_{DR} – коефіцієнт ступеня нерівномірності регулятора;

$\omega_D^0 = \omega_D / \omega_{D0}$ – відносна кутова швидкість обертання первинного двигуна;

ω_{DP} – кутова швидкість, на яку налаштований регулятор;

ω_{D0} – кутова швидкість обертання двигуна на сталому режимі.

У якості регуляторів швидкості обертання первинних двигунів у електроходів застосовують регулятори гідравлічного типу непрямої дії, ізодромні. Нехтуючи, у першому наближенні, гнучким зворотним зв'язком і динамікою вимірювача швидкості, можна подати рівняння руху регулятора в такому вигляді:

$$T_s \frac{d\xi_D}{dt} = K_{RD1} (K_{RD2} \cdot \omega_D - K_{RD3} \cdot \xi_D), \quad (6.3)$$

де T_s – постійна часу сервомотора;

K_{RD1} – коефіцієнт підсилення регулятора за вхідною величиною;

K_{RD2} – коефіцієнт підсилення за кутовою швидкістю обертання;

K_{RD3} – коефіцієнт підсилення (коефіцієнт жорсткого зворотного зв'язку) за ξ_D .

Генератори електричного струму.

Під час математичного опису процесів, що відбуваються в генераторах, виходимо з таких міркувань.

Коефіцієнти самоіндукції якорів генераторів постійного струму зберігають постійні значення впродовж усього часу виконання маневрів. Щітки генераторів установлені на нейтралі та, як

наслідок цього, не враховуємо подовжню, поперечну та комутаційну реакції якоря. Магнітний зв'язок між обмотками якоря та збудження відсутній.

Передача енергії від синхронного генератора до приймача здійснюється першими гармоніками, тобто у якості неї, приймаємо енергію першої гармонійної складової ЕРС генератора. Приймачем вищих гармонійних – є система живлення. Виходячи з цього, замінимо (розкладанням у ряд Фур'є та виділенням перших гармонік) реальний генератор джерелом еквівалентної синусоїдальної ЕРС і вважатимемо комутаційні процеси в перетворювачі короткочасними порівняно з постійними часу контурів генераторів. Тоді, для опису процесів, що відбуваються в генераторі, можна скористатися його спрощеною векторною діаграмою струмів і напруг.

У загальному випадку, математична модель перехідних і сталих режимів роботи генератора може бути представлена такими рівняннями:

$$M_G = K_{GM1} \cdot \Phi_{0G} \cdot I_G \cdot \cos \psi_G + K_{GM2} \cdot \frac{U_G^2}{f_G} \cdot \sin(2\theta); \quad (6.4)$$

$$U_G = \frac{1}{\cos \theta_G} \left[E_G - I_G (r_G \cos \psi_G + f_G X_G \sin \psi_G) - L_G \frac{dI_G}{dt} \right]; \quad (6.5)$$

$$I_G = K_{GI} \cdot \left| \frac{\sin \frac{\gamma_G}{2}}{\frac{\gamma_G}{2}} \right| \cdot \mu_{SE}(t) \cdot I_M \cdot \frac{\cos \varphi_M}{\cos \varphi_G}; \quad (6.6)$$

$$\Phi_{0G} = \alpha_{G\phi} \cdot W_{GV} \cdot I_{GV}; \quad (6.7)$$

$$f_G = k_{GF} \cdot \omega_D; \quad (6.8)$$

$$\psi_G = \arccos \left(\frac{U_G \cdot \cos \varphi_G + I_G \cdot r_G}{E_{0G}} \right); \quad (6.9)$$

$$\theta_G = \psi_G - \varphi_G. \quad (6.10)$$

Змінні, які входять до рівнянь (6.4)–(6.10), визначаються таким чином:

$$\gamma_G = \arccos \left(\cos \alpha_G - \frac{2 \cdot I_M \cdot X_G}{\sqrt{3} \cdot U_{GM}} \right) - \alpha_G; \quad (6.11)$$

$$E_G = K_{GE} \omega_D \left[W_{GV} I_{GV} - \frac{m_G \sqrt{2}}{\pi} \frac{W_{G1} k_{GB}}{p_G} I_G \sin \psi_G - W_{GB1} I_G \right]; \quad (6.12)$$

$$E_{0G} = K_{GE} \cdot \omega_D \cdot I_{GV}; \quad (6.13)$$

$$\varphi_G = \alpha_G + \frac{\gamma_G}{2}, \quad (6.14)$$

де Φ_{0G} – магнітний потік намагнічування генератора ;

I_G – струм якоря генератора ;

U_G – напруга на виході генератора;

f_G – частота струму генератора;

E_G – подовжня складова результуючої ЕРС генератора;

E_{0G} – ЕРС намагнічування генератора;

ψ_G – кут зсуву фаз між векторами E_{0G} і I_G ;

θ_G – кут зсуву фаз між векторами E_{0G} і U_G ;

φ_G – кут зсуву фаз між векторами U_G і I_G ;

r_G – активний опір якоря генератора;

X_G – індуктивний опір якоря генератора;

L_G – індуктивність якоря генератора;

I_M – струм гребного електродвигуна;

I_{GV} – струм збудження генератора;

γ_G – кут комутації;

$\cos \varphi_M$ – коефіцієнт потужності навантаження (гребного електродвигуна);

α_G – кут керування вентилями перетворювача SE;

W_{GV} – число витків обмотки збудження;

W_{GI} – число витків якірної обмотки;

W_{GBI} – число витків протикомпаундної обмотки;

K_{GE} – коефіцієнт е.д.с генератора;

K_{GM1}, K_{GM2} – коефіцієнти моменту опору генератора;

K_{GI} – коефіцієнт сили струму генератора;

$\mu_{SE}(t)$ – сигнал управління на вході перетворювача SE (на сигнал $\mu_{SE}(t)$ впливає тип перетворювача);

$\alpha_{G\phi}$ – коефіцієнт пропорційності між магнітним потоком і магніторушійною силою генератора;

m_G – число фаз генератора;

k_{GB} – постійний коефіцієнт;

k_{GF} – коефіцієнт пропорційності між ϕ_{0G} і I_{GV} .

Математичний опис (6.4)–(6.14) універсальний і справедливий для будь-якої з розглянутих систем електроруку за будь-яким варіантом компонування ГЕУ. Наприклад, струм генератора I_G визначається для кожної конкретної схеми електроруку – як окремий випадок формули (6.6) - за співвідношеннями:

$$I_G = \begin{cases} k_{ГД} I_M, & ГПТ \\ \frac{4\sqrt{3}J_{MG}}{2\sqrt{2}\pi} \left| \frac{\sin \frac{\gamma_G}{2}}{\frac{\gamma_G}{2}} \right| \cdot I_M, & СГ - НВ(УВ); \\ \frac{\sqrt{3}J_{MG}}{2} \frac{1}{\cos\left(\frac{\pi}{6} + \frac{\psi_0}{2}\right)} \left| \frac{\sin \frac{\gamma_G}{2}}{\frac{\gamma_G}{2}} \right| I_M, & СГ - АИТ - В; \\ \frac{\sqrt{2}\pi}{4} \frac{1}{\cos\left(\frac{\pi}{6} + \frac{\psi_0}{2}\right)} I_M, & СГ - АИТ; \\ \frac{3\sqrt{2}}{4} \mu_G I_M \cos \varphi_M, & СГ - АИН; \\ \frac{3\sqrt{3}J_{MG}}{2\pi} \left| \frac{\sin \frac{\gamma_G}{2}}{\frac{\gamma_G}{2}} \right| \mu_{SE}(t) I_M \cos \varphi_M, & СГ - АИН - В; \\ \frac{m_2}{m_1} K \mu_{SE}(t) I_M \frac{\cos \varphi_M}{\cos \varphi_G}, & СГ - НПЧ. \end{cases}$$

Тут прийнято такі позначення:

ГПТ – генератор постійного струму;

СГ – синхронний генератор;

НВ (УВ) – некерований (керований) випрямляч;

АИТ – автономний інвертор струму;

АИН – автономний інвертор напруги;

НПЧ – безпосередній перетворювач частоти;

J_{MG} – постійний коефіцієнт, який залежить від схемного рішення перетворювача електроенергії.

Аналогічні співвідношення, як окремі випадки з наведених вище рівнянь, можуть бути отримані і для інших змінних (U_G , M_G та ін.), стосовно до конкретних систем і схем електроруху.

Струм в обмотці збудження генератора

$$L_{GV} \frac{dI_{GV}}{dt} + r_{GV} \cdot I_{GV} = E_{GV} + K_{GV} \cdot I_G, \quad (6.15)$$

де L_{GV} - індуктивність обмотки збудження генератора;

r_{GV} - активний опір обмотки збудження генератора;

E_{GV} - е.д.с. на виході збудника генератора;

K_{GV} - постійний коефіцієнт (розмірність - Ом).

Перетворювачі електроенергії.

Розглядаючи перетворювач електроенергії як без інерційний блок «квантування» з ідеальними вентилями, не зважаючи на електромагнітні процеси, що протікають у ньому, нехтуючи втратами енергії на вентилях, уважаючи, що струм на виході перетворювача неперервний, а сам перетворювач не виходить за сферу нормальних навантажень, можна загалом уявити залежність його вихідної напруги U_M від вхідної U_G у вигляді

$$U_M = K_{SE} \cdot \mu_{SE}(t) \cdot U_G \quad (6.16)$$

де K_{SE} - постійний коефіцієнт, що залежить від типу перетворювача і від схемного його рішення;

Параметр управління $\mu_{SE}(t)$, є функцією керуючого сигналу і залежить від типу перетворювача та обраного закону управління.

Гребні електродвигуни.

Під час математичного опису перехідних процесів у гребних електродвигунах припускаємо таке:

У двигунів постійного струму (ДПС) коефіцієнт самоіндукції якоря незмінний, щітки встановлені на нейтралі, магнітний зв'язок між обмотками збудження і якоря відсутній, вплив вихрових струмів незначний.

В основі опису асинхронного електродвигуна (ЕД), з частотним управлінням, покладено його точна класична схема заміщення, що й визначає необхідні допущення та спрощення. Напругу на затискачах статора вважають синусоїдальною, насичення сталі машини не враховують, розподіл потоку за дугою повітряного зазору приймають синусоїдальним, втрати сталі в статорі враховують наближено, а в роторі взагалі не враховують.

Під час математичного опису перехідних процесів у вентильних гребних електродвигунах (ВЕД), в основі яких лежать синхронні двигуни (СД), припускають, що ротор машини має спеціальну демпферну обмотку, надперехідні індуктивності незначно відрізняються від індуктивностей розсіювання обмоток якоря, випрямлений струм двигуна повністю згладжено, і в процесі комутації він змінюється лінійно, коефіцієнт реакції якоря знаходиться за загальноприйнятою методикою.

У загальному випадку, математичний опис перехідних і сталих режимів роботи гребного електродвигуна має такий вигляд:

Рівняння руху ГЕД

$$J_M \frac{d\omega_M}{dt} = \begin{cases} M_M - M_P - M_{TM}, & \text{для ДПТ, АД, ВЕД} \\ J_M \frac{2\pi \cdot 60}{p_M} \cdot \frac{df_M}{dt}, & \text{для СД} \end{cases}, \quad (6.17)$$

де J_M – наведений до валу гребного електродвигуна момент інерції ротора, валопроводу і гребного гвинта з приєднаними масами води;

ω_M – кутова швидкість обертання гребного електродвигуна;

M_M – рушійний момент гребного електродвигуна;

M_P – момент опору гребного гвинта;

M_{TM} – сумарний момент сил тертя;
 f_M – частота живильної напруги;
 p_M – число пар полюсів обмотки ГЕД.

Рівняння рушійного моменту

$$M_M = \begin{cases} K_{M1} \cdot \phi_M \cdot I_M \cdot K_M^{in} \cdot \cos \varphi_{2M}, & \text{для ДПТ, АД, ВЭД} \\ M_p + M_{TM} + \frac{2\pi \cdot 60}{p_M} \cdot J_M \cdot \frac{df_M}{dt}, & \text{для СД} \end{cases}, \quad (6.18)$$

де K_{M1} – постійний конструктивний коефіцієнт;

ϕ_M – магнітний потік ГЕД;

K_M^{in} – коефіцієнт інвертування;

$\cos \varphi_{2M}$ – коефіцієнт потужності ротора двигуна.

Принцип роботи синхронних гребних електродвигунів (СД) при частотному підсиленні управління відрізняється від принципу роботи інших типів ГЕД. Кутова швидкість обертання ротора СД визначається частотою f_M напруги живлення двигуна, тобто електродвигун працює без ковзання. Цей факт знайшов відображення у формулах (6.17) і (6.18).

Магнітний потік ГЕД

$$\phi_M = \begin{cases} \alpha_{M\phi} \sum F_{MV} = \alpha_{M\phi} \cdot W_{MV} \cdot I_{MV}, & \text{ДПТ, СД,} \\ \alpha_{M\phi} \sum F_{MV} = \alpha_{M\phi} \cdot \sqrt{\left[F_{MV} - K_{MD} \cdot F_{MA} \cdot \sin \left(\theta_{MK} + \delta_M^{in} + \frac{\gamma_M}{2} \right) \right]^2 +} \\ + \left[K_{MQ} \cdot F_{MA} \cdot \cos \left(\theta_{MK} + \delta_M^{in} + \frac{\gamma_M}{2} \right) \right]^2}, & \text{ВЭД,} \\ \frac{U_M \cdot \gamma}{c_{1M}} \cdot \frac{\sqrt{x_{2M}'^2 + r_{2M}'^2 \cdot \frac{1}{\beta_M^2}}}{\sqrt{(b_M^2 + c_M^2 \cdot \alpha^2) + (d_M^2 + e_M^2 \cdot \alpha^2) \cdot \frac{r_{2M}'^2}{\beta_M^2} + 2 \cdot r_{1M} \cdot \alpha \cdot \frac{r_{2M}'}{\beta_M}}}, & \text{АД.} \end{cases} \quad (6.19)$$

Де $\alpha_{M\phi}$ – постійний коефіцієнт;

F_{MV} – магніторушійна сила збудження;

W_{MV} – число витків обмотки збудження;

I_{MV} – струм в обмотці збудження;

K_{MD} – коефіцієнт форми поля поперечної реакції якоря;

F_{MA} – магніторушійна сила реакції якоря;

θ_{MK} – кут реакції якоря між векторами е.д.с. холостого ходу і комутуючої;

δ_M^{in} – кут запасу інверторного режиму;

γ – відносне значення напруги, що живить двигун;

K_{MQ} – коефіцієнт форми поля поздовжньої складової реакції якоря;

α – відносна частота струму статора;

U_M – напруга на вході двигуна;

c_{1M} – постійний коефіцієнт;

r_{2M}' – наведений активний опір ротора;

x_{2M}' – приведений реактивний опір ротора;

β_M – абсолютне ковзання ротора;

b_M, c_M, d_M, e_M – постійні коефіцієнти частотно-керованого ГЕД;

r_{1M} – активний опір статора.

Струм двигуна

$$I_M = \begin{cases} \frac{U_M - c_{EM} \phi_M \omega_M}{r_{1M}}, \text{ДПТ}, \\ \frac{U_M - c_{EM} \phi_M K_M^{in} \omega_M}{185 \cdot r_{1M}}, \text{ВЭД}, \\ \frac{\sqrt{E_{0M}^2 + U_M^2 - 2 \cdot U_M E_{0M} \cos \theta_M}}{x_{Md}^2}, \text{СД}, \\ \frac{U_M \cdot \gamma}{\sqrt{(b_M^2 + c_M^2 \alpha^2) + (d_M^2 + e_M^2 \alpha^2) \frac{r_{2M}'^2}{\beta_M^2} + 2 r_{1M} \alpha \frac{r_{2M}'}{\beta_M}}}, \text{АД}. \end{cases}, \quad (6.20)$$

де c_{EM} – постійний коефіцієнт;

E_{0M} – е.д.с. намагнічування синхронного ГЕД;

θ_M – кут навантаження синхронного ГЕД;

x_{MD} – синхронний індуктивний опір явнополюсної синхронної машини по поперечній осі.

Коефіцієнт інвертування

$$K_M^{in} = \begin{cases} 1, & \text{ДПТ, АД, СД}, \\ \frac{3}{\pi} \cdot \cos\left(\delta_M^{in} + \frac{\gamma_{MK}}{2}\right) \cdot \cos \frac{\gamma_{MK}}{2}, & \text{ВЭД}. \end{cases} \quad (6.21)$$

Коефіцієнт потужності на вході двигуна

$$\cos \varphi_{1M} = \begin{cases} 1, & \text{ДПТ}, \\ \cos\left(\delta_M^{in} + \frac{\gamma_{MK}}{2}\right), & \text{ВЭД}, \\ \cos\left(\arctg \frac{U_M - E_{0M} \cos \theta_M}{E_{0M} \sin \theta_M}\right), & \text{СД}, \\ \frac{b_M^2 \cdot \beta_M / r_{2M}' + d_M^2 \cdot r_{2M}' / \beta_M + r_{1M} \cdot \alpha}{\sqrt{[(b_M^2 + c_M^2 \alpha^2) + (d_M^2 + e_M^2 \alpha^2) \cdot r_{2M}' / \beta_M + 2 r_{1M} \alpha] \cdot \left(\frac{b_M \beta_M}{r_{2M}'} + \frac{d_M^2 r_{2M}'}{\beta_M}\right)}}, & (2.22) \end{cases}$$

Коефіцієнт потужності ротора

$$\cos \varphi_{2M} = \begin{cases} 1, & \text{ДПТ, ВЭД, СД}, \\ \frac{r_{2M}' / \beta_M}{\sqrt{x_{2M}'^2 + r_{2M}'^2 / \beta_M^2}}, & \text{АД}. \end{cases} \quad (6.23)$$

Математична модель (6.17)–(6.23) гребного електродвигуна є **єдиною для будь-якого з** розглянутих двигунів.

Змінні величини формул (6.17)–(6.23) знаходяться в такий спосіб:

ЕРС намагнічування

$$E_{0M} = K_{EM} \cdot \omega_M \cdot [W_{MV} \cdot I_{MV}], \quad (6.24)$$

де K_{EM} – постійний коефіцієнт.

Магніторушійні сили обмотки збудження F_{MV} і реакції якоря F_{MA}

$$F_{MV} = W_{MV} \cdot I_{MV}; \quad (6.25)$$

$$F_{MA} = \frac{m_M \cdot \sqrt{2}}{2} \cdot \frac{W_{1M} \cdot k_{MB}}{p_M} \cdot (0,78 \cdot I_M), \quad (6.26)$$

Де m_M – число фаз статорної обмотки ГЕД.

W_{1M} – число витків обмотки якоря;

k_{ME} – постійний коефіцієнт.

Кут реакції якоря θ_{MK} між векторами ЕРС холостого ходу і комутуючої ЕРС

$$\theta_{MK} = \begin{cases} \arctg\left(\frac{F_{MA}}{F_{MV}}\right), & \text{для неявнополюсного ВЭД} \\ \arctg\left(\frac{K_{MQ} \cdot F_{MA}}{F_{MV}}\right), & \text{для явнополюсного ВЭД} \end{cases}, \quad (6.27)$$

де K_{MQ} – коефіцієнт форми поля поздовжньої складової реакції якоря.

Кут навантаження синхронного ГЕД θ_M знаходиться рішенням рівняння

$$M_M = \frac{m_M \cdot E_{0M} \cdot U_M}{\omega_M \cdot x_{MD}} \cdot \sin \theta_M + \frac{m_M \cdot U_M^2}{2 \cdot \omega_M} \cdot \left(\frac{1}{x_{MQ}} - \frac{1}{x_{MD}} \right) \cdot \sin(2\theta_M), \quad (6.28)$$

де x_{MQ} – синхронний індуктивний опір явнополюсної синхронної машини по поздовжній осі.

Кут машинної комутації ЗЕД

$$\gamma_{MK} = \beta_M^{in} - \delta_M^{in}; \quad (6.29)$$

$$\delta_M = \arccos\left(\frac{2 \cdot I_M \cdot L_{MK}}{c_{EM} \cdot \phi_M} + \cos \beta_M^{in}\right) \quad (6.30)$$

де β_M^{in} – кут управління машинної комутації;

L_{MK} – комутаційна індуктивність фази двигуна.

Постійні коефіцієнти асинхронного частотно-керованого ГЕД розраховують за відомими [35] співвідношеннями:

$$\begin{aligned} b_M &= r_{1M} \cdot (1 + \tau_{2M}); \\ c_M &= x_{1M} (1 + \tau_{2M}) + x'_{2M}; \\ d_M &= (\tau_{1M} / x_{1M}) \cdot r_{1M}; \\ e_M &= 1 + \tau_{1M}. \end{aligned}$$

Коефіцієнти розсіювання τ_{1M} і τ_{2M} розраховуються за виразами:

$$\tau_{1M} = \frac{x_{1M}}{x_{0M}}; \quad \tau_{2M} = \frac{x'_{2M}}{x_{0M}},$$

де x_{1M} – індуктивний опір статора асинхронного ГЕД;

x_{0M} – індуктивний опір намагнічування.

Струм в обмотці збудження ГЕД визначається як

$$L_{MV} \frac{dI_{MV}}{dt} + r_{MV} \cdot I_{MV} = E_{MV}, \quad (6.31)$$

де L_{MV} – індуктивність обмотки збудження ГЕД;

r_{MV} – активний опір обмотки збудження;

E_{MV} – ЕРС на виході збудника ГЕД.

Збуджувальні пристрої.

У якості пристрою збуджування можуть застосовуватися електромашинні або тиристорні (іноді діодні) агрегати. У загальному випадку, ЕРС на виході збудника визначається як:

$$E_{GV} = K_{GV1} \cdot \phi_{GV} + K_{GV2} \cdot I_{GV}^c, \quad (6.32)$$

де ϕ_{GV} – магнітний потік збудника генератора;

I_{GV}^c – струм в обмотці самозбудження;

K_{GV1} , K_{GV2} – постійні коефіцієнти.

Перехідні процеси в першому ступені підсилювача збудника і в обмотці самозбудження описуються рівняннями:

$$T_{GV} \frac{d\phi_{GV}}{dt} + \phi_{GV} = \sum_i (K_{GV i} \cdot U_{GV i}) = U_{GV\Sigma}; \quad (6.33)$$

$$L_{GV}^c \frac{dI_{GV}^c}{dt} + r_{GV}^c I_{GV}^c = U_{GV}, \quad (6.34)$$

де T_{GV} – сумарна постійна часу електромашинного збудника;

U_{GUi} – i -й керуючий сигнал ;

K_{GVi} – коефіцієнт посилення за i -м керуючим сигналом ;

L_{GV}^C – індуктивність обмотки самозбудження ;

r_{GV}^C – активний опір обмотки самозбудження ;

U_{GV} – напруга на виході збудника;

Для тиристорних збудників сучасних і перспективних електроходів система рівнянь (6.32)–(6.34) спрощується:

$$E_{GV} = (U_{GV})_0 \cdot K_{GV3} \cdot \sum_i (K_{GVi} \cdot U_{GUi}) = (U_{GV})_0 \cdot \cos \alpha_{GV} \quad (6.35)$$

де $(U)_{GV0}$ – напруга на виході збудника в режимі холостого ходу;

α_{GV} – кут вуправління збудником;

K_{GV3} – постійний коефіцієнт.

Аналогічним чином записуються вирази, що описують перехідні процеси в збуджувальних агрегатах ГЕД (індекс "G" замінюється на "M")

Система управління.

Рівняння системи керування пов'язують сигнали U_{yi} , що подаються на входи системи керування, з напругою на виході відповідного каналу регулювання.

У загальному випадку цей зв'язок має такий вигляд:

$$A_{Kr}(t) \cdot (U_{\text{вих}})_{Kr} = K_{Kr}^{CS} \cdot \sum_i K_i^{CS} \cdot (U_{Ui} - U_{3i}), \quad (6.36)$$

де K – об'єкт управління;

r – параметр управління;

A_{kr} – функціональна залежність керуючих пристроїв регуляторів від часу, включно з похідною;

$(U)_{\text{вих}Kr}$ – сигнал управління на вході K -го об'єкта за r -м параметром;

K_{Kr}^{CS} – коефіцієнт підсилення за r -м параметром управління K -го об'єкта;

U_{Ui} – напруги сигналів управління та коригувальних зв'язків;

U_{3i} – напруги порівняння (відсічення);

K_i^{CS} – коефіцієнт підсилення за i -м сигналом управління.

У гребних електричних установках регулятори зазвичай діють роздільно, тому обирають їх незалежно один від одного, що й визначає спосіб відшукання передавальних функцій.

Відповідно до структурної схеми (див. рис. 6.1), система управління може формувати в загальному випадку такі керівні сигнали:

а) По ланцюгу збудження збудника генератора.

Результуюча напруга на вході збудника генератора:

$$U_{UG\Sigma} = \sum K_{Gi}^{CS} (U_{Ui} - U_{3i}) = K_{UG0} U_{UG3} - K_{UG1} U_{UG1} - K_{UGP} U_{UGP} - K_{UGU} U_{UGU} - K_{UG\omega} U_{UG\omega} - (K_{UGI})^T (U_{UGI})^T - (K_{UGI})^r (U_{UGI})^r, \quad (6.37)$$

де U_{UG3} – задана напруга;

U_{UG1} , U_{UGP} , U_{UGU} , $U_{UG\omega}$, $(U_{UGI})^T$, $(U_{UGI})^r$ – сигнали на виходах відповідних регуляторів:

$$U_{UG1} = \frac{T_{BG} K_1}{T_{0T} K_{TB} K_{Y1}} (I_G - I_{Ggr}) + \frac{K_1}{T_{0T} K_{TB} K_{Y1}} \int (I_G - I_{Ggr}) dt; \quad (6.38)$$

$$U_{UGP} = \frac{T_{BG}}{T_{0M}} (U_G I_G - K_P P_{Ggr}) + \frac{1}{T_{0M}} \int (U_G I_G - K_P P_{Ggr}) dt; \quad (6.39)$$

$$U_{UGU} = \frac{T_{BG}}{T_{0H} K_{TB} K_{Y1}} (U_G - U_{Ggr}) + \frac{1}{T_{0H} K_{TB} K_{Y1}} \int (U_G - U_{Ggr}) dt; \quad (6.40)$$

$$U_{UG\omega} = \frac{T_{BG}}{T_{0H} K_{TB} K_{Y13}} (\omega_D - \omega_{Dgr}) + \frac{1}{T_{0H} K_{TB} K_{Y13}} \int (\omega_D - \omega_{Dgr}) dt; \quad (6.41)$$

$$(U_{UGI})^T = \frac{T_{BG} K_1^{dT}}{T_{0T} K_{TB} K_{Y14}} (I_G - I_{Ggr2}) + \frac{K_1^{dT}}{T_{0T} K_{TB} K_{Y14}} \int (I_G - I_{Ggr2}) dt; \quad (6.42)$$

$$(U_{UGI})^r = \frac{K_1}{T_{0T} K_{TB} K_{Y1}} I + \frac{T_{BG} K_1}{T_{0T} K_{TB} K_{Y1}} \frac{dI}{dt}. \quad (6.43)$$

Індекс "gr" позначає граничне значення відповідного режимного показника).

Коефіцієнти підсилення за заданим сигналом K_{UG0} , за струмом K_{UGI} , за напругою K_{UGU} , за швидкістю $K_{UG\omega}$, за струмом у режимі гальмування $(K)_{UGI}^T$, за струмом гнучкого зворотного зв'язку $(K)_{UGI}^T$, постійні часу обмотки збудження генератора T_{BG} , регуляторів T_{0T} , T_{0M} , T_{0H} і коефіцієнти посилення K , K_{1Y1} , K_{TB} , K_{Y13} , K_{Y14} визначаються конкретною схемою системи автоматичного регулювання.

б) По колу збудження збудника гребного електродвигуна.

Результуюча напруга на вході збудника ГЕД

$$U_{UM} = \sum K_{Mi}^{CS} (U_{Ui} - U_{3i}) = K_{UM0} U_{UM3} + K_{UMP} U_{UMP} - K_{UM\omega} U_{UM\omega} - K_{UMI} U_{UMI}, \quad (6.44)$$

де U_{UG3} – задавальна напруга;

U_{UMP} , $U_{UM\omega}$, U_{UMI} – сигнали на виходах відповідних підсилювачів:

$$U_{UMP} = \frac{T_{BM}}{T_{0M}} (M_M \omega_M - P_{Mgr}) + \frac{1}{T_{0M}} \int (M_M \omega_M - P_{Mgr}) dt; \quad (6.45)$$

$$U_{UM\omega} = \frac{T_{MM}}{T_{0\omega} K_{TB} K_{Y5}} (\omega_M - \omega_{Mgr}) + \frac{2}{T_{0\omega} K_{TB} K_{Y5}} \int (\omega_M - \omega_{Mgr}) dt; \quad (6.46)$$

$$U_{UMI} = \frac{T_{BM}}{T_{0I}^T} (I_M - I_{Mgr}) + \frac{1}{T_{0I}^T} \int (I_M - I_{Mgr}) dt. \quad (6.47)$$

Коефіцієнти посилення за заданим сигналом K_{UM0} , за потужністю K_{UMP} , за кутовою швидкістю обертання $K_{UM\omega}$, за струмом K_{UMI} , механічна постійна часу T_{MM} , постійні часу обмотки збудження гребного електродвигуна T_{BM} і відповідних регуляторів – T_{0M} , $T_{0\omega}$, T_{0I}^T залежать від конкретної схеми системи автоматичного регулювання.

в) Управління статичними перетворювачами енергії:

відносна частота вихідної напруги перетворювача частоти SE

$$\alpha = \alpha_3 - K_{\alpha P} \alpha_P - K_{\alpha \omega} \alpha_\omega - K_{\alpha f} (\alpha_f - \alpha_{fcp}) - K_{\alpha M} (\alpha_M - \alpha_{Mcp}) - K_{\alpha I} (\alpha_I - \alpha_{Icp}) - K_{\alpha PD} (\alpha_{PD} - \alpha_{PDcp}); \quad (6.48)$$

відносна напруга на виході перетворювача SE

$$\gamma = \gamma_3 - K_{\gamma I} (\gamma_I - \gamma_{Icp}) - K_{\gamma U} \gamma_U, \quad (6.49)$$

де α_3 – задане значення відносної частоти α ;

α_P – коригувальний зв'язок за потужністю ГЕД;

α_ω – коригувальний зв'язок за кутовою швидкістю обертання ГЕД;

α_f – відсічення за вихідною частотою перетворювача частоти;

α_M – відсічення за обертовим моментом ГЕД;

α_I – відсічення за струмом статора ГЕД;

α_{PD} – відсічення за потужністю, яку споживає система електроруку;

γ_3 – задане значення відносної напруги перетворювача частоти – сигнал, що є функцією відносної частоти α і прийнятого закону управління напругою;

γ_U – коригувальний зв'язок за напругою ГЕД;

γ_I – відсічення за струмом статора ГЕД.

Коефіцієнти посилення $K_{\alpha P}$, $K_{\alpha \omega}$, $K_{\alpha f}$, $K_{\alpha M}$, $K_{\alpha I}$, α_{PD} , $K_{\gamma I}$, $K_{\gamma U}$ визначаються (як і в разі керування за колами збудників) конкретною системою управління.

У кожному конкретному випадку система автоматичного керування має свій "набір" керівних сигналів за кожним каналом регулювання.

Гребні гвинти.

При дослідженні перехідних режимів роботи гребних гвинтів допустимо користуватися статичними характеристиками, які враховують відхилення динамічних характеристик від статичних через величину приєднаних моментів інерції гребного гвинта.

Гідродинамічну реверсивну характеристику гребного гвинта, з урахуванням його взаємодії з корпусом судна, і з урахуванням руху судна криволінійною траєкторією, представимо у вигляді параболічного полінома. Тоді, відносний момент опору M_P^0 і відносний упор P_P^0 гвинта можуть бути представлені у вигляді:

$$M_P^0 = \frac{M_P}{M_{P0}} = a_{21} \left(\frac{\omega_P}{\omega_{P0}} \right)^2 + b_{21} \left(\frac{\omega_P}{\omega_{P0}} \right) \left(\frac{v_e}{v_0} \right) + c_{21} \left(\frac{v_e}{v_0} \right)^2 + a_M \left(\frac{v}{v_0} \right)^2 \operatorname{tg}^2 \alpha_{CK}; \quad (6.50)$$

$$P_P^0 = \frac{P_P}{P_{P0}} = a_{11} \left(\frac{\omega_P}{\omega_{P0}} \right)^2 + b_{11} \left(\frac{\omega_P}{\omega_{P0}} \right) \left(\frac{v_e}{v_0} \right) + c_{11} \left(\frac{v_e}{v_0} \right)^2 + a_P \left(\frac{v}{v_0} \right)^2 \operatorname{tg}^2 \alpha_{CK}, \quad (6.51)$$

$$\text{де } v_e = (1 - \psi_B) \cdot v \quad (6.52)$$

$$\left. \begin{aligned} a_{11} &= a_{P1}(1 - t_P + t_{PB}); & a_{21} &= a_{P2}(1 + m_{P,B}); \\ b_{11} &= b_{P1}(1 - t_P + t_{PB})(1 - \psi_B); & b_{21} &= b_{P2}(1 + m_{P,B})(1 - \psi_B); \\ c_{11} &= c_{P1}(1 - t_P + t_{PB})^2(1 - \psi_B)^2; & c_{21} &= c_{P2}(1 + m_{P,B})^2(1 - \psi_B)^2; \end{aligned} \right\}; \quad (6.53)$$

$$\alpha_{CK} = \alpha_K - \operatorname{arctg} \frac{v_Y}{v_X} + a_Y \cdot \frac{\Omega_Z \cdot L}{v}; \quad (6.54)$$

ω_P – кутова швидкість обертання гвинта;

v – швидкість руху судна;

v_e – швидкість натікання води на гвинт;

v_X, v_Y – складові швидкості судна у пов'язаній із ним системі координат;

ψ_B – коефіцієнт попутного потоку гвинта;

t_P – коефіцієнт засмоктування води;

Ω_Z – кутова швидкість обертання судна навколо осі Z ;

L – довжина судна;

α_{CK} – кут скосу потоку води;

α_K – конструктивний кут нахилу лінії валопроводу до осі X ;

t_{PB} – коефіцієнт, що враховує вплив керма на упор гвинта;

$m_{P,B}$ – коефіцієнт, що враховує вплив керма на момент опору гвинта;

a_M, a_P, a_Y – постійні коефіцієнти.

Коефіцієнти універсальної характеристики ізолюваного гвинта $a_{P1}, a_{P2}, b_{P1}, b_{P2}, c_{P1}, c_{P2}$ – постійні в певних діапазонах зміни $\omega_P^0 = \omega_P / \omega_{P0}$ і $v_e^0 = v_e / v_0$.

Корпус електроходу.

Рух судна вільною поверхнею води розглядають у пов'язаній із ним системі координат $GXYZ$, початок якої збігається з центром ваги судна G , площину GXY паралельно до основної площини судна, вісь GX розміщують у діаметральній площині та спрямовують у ніс, вісь ZY – на правий борт, вісь GZ – вертикально вгору. Рівняння руху судна з урахуванням зазвичай використовуваних спрощувальних припущень, мають вигляд, широко використовуваний у теорії управління суден:

$$(m + \lambda_{11}) \frac{dv_x}{dt} - (m + \lambda_{22}) v_y \Omega_z - \lambda_{26} \Omega_z^2 = \sum_j K_{Pj} P_{\theta j} \cos \alpha_j - C_x \frac{\rho}{2} v^2 F_{\mathcal{L}} - R_{RX}; \quad (6.55)$$

$$(m + \lambda_{22}) \frac{dv_y}{dt} + (m + \lambda_{11}) v_x \Omega_z + \lambda_{26} \frac{d\Omega_z}{dt} = \sum_j K_{Pj} P_{\theta j} \sin \alpha_j - C_y \frac{\rho}{2} v^2 F_{\mathcal{L}} + R_{RY} \quad (6.56)$$

$$\begin{aligned} (J_z + \lambda_{66}) \frac{d\Omega_z}{dt} + \lambda_{26} \frac{dv_y}{dt} - (\lambda_{11} - \lambda_{22}) v_x v_y + \lambda_{26} v_x \Omega_z = \\ = \sum_j K_{Pj} P_{\theta j} (y_j - x_j \operatorname{tg} \alpha_j) \cos \alpha_j + (M_{IIZ} - M_{JIZ}) + R_{RY} x_R \end{aligned} \quad (6.57)$$

де m – маса судна;

$\lambda_{11,22}$ – приєднані маси води вздовж осей X і Y ;

J_Z – момент інерції судна під час обертання навколо осі Z ;

λ_{66} – приєднаний момент інерції води;

v_X – складова швидкості руху судна вздовж осі X ;

v_Y – складова швидкості руху судна вздовж осі Y ;

Ω_Z – кутова швидкість обертання навколо осі Z ;

λ_{26} – приєднаний статичний момент при обертанні судна навколо осі Z ;

P_{ej} – корисний упор j -го гребного гвинта і його частка K_{pj} у сумарному упорі;

α_j – кут нахилу лінії валу гребного гвинта до осі X ;

y_j, x_j – "координати" j -го гвинта в площині XGY ;

ρ – питома густина води;

F_d – наведена площа зануреної частини діаметральної площини судна;

M_{IIZ} – позиційний момент опору;

M_{IIZ} – демпфувальний момент опору;

R_X – поздовжня сила керма;

R_Y – поперечна сила керма;

x_R – відстань від центру системи координат до керма.

Сили й моменти (та їхні коефіцієнти) правих частин рівнянь (6.55)–(6.57) визначають таким чином:

$$C_X = C_{X0} \cos 1,5\beta_{op} - 0,07 \sin^4 1,5\beta_{op} + c_4 \left(\frac{2\beta_{op}}{\pi} \right)^3; \quad (6.58)$$

$$C_Y = 0,5C_Y^\beta \sin^2 \beta_{op} \cos \beta_{op} + c_2 \sin^2 \beta_{op} + c_3 \sin^4 2\beta_{op} \quad (6.59)$$

$$(M_{IIZ} - M_{IIZ}) = [m_1 \sin 2\beta_{op} + m_2 \sin \beta_{op} + m_3 \sin^3 2\beta_{op} + m_4 \sin^4 2\beta_{op}] \cdot \frac{\rho}{2} v^2 F_d L - [0,739 + 8,7T/L] C_{m0}^\omega \frac{\rho}{2} F_d L^2 v \Omega_Z; \quad (6.60)$$

$$R_{RY} = \mu_R \left[\beta_R - \chi_{II} \left(\arctg \frac{v_Y}{v_X} + \frac{\varepsilon L}{v} \Omega_Z \right) \right] \frac{\rho}{2} v^2 S_{II} \quad (6.61)$$

$$R_{RX} = C_{Xr} \frac{\rho}{2} v^2 S_{II} \quad (6.62)$$

де β_{op} – кут дрейфу судна;

S_{II} – наведена площа керма;

β_R – кут перекладки пера керма;

C_{X0} – коефіцієнт опору води руху на прямому курсі за $v=v_0$

c_4 – коефіцієнт поздовжньої позиційної сили опору води;

C_Y^β, c_2, c_3 – коефіцієнти сили корпусу;

m_1, m_2, m_3, m_4 – коефіцієнти позиційного моменту опору;

C_{m0}^ω – коефіцієнт демпфувального моменту опору;

μ_R – коефіцієнт бічної сили керма;

χ_{II} – наведений коефіцієнт впливу корпусу і гвинтів на кермо;

ε – величина, що визначається відношенням l_R / L (l_R – відстань між кермом і мідель-шпангоутом);

C_{Xr} – коефіцієнт опору керма.

Коефіцієнти $C_{X0}, c_4, C_Y^\beta, c_2, c_3, m_1, m_2, m_4, C_{m0}^\omega, \mu_R, K_R, \chi_{II}, C_{Xr}$ визначаються за графіками, номограмами, атласами.

Типовими представниками електроходів є судна льодового плавання і криголами. Крижаний покрив величезною мірою впливає на характер руху цих суден. Спосіб урахування впливу льоду (суцільного, битого, згуртованого) на параметри руху судна на прямому курсі та за криволінійною

траєкторією стосовно до розробленої узагальненої математичної моделі наведено у відповідній літературі.

Рух судна в нерухомій системі координат описується таким чином:

Поздовжня v_{X1} і поперечна v_{Y1} складові вектора швидкості центру тяжіння судна та його координати $X1$ і $Y1$ у нерухомій системі $X_1O_1Y_1$ визначаються за співвідношеннями:

$$v_{X1} = v \cos \varphi_C; \quad (6.63)$$

$$v_{Y1} = v \sin \varphi_C; \quad (6.64)$$

$$X1 = \int_0^t v_{X1} dt = \int_0^t v \cos \varphi_C dt; \quad (6.65)$$

$$Y1 = \int_0^t v_{Y1} dt = \int_0^t v \sin \varphi_C dt; \quad (6.66)$$

Кут швидкості судна φ_C і кут курсу ψ_C визначаються як:

$$\varphi_C = \psi_C - \beta_{op}; \quad (6.67)$$

$$\psi_C = \int_0^t \Omega_z dt. \quad (6.68)$$

6.3. Узагальнена математична модель.

Як видно з п. 3.2, система рівнянь (6.1)–(6.68), яка описує поведінку електроходів на маневрах, винятково складна. На перехідні режими роботи комплексу впливають сотні параметрів.

За такої ситуації, з одного боку, розв'язувати задачі аналізу поведінки пропульсивних комплексів на маневрах просто неможливо (навіть за сучасного рівня розвитку обчислювальної техніки), з іншого – результати таких досліджень, які виконані стосовно конкретних електроходів, можуть носити тільки окремих характер, що істотно знижує їхню наукову цінність.

Для скорочення числа параметрів, спрощення аналізу, надання спільності його результатам скористаємося поняттям наближеного динамічно-еквівалентного комплексу.

Відповідно до нього, систему рівнянь (6.1)–(6.68) приводять до безрозмірної форми і виокремлюють критерії її динамічної подібності – безрозмірні параметри (в далі – просто "параметри") пропульсивного комплексу. У результаті:

– число параметрів (критеріїв динамічної подібності) системи скорочується в 5-6 разів ;

– з'являються широкі можливості узагальнення результатів досліджень: комплекси з рівними значеннями параметрів матимуть однакові закони зміни (у відносних одиницях) відповідних режимних показників; одержувані результати будуть прийнятними для всіх електроходів розглянутого класу.

Для переходу до безрозмірної форми запису використовується поняття базових значень відносних режимних показників. У якості таких (їх позначають індексом "0") приймають значення, що відповідають роботі пропульсивного комплексу в номінальному сталому режимі, під час руху судна вільною, глибокою, спокійною водою прямим курсом. Тоді відносні значення відповідних режимних показників визначатимуться як відношення поточних значень до базових. Будемо позначати їх символом "0" у показнику степеня (наприклад $M_D^0 = M_D / M_{D0}$). (Відносний час T^0 визначається дещо інакше:

$$T^0 = \frac{v_0}{L} t,$$

де t – реальний час.)

Остаточний варіант узагальненої математичної моделі перехідних і сталих режимів роботи пропульсивних комплексів електроходів (розроблений на базі системи рівнянь (6.1)–(6.68)) представлений (опускаючи всі проміжні викладки) нижче.

Рівняння руху первинного двигуна

$$\frac{d\omega_D^0}{dT^0} = N_D (M_D^0 - K_{D1} M_G^0 - K_{DT}). \quad (6.69)$$

Обертовий момент первинного двигуна при $\frac{1}{\omega_{DP}^0} \leq 1$:

а) при $\omega_D^0 \leq \psi_D^0 \omega_{DP}^0$

$$M_D^0 = \xi_D^0 \frac{1 + (\omega_{DP}^0 - \omega_D^0) \beta_D}{1 + (\omega_{DP}^0 - 1) \beta_D} ;$$

б) при $\psi_D^0 \omega_{DP}^0 < \omega_D^0 \leq \frac{\xi_D^0 (c_{DP} - 1) + 1}{1/\omega_{DP}^0}$

$$M_D^0 = \frac{[1 + \omega_{DP}^0 (1 - \psi_D^0) \beta_D] \cdot \left[\frac{c_{DP} - \frac{\omega_D^0}{\psi_D^0 \omega_{DP}^0}}{c_{DP} - 1} + \xi_D^0 - 1 \right]}{1 + (\omega_{DP}^0 - 1) \beta_D} .$$

Обертовий момент первинного двигуна при $\frac{1}{\omega_{DP}^0} > 1$:

а) при $\omega_D^0 \leq \psi_D^0 \omega_{DP}^0$

$$M_D^0 = \xi_D^0 \frac{[1 + (\omega_{DP}^0 - \omega_D^0) \beta_D] \cdot (c_{DP} - 1)}{c_{DP} - 1/\omega_{DP}^0} ; \quad (6.70)$$

б) при $\psi_D^0 \omega_{DP}^0 < \omega_D^0 \leq \frac{\xi_D^0 (c_{DP} - 1) + 1}{1/\omega_{DP}^0}$

$$M_D^0 = \frac{[1 + \omega_{DP}^0 (1 - \psi_D^0) \beta_D] \cdot \left[(\xi_D^0 - 1)(c_{DP} - 1) + c_{DP} - \frac{\omega_D^0}{\psi_D^0 \omega_{DP}^0} \right]}{c_{DP} - 1/\omega_{DP}^0} .$$

Рівняння руху регулятора первинного двигуна

$$\frac{d\xi_D^0}{dT^0} = C_{RD1} (\omega_D^0 - \omega_{Dзад}^0) - C_{RD2} \xi_D^0 . \quad (6.71)$$

Рівняння, що описують генератор електричного струму:

а) момент опору первинному двигуну

$$M_G^0 = C_{G1} \frac{U_G^0 I_G^0}{\omega_D^0} \cos \varphi_G + C_{G2} \frac{(U_G^0)^2}{\omega_D^0} \sin 2\theta_G ; \quad (6.72)$$

б) напруга на виході генератора

$$U_G^0 = \frac{1}{\cos \theta_G} [C_{G3} E_G^0 - C_{G4} (I_G^0)^{(1+RT)} \cos \psi_G - C_{G5} I_G^0 \omega_D^0 \sin \psi_G] ; \quad (6.73)$$

в) поздовжня складова результуючої ЕРС генератора

$$E_G^0 = \omega_D^0 (C_{G7} I_{GV}^0 - C_{G8} I_G^0 \sin \psi_G - C_{G9} I_G^0) , \quad (6.74)$$

$$\text{де } \varphi_G = \alpha_G + \frac{\gamma_G}{2} \quad (6.75)$$

$$\psi_G = \arccos \left(C_{G10} \frac{U_G^0}{\omega_D^0 I_{GV}^0} \cos \varphi_G \right) ; \quad (6.76)$$

$$\theta_G = \psi_G - \varphi_G ; \quad (6.77)$$

$$\gamma_G = \arccos \left(\cos \alpha_G - C_{G11} \frac{I_M^0 \omega_D^0}{E_G^0} \right) - \alpha_G . \quad (6.78)$$

Рівняння перехідних процесів у збуджувальному пристрої генератора:

а) струм збудження генератора

$$\frac{dI_{GV}^0}{dT^0} = N_{GV} [E_{GV}^0 - C_{GV2} I_{GV}^0 - (C_{GV2} - 1) I_G^0]; \quad (6.79)$$

б) ЕРС на виході збудника

$$E_{GV}^0 = C_{GV3} \phi_{GV}^0 + (1 - C_{GV3}) (I_{GV}^c)^0; \quad (6.80)$$

в) магнітний потік збудника

$$\left(\frac{d\phi_{GV}^0}{dT} \right) = N_{GV1} [U_{GV\Sigma}^0 - \phi_{GV}^0]; \quad (6.81)$$

г) струм в обмотці самозбудження

$$\frac{d(I_{GV}^c)^0}{dT^0} = N_{GV2} [E_{GV}^0 - (1 - C_{GV6}) I_{GV}^0 - C_{GV6} (I_{GV}^c)^0]. \quad (6.82)$$

Напруга на виході перетворювача електроенергії

$$U_M^0 = K_{SE} \frac{U_{G0}}{U_{M0}} \mu_{SE}(T^0) U_G^0. \quad (6.83)$$

Струм на вході перетворювача енергії (струм генератора)

$$I_G^0 = C_{G6} \left| \frac{\sin \frac{\gamma_G}{2}}{\frac{\gamma_G}{2}} \right| \cdot \mu_{SE}(T^0) I_M^0 \frac{\cos \phi_M}{\cos \phi_G}. \quad (6.84)$$

Рівняння руху гребного електродвигуна

$$\frac{d\omega_M^0}{dT^0} = N_M (M_M^0 - K_{M1} M_P^0 - K_{MT}). \quad (6.85)$$

Математичний опис законів зміни основних режимних показників електродвигунів досить складний. Для полегшення сприйняття математичної моделі запишемо переведені в безрозмірні величини формули (6.18)–(6.30) окремо за кожним із розглянутих типів гребних електродвигунів (що жодною мірою не впливає на спільність математичного апарату).

1. Для гребних електродвигунів постійного струму і вентильних:

а) обертальний момент

$$M_M^0 = \phi_M^0 I_M^0 (K_M^{in})^0; \quad (6.86)$$

б) магнітний потік

$$\phi_M^0 = \sqrt{C_{M1} (I_{MV}^0)^2 + C_{M2} I_{MV}^0 + C_{M3} - C_{M8} I_M^0 (C_{M9} I_{MV}^0 + C_{M10}) \cdot \sin \gamma_{KC} + C_{M11} (I_M^0)^2} \times \\ \times (K_{MD}^2 \sin^2 \gamma_{KC} + K_{MQ}^2 \cos^2 \gamma_{KC}); \quad (6.87)$$

в) струм двигуна

$$I_M^0 = C_{M12} U_M^0 - C_{M13} \phi_M^0 (K_M^{in})^0 \omega_M^0; \quad (6.88)$$

г) коефіцієнт інвертування

$$(K_M^{in})^0 = C_{M15} [\cos \beta_M^{in} + \cos \delta_M^{in}]; \quad (6.89)$$

д) сумарний кут комутації

$$\gamma_{KC} = \left(\arctg \frac{C_{M4} I_M^0}{C_{M5} I_{MV}^0 + C_{M6}} + \frac{\beta_M^{in} + \delta_M^{in}}{2} \right) \quad (6.90)$$

е) коефіцієнт потужності на вході двигуна

$$\cos \phi_M = \cos \left(\frac{\beta_M^{in} + \delta_M^{in}}{2} \right). \quad (6.91)$$

2. Для асинхронного гребного електродвигуна:

а) обертальний момент

$$M_M^0 = C_{M16} \frac{\gamma^2}{(C_{M19}\alpha - C_{M20}\omega_M^0)} \cdot \frac{1}{R_f(\alpha, \omega_M^0)} ; \quad (6.92)$$

б) струм

$$I_M^0 = C_{M24} \gamma \frac{1}{R_f(\alpha, \omega_M^0)} ; \quad (6.93)$$

в) коефіцієнт потужності двигуна

$$\cos \varphi_M = \frac{C_{M17} + \frac{C_{M21}}{C_{M19}\alpha - C_{M20}\omega_M^0} + \frac{C_{M23}\alpha}{2(C_{M19}\alpha - C_{M20}\omega_M^0)}}{\sqrt{C_{M17} + \frac{C_{M21}}{C_{M19}\alpha - C_{M20}\omega_M^0}}} \cdot \frac{1}{R_f(\alpha, \omega_M^0)}, \quad (6.94)$$

де $R_f(\alpha, \omega_M^0)$ – допоміжна функція:

$$R_f(\alpha, \omega_M^0) = \sqrt{(C_{M17} + C_{M18}\alpha^2) + \frac{C_{M21} + C_{M22}\alpha^2}{(C_{M19}\alpha - C_{M20}\omega_M^0)^2} + \frac{C_{M23}\alpha}{C_{M19}\alpha - C_{M20}\omega_M^0}} \quad (6.95)$$

3. Для синхронного гребного електродвигуна:

а) обертальний момент

$$M_M^0 = \frac{1}{N_M} \frac{d\alpha}{dT} + K_{M1} M_p^0 + K_{MT} \quad (6.96)$$

б) струм двигуна

$$I_M^0 = \sqrt{C_{M28} (I_{MV}^0)^2 + C_{M29} \left(\frac{\gamma}{\alpha} \right)^2 - C_{M30} \frac{I_{MV}^0 \gamma}{\alpha} \cos \theta_M} ; \quad (6.97)$$

в) коефіцієнт потужності двигуна

$$\cos \varphi_M = \cos \left[\arctg \frac{C_{M31} \gamma - \alpha I_{MV}^0 \cos \theta_M}{\alpha I_{MV}^0 \sin \theta_M} \right]; \quad (6.98)$$

г) е.д.с. намагнічування

$$E_{0M}^0 = \alpha I_{MV}^0 . \quad (6.99)$$

Кут навантаження θ_M знаходиться з рішення рівняння

$$M_M^0 = C_{M26} \frac{E_{0M}^0 \gamma}{\alpha} \sin \theta_M + C_{M27} \frac{\gamma^2}{\alpha^2} \sin 2\theta_M . \quad (6.100)$$

Рівняння процесів у збуджувальній пристрої гребного електродвигуна:

а) струм в обмотці збудження електродвигуна

$$\frac{dI_{MV}^0}{dT^0} = N_{MV} [E_{MV}^0 - I_{MV}^0]; \quad (6.101)$$

б) ЕРС на виході збудника

$$E_{MV}^0 = C_{MV3} \phi_{MV}^0 + C_{MV4} (I_{MV}^c)^0 ; \quad (6.102)$$

в) магнітний потік

$$\frac{d\phi_{MV}^0}{dT^0} = N_{MV1} [U_{MU\Sigma}^0 - \phi_{MV}^0] ; \quad (6.103)$$

г) струм в обмотці самозбудження

$$\frac{d(I_{MV}^c)}{dT^0} = N_{MV2} [E_{MV}^0 - (1 - C_{MV6}) I_{MV}^0 - C_{MV6} (I_{MV}^c)^0]. \quad (6.104)$$

Результуюча напруга на вході збудника генератора

$$U_{GU\Sigma}^0 = K_{UG0} U_{UG}^0 - K_{UG1} U_{UG1}^0 - K_{UGP} U_{UGP}^0 - K_{UGU} U_{UGU}^0 - K_{UG\Theta} U_{UG\Theta}^0 - (K_{UGT})^T (U_{UGT}^0)^T - (K_{UGT})^T (U_{UGT}^0)^T, \quad (6.105)$$

$$\text{де} \quad \frac{dU_{UGI}^0}{dT^0} = K_{UGI2} (I_G^0 - I_{G1}^0) + K_{UGI1} \cdot \frac{d(I_G^0 - I_{G1}^0)}{dT^0}; \quad (6.106)$$

$$\frac{dU_{UGP}^0}{dT^0} = K_{UGP2} (I_G^0 U_G^0 - P_{G1}^0) + K_{UGP1} \frac{d(U_G^0 I_G^0 - P_{G1}^0)}{dT^0}; \quad (6.107)$$

$$\frac{dU_{UGU}^0}{dT^0} = K_{UGU2} (U_G^0 - U_{G1}^0) + K_{UGU1} \cdot \frac{d(U_G^0 - U_{G1}^0)}{dT^0}; \quad (6.108)$$

$$\frac{dU_{UG\omega}^0}{dT^0} = K_{UG\omega2} (\omega_M^0 - \omega_{M1}^0) + K_{UG\omega1} \cdot \frac{d(\omega_M^0 - \omega_{M1}^0)}{dT^0}; \quad (6.109)$$

$$\frac{d(U_{UGI}^0)^r}{dT^0} = K_{UGI2}^r \frac{d}{dT^0} \left(\frac{dI_G^0}{dT^0} \right) + K_{UGI1}^r \frac{dI_G^0}{dT^0}. \quad (6.110)$$

Результуюча напруга на вході збудника гребного електродвигуна

$$U_{MU\Sigma}^0 = K_{UM0} U_{UM}^0 + K_{UMP} U_{UMP}^0 - K_{UM\omega} U_{UM\omega}^0 - K_{UMI} U_{UMI}^0, \quad (6.111)$$

де

$$\frac{dU_{UMP}^0}{dT^0} = K_{UMP1} (M_M^0 \omega_M^0 - P_{M1}^0) + K_{UMP2} \frac{d(M_M^0 \omega_M^0 - P_{M1}^0)}{dT^0} \quad (6.112)$$

$$\frac{dU_{UM\omega}^0}{dT^0} = K_{UM\omega1} (\omega_M^0 - \omega_{M1}^0) + K_{UM\omega2} \frac{d(\omega_M^0 - \omega_{M1}^0)}{dT^0}; \quad (6.113)$$

$$\frac{dU_{UMI}^0}{dT^0} = K_{UMI1} (I_M^0 - I_{M1}^0) + K_{UMI2} \frac{d(I_M^0 - I_{M1}^0)}{dT^0}. \quad (6.114)$$

Корпус судна.

Зазвичай приєднанням статичним моментом $\epsilon \lambda_{26}$ нехтують. У цьому разі рівняння руху судна в горизонтальній площині, переведені в безрозмірну форму запису, матимуть такий вигляд:

$$\frac{dv_X^0}{dT^0} = C_{\lambda2} v_Y^0 \Omega_Z^0 + N_X \left\{ \sum_j K_{Pj} P_{ej}^0 - C_{RX} \beta_{RP} (v^0)^2 - R_X^0 \right\}; \quad (6.115)$$

$$\frac{dv_Y^0}{dT^0} = -\frac{1}{C_{\lambda2}} v_X^0 \Omega_Z^0 + \frac{N_X}{C_{\lambda2}} \left\{ \sum_j K_{Pj} \alpha_{jz} P_{ej}^0 + C_{RY} \beta_{RP} (v^0)^2 - R_Y^0 \right\}; \quad (6.116)$$

$$\frac{d\Omega_Z^0}{dT^0} = -\frac{N_\Omega}{N_X} C_{\lambda21} v_X^0 v_Y^0 + N_\Omega \left\{ \sum_j K_{Pj} h_{Pj} P_{ej}^0 + (M_{\Pi Z}^0 - M_{\mathcal{I}Z}^0) + C_{RY} X_R^0 \beta_{RP} (v^0)^2 \right\}, \quad (6.117)$$

де

$$R_X^0 = \left\{ C_{11} \cos 1,5\beta_{op} - C_{12} \sin^4 1,5\beta_{op} + C_{13} \left(\frac{2\beta_{op}}{\pi} \right)^3 \right\} \cdot (v^0)^2; \quad (6.118)$$

$$R_Y^0 = \{ C_{21} \sin 2\beta_{op} \cdot \cos \beta_{op} + C_{22} \sin^2 \beta_{op} + C_{23} \sin^4 2\beta_{op} \} \cdot (v^0)^2; \quad (6.119)$$

$$M_{\Pi Z}^0 - M_{\mathcal{I}Z}^0 = [C_{61} \sin 2\beta_{op} + C_{62} \sin \beta_{op} + C_{63} \sin^3 2\beta_{op} + C_{64} \sin^4 2\beta_{op}] (v^0)^2 - C_{65} \Omega_Z^0 v^0; \quad (6.120)$$

$$\beta_{RP} = K_R \beta_R - \chi_{II} \left(\arctg \beta_{op} - \epsilon \frac{\Omega_Z^0}{v^0} \right) \quad (6.121).$$

Таким чином, до системи рівнянь, що описують перехідні режими в безрозмірних одиницях, входять вирази: (6.48)–(6.54), (6.69)–(6.121).

У процесі перетворення рівнянь (що описують перехідні процеси в пропульсивних комплексах в абсолютних одиницях) у безрозмірну форму запису, було **автоматично** отримано **критерії динамічної подібності** – ті самі безрозмірні параметри пропульсивних комплексів. Саме цими **критеріями** (параметрами) визначаються закони зміни у часі режимних показників комплексів.

Для того щоб розрахувати чисельні значення критеріїв динамічної подібності для кожного конкретного електроходу, достатньо підставити значення відповідних параметрів пропульсивного комплексу у відповідні співвідношення.

Способи дослідження перехідних і сталих режимів роботи на ЕОМ

Для аналізу маневрених режимів роботи силових установок у складі пропульсивних комплексів електроходів розроблено пакет прикладних програм. "Базовими" є програми, які дають змогу розраховувати закони зміни у часі відносних режимних показників під час виконання електроходами найрізноманітніших маневрів.

Відповідно до процедури розрахунків, під час аналізу маневрених режимів:

– розраховують і вводять у вигляді вихідних даних безрозмірні параметри комплексів; для будь-якого конкретного електропривода – це постійні ("конструктивні") параметри; під час проведення наукових досліджень і конструкторських опрацювань значеннями цих параметрів можна варіювати;

– відповідно до досліджуваного маневру вводять параметри управління комплексом – величини, що характеризують інтенсивність зміни керівних впливів і усталені їхні значення, відповідно до положень рукояток постів управління та переключення пера керма;

– задаються початкові умови;

– відповідно до обраних маневрів формуються закони управління кожним силовим контуром (як правило, кількість контурів 2 – 3) і рульовим пристроєм, наприклад:

а) під час розгону $0 \leq T^0 \leq T_1^0$

$$\alpha = \alpha_{\text{уст.}} (1 - \exp(-k_1 \cdot T^0)), \quad \gamma = \gamma(\alpha);$$

б) при реверсі з переднього ходу на задній $T_1^0 < T^0 \leq T_2^0$

$$\alpha = 0, \quad \gamma = \gamma_{\text{уст.}} (1 - \exp(-k_\gamma (T^0 - T_1^0))); \quad \text{для } \omega_M \geq 0$$

$$\alpha = \alpha_{\text{уст.}} (1 - \exp(-k_2 (T^0 - T_1^0))), \quad \gamma = \gamma(\alpha); \quad \text{для } \omega_M < 0$$

в) при реверсі із заднього ходу на передній $T_2^0 < T^0 < T_3^0$

$$\alpha = 0, \quad \gamma = \gamma_{\text{уст.}} (1 - \exp(-k_\gamma (T^0 - T_2^0))); \quad \text{для } \omega_M \leq 0$$

$$\alpha = \alpha_{\text{уст.}} (1 - \exp(-k_3 (T^0 - T_2^0))), \quad \gamma = \gamma(\alpha); \quad \text{для } \omega_M > 0,$$

– розраховуються поточні значення основних режимних показників кожного силового контуру;

– визначаються гідродинамічні сили й моменти, що діють на судно;

– обчислюються поздовжня і поперечна сили керма і момент, що діє на судно від поперечної сили;

– розраховуються поточні значення параметрів руху судна у пов'язаній із ним системі координат, а потім - у незв'язаній системі.

У процесі розрахунків реєструються такі режимні показники (у відносних величинах):

а) по кожному силовому контуру

– кутова швидкість обертання первинного двигуна – ω_D ;

– обертальний момент первинного двигуна – M_D ;

– потужність первинного двигуна – P_D ;

– напруги на виході генератора – U_G ;

– струм збудження генератора – I_{GV} ;

– струм якоря генератора – I_G ;

– відносна напруга керування перетворювачем – відносна напруга керування перетворювачем – γ ;

– напруга на вході гребного електродвигуна – U_M ;

– струм гребного електродвигуна – I_M ;

– обертальний момент гребного електродвигуна – M_M ;

– кутова швидкість обертання гребного електродвигуна і гребного гвинта – ω_M ;

б) руху судна:

– швидкість руху судна – v ;
 – складова швидкості v уздовж поздовжньої осі X – v_X ;
 – складова швидкості v уздовж поперечної осі Y – v_Y ;
 – кутова швидкість обертання судна навколо осі Z – кутова швидкість обертання судна навколо осі Z Ω_Z ;

- кут дрейфу – $\beta_{др}$;
- пройдений шлях уздовж осей $X1$ і $X1$, відповідно – $X1$ і $Y1$;
- кут курсу – ψ_C .

За необхідності, можуть реєструватися і будь-які інші, одержувані в процесі розрахунків, режимні показники.

Розроблена математична модель являє собою систему звичайних диференціальних рівнянь. Вона має такі відмінні риси:

- а) рівняння математичного опису перехідних процесів належать до категорії жорстких рівнянь; постійні часу в диференціальних рівняннях вельми істотно відрізняються одне від одного;
- б) інтенсивності зміни режимних показників на окремих етапах перехідних процесів змінюються у великих межах – на початкових стадіях розгону і особливо реверсування силової установки вони максимальні, а під час наближення до сталих режимів – навпаки мінімальні.

Для побудови алгоритму її розв'язання було проаналізовано кілька методів, заснованих на розв'язанні задачі Коші:

- метод Ейлера (з кількома значеннями кроку інтегрування);
- метод Гіра;
- метод Рунге–Кутти–Мерсона.

Результати розрахунків за методом Гіра дають деякі "втрати" інформації на етапах реверсування силової установки. Метод же Рунге-Кутти-Мерсона, поряд із високою точністю обчислень, забезпечує мінімальну тривалість розрахунків (на 80 % меншу, ніж за методом Гіра) і позбавляє проектувальника від необхідності підбору кроку інтегрування. Виходячи з цього, в основу розроблених алгоритмів закладався метод Рунге-Кутти-Мерсона.

Як приклад, далі на рис. 6.7 і 6.8, наведено результати аналізу деяких характерних маневрів, які виконують електроходи з різним типом силової установки.

На рис. 6.7 наведено результати розрахунку маневру: розгін ($0 \leq T^0 < 6$) – реверс із переднього ходу на задній ($6 < T^0 \leq 9$) – реверс із заднього ходу на передній ($T^0 > 9$). Розрахунок виконано для електроходу з *гребною електричною установкою подвійного роду струму* з реверсом за магнітним потоком ГЕД.

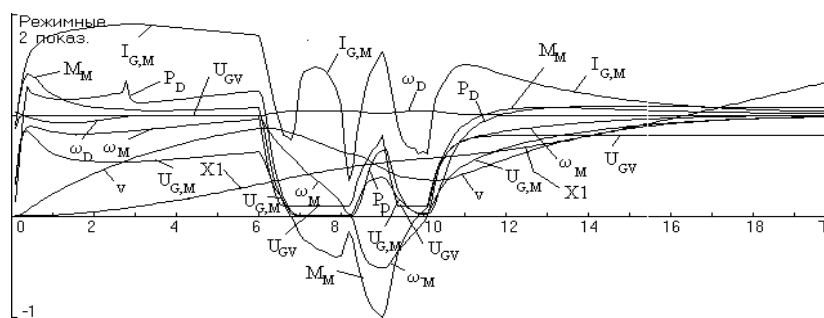


Рис. 6.7.

Режимні показники пропульсивного комплексу електрохода з ГЕУ подвійного роду струму

На рис. 6.8 показано закони зміни режимних показників пропульсивного комплексу стосовно іншого варіанту: розгін електроходу прямолінійною траєкторією ($0 \leq T^0 < 8$) – маневр (при $T^0 > 8$) гвинтами і кермом на відворот судна. Розрахунок виконано для електрохода з *гребною електричною установкою з частотно-керованими асинхронними ГЕД*. (Буквенний символ "L" у

позначеннях кривих на рис.6.8 відповідає лівому контуру, а символ "P" - правому контуру; масштаб за показником X1 - десятикратний.)

Наведені результати показують прийнятність розробленої математичної моделі та отриманих на її основі алгоритмів і програм для розрахунків законів зміни в часі режимних показників пропульсивних комплексів електроходів під час роботи на маневрах.

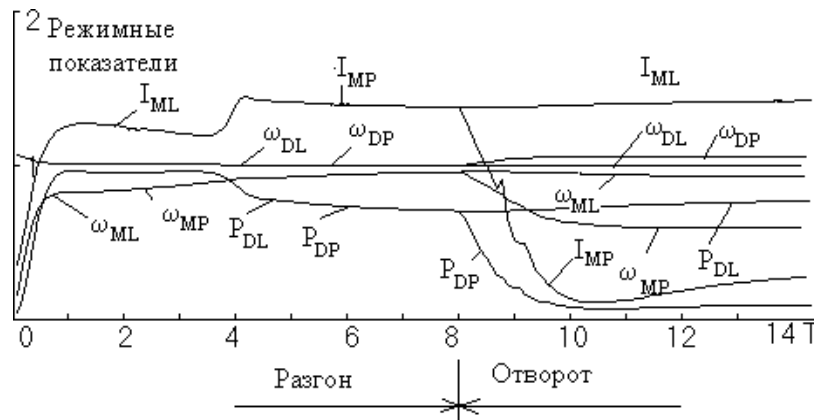


Рис. 6.8 а. Режимні показники силової установки електрохода з ГЕУ з частотно-керуваними ГЕД

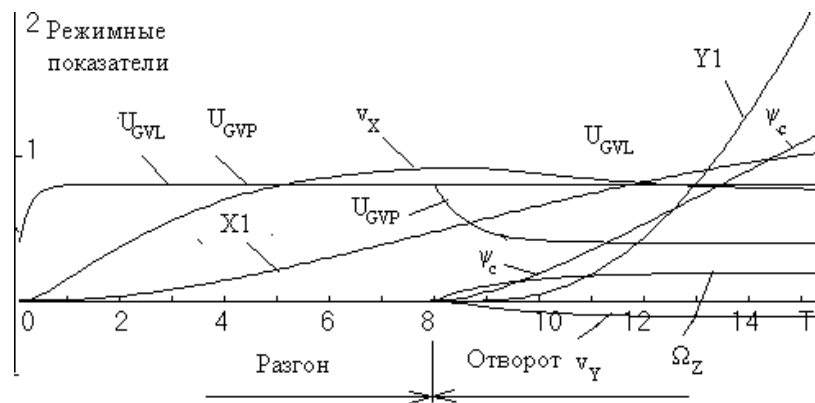


Рис. 5.8 б. Режимні показники електроходу з ГЕУ

Як приклад використання розробленого математичного апарату, нижче наводиться розрахунок деяких маневрів стосовно конкретного електроходу.

Розглянемо проект судна з перспективним варіантом електроенергетичної установки – на змінному струмі з частотно-керуваними гребними електродвигунами.

Основні технічні характеристики проекту за корпусом, рушійно-рульовим комплексом, джерелами енергії близькі до електроходу класу лінійного криголама (гребна установка прототипу виконана на змінно-постійному струмі). Надалі будемо називати судно, що розглядається, "Проектом".

Основні характеристики судна:

– довжина	51,7 м
– ширина	15,01 м
– осадка	4,2 м
– водотонажність	1763 т
– потужність головних двигунів	2200 кВт
– швидкість руху	7 м/с.

До складу силової установки входять:

- два дизель-генераторні агрегати типу ДГР $\frac{1000}{750}$, кожен з яких містить дизель 10Д $\frac{20,7}{2 \times 25,4}$ з ефективною потужністю 1100 кВт при 750 об/хв і генератор МСК 1270-750 потужністю 1000 кВт при 750 об/хв;
- тиристорні перетворювачі частоти;
 - два асинхронні гребні електродвигуни, що мають такі основні розрахункові параметри:
 - потужність 1000 кВт
 - струм статора 1100 А
 - коефіцієнт потужності 0,835
 - обертальний момент 10670 Нм
 - кутова швидкість обертання 93,67 с⁻¹
- основні обмотувальні дані
- активний опір статора 0,00419 Ом
 - реактивний опір статора 0,0879 Ом
 - приведений активний опір ротора 0,0359 Ом
 - приведений реактивний опір ротора 0,1319 Ом
 - коефіцієнт приведення опорів 34,336
 - реактивний опір намагнічування 1,503 Ом.
- Чисельні значення основних безрозмірних параметрів пропульсивного комплексу "Проект", представлені в табл. 6.1.

Таблиця 6.1

Чисельні значення безрозмірних параметрів «Проекту»

Параметр	Значення	Параметр	Значення	Параметр	Значення
C_{D1}	1	C_{G10}	0,69	C_{M24}	11
C_{D2}	0,05	C_{G11}	0,103	α_{iz}	0
c_{DR}	1,04	N_{VG}	3	C_{14}	1,204
N_D	1,937	N_M	5,1	C_{21}	3,372
C_{G1}	0,5	C_{M16}	14,127	C_{22}	21,19
C_{G2}	0,75	C_{M17}	0,0164	C_{23}	1,686
C_{G3}	1	C_{M18}	40,21	C_{61}	3,564
C_{G5}	0,075	C_{M19}	1	C_{62}	0,048
C_{G7}	1,45	C_{M20}	0,895	C_{63}	1,301
C_{G8}	0,608	C_{M21}	0,0001	C_{64}	0,241
N_X	0,132	N_Ω	0,99	C_{65}	4,076
C_{M22}	1,1204	χ_Π	0,45	$C_{\lambda 2}$	1,368
C_{M23}	0,233	C_{RY}	1,532	$C_{\lambda 21}$	0,736
$y_i - \alpha_{iz}$	0,1				

Розглянемо кілька характерних маневрів, які виконує електрохід на прямому курсі і за криволінійною траєкторією. Розрахунок режимних показників пропульсивних комплексів на цих маневрах, виконаний за розглянутою вище методикою, дав результати, представлені на мал. 6.9 и мал. 6.10.

На рис. 6.9 наведено закони зміни режимних показників пропульсивного комплексу при виконанні судном декількох маневрів, що чергуються: розгону ($0 < T \leq 111$) – реверсу з переднього ходу на задній ($111 \leq T \leq 148$) – реверсу із заднього ходу на передній ($T > 148$). Розрахунок закінчувався після закінчення 211 секунд (28,5 відносних одиниць часу). Масштаби в абсолютних одиницях за кожним режимним показником наведено для зручності користування в під рисунковому підписі, а самі криві побудовано в реальних одиницях часу.

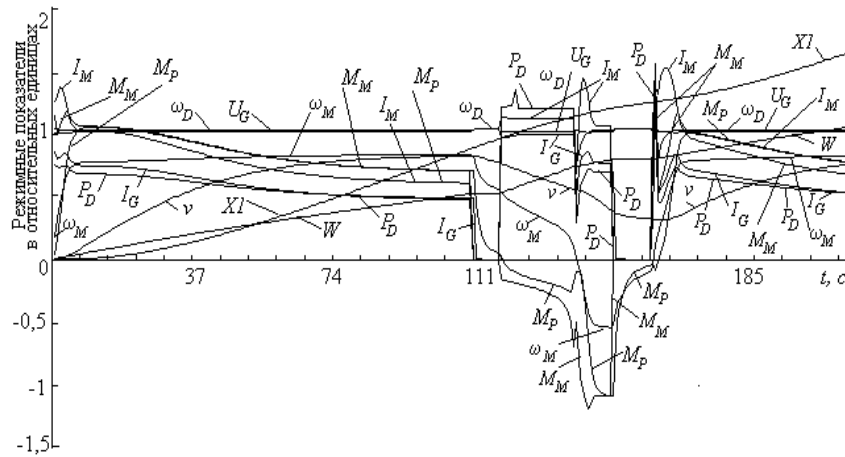


Рис. 6.9. Режимні показники силової установки пропульсивного комплексу "Проект" під час виконання маневру "розгін ($0 < t \leq 111$) – реверс із переднього ходу на задній ($111 < t \leq 150$) – реверс із заднього на передній ($150 < t \leq 222$)

Відносній одиниці по осі ординат відповідають:

$$\begin{aligned} \omega_D &= 78,5 \text{ c}^{-1}; U_G = 400 \text{ В}; I_M = 1206 \text{ А}; M_P = 10840 \text{ Нм}; v = 7 \text{ м/с}; \\ W &= 30 \text{ о.е. (відносних одиниць)}; P_D = 1100 \text{ кВт}; I_G = 1800 \text{ А}; \\ M_M &= 10840 \text{ Нм}; \omega_M = 25,12 \text{ c}^{-1}; X1 = 517 \text{ м}. \end{aligned}$$

Одна поділка по осі часу відповідає 7,4 с.

На рис. 6.10 показано закони зміни режимних показників під час виконання маневру: розгін електроходу ($0 < T \leq 111$) – вихід судна на циркуляцію ($111 < T \leq 222$). Маневр закінчується при виконанні судном повного обороту.

Необхідна для аналізу результатів розрахунку інформація наведена, як і в попередньому випадку, у під рисунковому підписі.

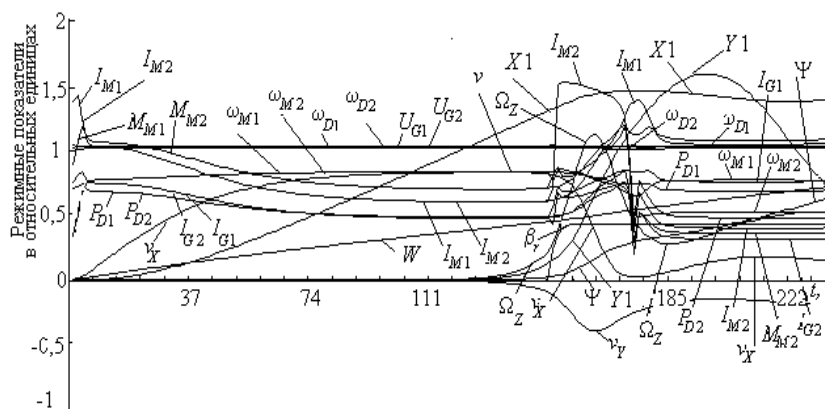


Рис. 6.10. Режимні показники силової установки пропульсивного комплексу "Проект" під час виконання маневру "розгін ($0 < t \leq 111$) – вихід електроходів на циркуляцію ($150 < t \leq 222$)

Відносній одиниці по осі ординат відповідають:
 $\omega_D=78,5 \text{ c}^{-1}$; $U_G=400 \text{ В}$; $I_M=1206 \text{ А}$; $M_P=10840 \text{ Нм}$;
 $v=7 \text{ м/с}$; $\Omega_Z=0,145 \text{ c}^{-1}$; $P_D=1100 \text{ кВт}$; $I_G=1800 \text{ А}$; $M_M=10840 \text{ Нм}$;
 $\omega_M=25,12 \text{ c}^{-1}$; $X_1=517 \text{ м}$; $Y_1=51,7 \text{ м}$; $\Psi=10 \text{ рад}$; $\beta_{r \text{ уст.}}=30^\circ$;
 $W=50 \text{ о.е. (відносних одиниць)}$;
 Одна поділлка по осі часу відповідає 7,4 с.

Отримані результати ілюструють можливості використання розробленого математичного апарату при розв'язанні конкретних практичних задач.

2. МЕТОД АНАЛІЗУ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ПРОПУЛЬСИВНИХ КОМПЛЕКСІВ НА ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ РОБОТИ

Постановка задачі

У процесі дослідження і проектування суднових гребних електроенергетичних установок, під час їхнього налаштування і налагодження, при експлуатації тощо, доводиться оцінювати якість роботи того чи іншого елемента гребної установки і якості роботи всього пропульсивного комплексу загалом. Стосовно маневрування – це маневрені якості.

Під час оцінювання маневрених якостей пропульсивних комплексів насамперед розглядають інерційно-гальмівні характеристики і керованість. Характерними маневрами, що дають змогу судити про маневрові якості, є розгін, гальмування, реверс судна, циркуляція.

Аналіз результатів численних розрахунків та наявна практика проектування й експлуатації суден з електричним рухом дають підстави запропонувати для оцінки якості роботи пропульсивних комплексів такі показники:

Під час маневрування на прямолінійній траєкторії:

J_1 – час виконання маневру – T ;

J_2 – відносні витрати енергії на виконання маневру – W ;

J_3 – нерівномірність (відхилення) кутової швидкості обертання первинних двигунів –

$$\Delta \omega_D = \frac{\omega_{D \max} - \omega_{D \min}}{\omega_{D \text{ усн}}};$$

J_4 – максимальна потужність первинних двигунів –

$$P_{Dm} = P_{D \max} / P_{D \text{ усн}};$$

J_5, J_6 – сплески (кидки) струму генераторів під час розгону – $(I_G)_{Pm}$ і під час реверсу – $(I_G)_{Tm}$

$$(I_G)_{Pm} = (I_G)_{P \max} / (I_G)_{P \text{ усн}}, \quad (I_G)_{Tm} = (I_G)_{T \max} / (I_G)_{T \text{ усн}};$$

J_7, J_8 – усталені значення струму генераторів під час розгону $(I_G)_{P \text{ усн.}}$ і реверсу $(I_G)_{T \text{ усн.}}$;

J_9 – перепад напруги на виході генераторів – ΔU_G

$$\Delta U_G = \frac{U_{G \max} - U_{G \min}}{U_{G \text{ усн}}};$$

J_{10}, J_{11} – тривалості розгону $T_{ГЕД \text{ разг.}}$ і реверсу $T_{ГЕД \text{ рев.}}$ ГЕД і гребних гвинтів;

J_{12}, J_{13} – сплески (кидки) струму ГЕД під час розгону $(I_M)_{Pm}$ і під час реверсу $(I_M)_{Tm}$

$$(I_M)_{Pm} = (I_M)_{P \max} / (I_M)_{P \text{ усн}}, \quad (I_M)_{Tm} = (I_M)_{T \max} / (I_M)_{T \text{ усн}};$$

J_{14}, J_{15} – сплески (кидки) обертального моменту ГЕД під час розгону $(M_M)_{Pm}$ і під час реверсу $(M_M)_{Tm}$

$$(M_M)_{Pm} = (M_M)_{P \max} / (M_M)_{P \text{ усн}}; \quad (M_M)_{Tm} = (M_M)_{T \max} / (M_M)_{T \text{ усн}};$$

J_{16}, J_{17} – усталені значення обертального моменту ГЕД під час розгону $(M_M)_{P \text{ усн}}$ і під час реверсу $(M_M)_{T \text{ усн}}$;

J_{18}, J_{19} – усталені значення кутової швидкості обертання ГЕД і гребних гвинтів під час розгону $(\omega_M)_{P \text{ усн.}}$ і під час реверсу $(\omega_M)_{T \text{ усн.}}$;

J_{20}, J_{21} – тривалості протікання перехідних процесів у силовій установці під час розгону $(T_{CY})_{\text{разг.}}$ і під час реверсу $(T_{CY})_{\text{рев.}}$;

J_{22} , – максимальна швидкість судна до кінця розгону – $v_{\max}$;

J_{23} – тривалість розгону пропульсивного комплексу до заданого значення швидкості $(T)_{V=V_{\text{зад}}}$;

J_{24} – пройдений судном шлях по закінченню маневру – $(XI)_{\text{разг.}}$ або $(XI)_{\text{тор.}}$.

При циркуляційному русі:

J_{25}, J_{26} – відносна зміна потужності первинних двигунів зовнішнього – $(\Delta P_D)_1$ і внутрішнього – $(\Delta P_D)_2$ щодо центру циркуляції силових контурів, під час виходу електроходу на сталу циркуляцію

$$(\Delta P_D)_1 = P_{D \text{ лев.}} / P_{D \text{ нач.}}, \quad (\Delta P_D)_2 = P_{D \text{ прав.}} / P_{D \text{ нач.}};$$

J_{27}, J_{28} – відносна зміна струму статора ГЕД зовнішнього – $(\Delta I_M)_1$ і внутрішнього $(\Delta I_M)_2$ силових контурів:

$$(\Delta I_M)_1 = I_{M \text{ лев.}} / I_{M \text{ нач.}}, \quad (\Delta I_M)_2 = I_{M \text{ прав.}} / I_{M \text{ нач.}};$$

J_{29}, J_{30} – відносна зміна обертового моменту ГЕД зовнішнього – $(\Delta M_M)_1$ і внутрішнього – $(\Delta M_M)_2$ силових контурів:

$$(\Delta M_M)_1 = M_{M \text{ лев.}} / M_{M \text{ нач.}}, \quad (\Delta M_M)_2 = M_{M \text{ прав.}} / M_{M \text{ нач.}};$$

J_{31}, J_{32} – зміна кутової швидкості обертання ГЕД і гребних гвинтів зовнішнього – $(\Delta \omega_M)_1$ і внутрішнього – $(\Delta \omega_M)_2$ силових контурів:

$$\Delta \omega_M)_1 = \Delta \omega_{M \text{ лев.}} / \Delta \omega_{M \text{ нач.}}; \quad (\Delta \omega_M)_2 = \Delta \omega_{M \text{ прав.}} / \Delta \omega_{M \text{ нач.}};$$

J_{33} – відносне зниження швидкості руху судна з виходом його на сталу циркуляцію $(\Delta v)_{\text{ц}} = v_{\text{ц}} / v_{\text{нач.}}$;

J_{34} – кутова швидкість обертання судна Ω_z на усталеній циркуляції – $\Omega_{\text{ц}}$;

J_{35} – відносний діаметр циркуляції – $D_{\text{ц}}$;

J_{36} – тактичний діаметр циркуляції – D_T ;

J_{37} – висування судна – L_1 ;

J_{38} – пряме зміщення – L_2 ;

J_{39} – кут курсу судна по закінченню заданого проміжку часу – ψ_c ;

J_{40} – тривалість виконання повного обороту – $T_{\text{ц}}$;

J_{41} – тривалість еволюційного періоду маневру – $T_{\text{эв}}$;

J_{42} – витрати енергії на виконання судном повного обороту – $W_{\text{ц}}$.

Позначення "нач" в індексах показників, які описують циркуляційний рух, означає початкове (на момент виходу на циркуляцію) значення відповідного показника.

Сукупність перерахованих показників (а їх запропоновано понад 40) в достатньою мірою охоплює кожен елемент силової установки електроходу окремо і весь електрохід загалом, і має необхідну достатність для того, щоб повною мірою оцінити маневрені якості пропульсивних комплексів.

Далі в усій роботі (крім тих місць, де це спеціально обумовлено) *відносні значення* режимних показників позначатимуться (для полегшення сприйняття) без символу "0" у показнику ступеня.

Методи дослідження

Велика кількість чинників (параметрів пропульсивного комплексу), що впливають на значення показників якості, істотно ускладнює аналіз маневрених режимів роботи, а якщо врахувати, що і кількість самих показників перевищує 40, то розв'язання завдання стає нездійсненним. Єдиним виходом із такої ситуації є виявлення параметрів (чинників), які найсильніше впливають на величини показників якості. Інакше кажучи, необхідно виокремити з множини факторів $q_i, i=1, \dots, n$ підмножину факторів $q_j, j=1, \dots, p$ ($p < n$), відхилення яких від розрахункових значень Δq_j визначає основну частину приросту показника $J(\Delta q_j) \approx J(\Delta q_i)$. Розкид решти $s=n-p$ чинників не чинить істотного впливу на досліджувані показники і зміни їхніх значень можна не враховувати.

Розв'язання подібних завдань доцільно здійснювати методами відсіювальних експериментів, що базуються на припущенні, що тільки мала кількість чинників істотно позначається на величині показника якості. Причому ефекти цих факторів, розташовані в порядку убудування, являють собою

залежність експоненціального типу. Це дає змогу більшості чинників віднести до шумового поля, на тлі якого виокремлюється порівняно невелика кількість чинників, які **істотно впливають** на показники якості.

Слід врахувати, що не всі безрозмірні параметри комплексу "працюють" на тому чи іншому маневрі. Крім того, низку параметрів можна апіорно, або керуючись здоровим глуздом, виключити з числа досліджуваних, вважаючи їхні значення неваріюваними. У результаті цього, кількість досліджуваних параметрів дещо скорочується. Усі досліджувані фактори, з відповідними їм порядковими номерами, наведено в табл. 7.1.

При кількості факторів, яка обчислюється кількома десятками (що відповідає досліджуваній системі), зручно скористатися методом випадкового балансу.

В основі методу лежить матриця випадкового балансу (матриця планування експериментів – розрахунків), яка складається на основі матриці повного факторного експерименту (ПФЕ). Для її отримання фактори q_i розділені на групи, що містять не більше чотирьох факторів. Фактори можуть перебувати на двох рівнях: одиниці з плюсом відповідає верхній рівень (максимальне значення), одиниці з мінусом – нижній рівень (мінімальне значення). Матриця планування складається з підматриць, складених на основі ПФЕ типу 2^4 .

Таблиця 7.1 Відповідність параметрів комплексів факторам q_i відсіювального експерименту

Фактор	Пара-метр	Фактор	Пара-метр
q_1	ω_{DR}^0	q_{25}	χ_{II}
q_2	β_D	q_{26}	C_{RY}
q_3	C_{DR}	q_{27}	C_{12}
q_4	N_D	q_{28}	C_{13}
q_5	N_{GV}	q_{29}	K_{UGU1}
q_6	N_M	q_{30}	C_{21}
q_7	C_{G5}	q_{31}	C_{22}
q_8	C_{G8}	q_{32}	C_{23}
q_9	C_{G11}	q_{33}	C_{61}
q_{10}	C_{M17}	q_{34}	C_{62}
q_{11}	C_{M18}	q_{35}	C_{63}
q_{12}	C_{M20}	q_{36}	C_{64}
q_{13}	C_{M21}	q_{37}	C_{65}
q_{14}	C_{M22}	q_{38}	C_{λ_2}
q_{15}	C_{M23}	q_{39}	$C_{\lambda_{21}}$
q_{16}	C_{M35}	q_{40}	N_X
q_{17}	C_{M36}	q_{41}	N_{Ω}
q_{18}	C_{M37}	q_{42}	a_M
q_{19}	C_{M38}	q_{43}	a_P
q_{20}	k_1	q_{44}	a_γ
q_{21}	k_2	q_{45}	K_{UGH1}
q_{22}	k_3	q_{46}	N_{RD}
q_{23}	KR		
q_{24}	C_{M16}		

Підматриці ПФЕ для різних груп чинників складаються з тих самих рядків, що й базова, проте порядок чергування рядків у кожній підматриці різний і визначається за допомогою матриці випадкових чисел. Підматриці планування, об'єднані послідовно в одну матрицю, утворюють матрицю випадкового балансу, що є вихідною для проведення експериментів (розрахунків), тобто являє собою план проведення експериментів.

У результаті розрахунків досліджуваних маневрів у точках, що задаються матрицею випадкового балансу, отримують вектор-стовпець показника якості J .

Аналіз впливу параметрів пропульсивних комплексів (чинників q_i) на кожен показник якості J_k , з метою виявлення значущих (для кожного показника), проводиться за наведеною нижче методикою.

На першому етапі аналізу будується діаграма розсіювання. Її побудова зводиться до знесення значень J_r , де r – порядковий номер рядка розрахунку в матриці, в один із двох стовпчиків залежно від того, на якому рівні перебуває фактор. Внесок фактору E визначається величиною центрів зсуву змінних за кожним стовпчиком. Для кількісного оцінювання суттєвих чинників обирають m стовпців суттєвих чинників, виділених за діаграмою розсіювання, будують матрицю ПФЕ типу 2^l і допоміжну матрицю J^{VS} з результатами розрахунків матриці ПФЕ. На основі допоміжної матриці будується аналітична модель показника якості J виду

$$J = \sum_{i=0}^k b_i q_i. \quad (7.1)$$

У формулі (7.1) значенням b_i , $i=0,1,\dots, l$ відповідає лінійна модель показника. При $i = \overline{l+1, k}$ коефіцієнти b_i відображають ефекти взаємодії факторів. Коефіцієнти b_i визначаються як

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^m q_{ir} \overline{J_j}, \quad (7.2)$$

де $m=2^l$;

$$\overline{J_j} = \frac{1}{\eta_j} \sum_{r=1}^{\eta_j} J_{jr}, \quad j = \overline{1, m}; \quad (7.3)$$

η_j – кількість паралельних розрахунків.

На другому етапі аналізу виключають ефекти від знайдених на першому етапі значущих чинників. Для цього з кожного значення J_r віднімаються **величини**

$$J_{br} = \sum_{i=1}^{l_1} b_i (q_{ri} + 1), \quad (7.4)$$

де l_1 – число виділених істотних чинників ($l_1 \leq l$) на першому етапі;

q_{ri} – значення фактору в i -му стовпчику і r -му рядку матриці випадкового балансу.

Повторення описаних вище дій дає змогу проранжувати всю групу суттєвих факторів.

Для виділення ефектів взаємодій, у зв'язку з величезним числом їхніх сполучень, використовується метод виділення взаємодій з діаграм розсіювання лінійних ефектів. В основі його лежить припущення про те, що за великого внеску взаємодії точки, що виділяються, будуть на обох рівнях. Під точками i -го фактору, що виділяються, на верхньому (нижньому) рівні розуміють точки, для яких значення показника J більші, ніж найбільше значення J на нижньому (верхньому) рівні цього фактору. Істотні взаємодії – це ті, у яких у верхній (нижній) частині діаграми розсіювання точки, що виділяються, повторюють одна одну, а в нижній (верхній) утворюють дзеркальне відображення.

Кількісна оцінка суттєвих взаємодій проводиться, аналогічно оцінці суттєвих чинників, побудовою допоміжної матриці J^{VS} , у якій роль чинників виконують ефекти їхніх взаємодій.

Статистичний аналіз одержуваних на кожному етапі результатів проводять у такій послідовності:

– визначаються вибіркові дисперсії за рядками матриці J^{VS}

$$s_j^2 = \frac{1}{\eta_j - 1} \sum_{r=1}^{\eta_j} (J_{jr} - \overline{J_j})^2, \quad j = \overline{1, m}; \quad (7.5)$$

– знаходяться дисперсії відтворюваності одиничного значення

$$s^2\{J\} = \frac{\sum_{j=1}^m s_j^2 (\eta_j - 1)}{\sum_{j=1}^m (\eta_j - 1)}, \quad (7.6)$$

дисперсія відтворюваності середнього значення

$$s^2\{\overline{J}\} = \frac{s^2\{J\}}{m} \sum_{j=1}^m \frac{1}{\eta_j}, \quad (7.7)$$

дисперсія коефіцієнтів регресії

$$s^2\{b_i\} = \frac{s^2\{\bar{J}\}}{m}, \quad i = \overline{1, l} \quad (7.8)$$

– проводиться перевірка значущості коефіцієнтів за критерієм Стюдента за чисел свободи

$$f = \sum_{j=1}^m \eta_j - m, \quad (7.9)$$

і рівні значущості α ;

– визначається умова значущості

$$|b_i| > ts\{b_i\}, \quad i = \overline{1, l}. \quad (7.10)$$

У п. 7.3 наведено аналіз (у скороченому варіанті) впливу параметрів пропульсивних комплексів на один із показників якості – тривалість виконання маневру – J_1 , виконаний за наведеною вище методикою.

Вплив параметрів пропульсивних комплексів із частотно-керованими асинхронними ГЕД на показники якості маневрування

Для аналізу впливу параметрів пропульсивних комплексів на всі перераховані в п. 7.1 показники достатньо розглянути такі два характерні маневри:

- розгін пропульсивного комплексу до усталеного значення швидкості руху судна ($v=v_{уст.}$)
- реверс силової установки до виходу судна на усталений режим роботи;
- розгін пропульсивного комплексу – вихід судна на циркуляцію.

Як приклад, розглянемо вплив параметрів (критеріїв динамічної подібності) на такий найважливіший показник, як витрати часу J_1 на виконання першого, із запропонованих до розгляду, маневру.

Матриця – стовпець значень J_1 отримується в результаті розрахунків перехідних режимів роботи пропульсивних комплексів за планами, представленими в матриці випадкового балансу. Отримані результати наведено в матриці спостережень у табл. 6.2.

Таблиця 6.2 Матриця результатів розрахунків за показником J_1

Рядок матриці	J_1	J_1^{17}	J_1^{40}	J_1^6	J_1^{15}	J_1^{26}	J_1^{27}
1	16,9	19,354	25,54	25,54	23,9	23,9	23,9
2	17,6	17,6	23,786	25,992	24,35	22,63	21,47
3	22,6	22,6	22,6	24,8	24,8	23,17	23,17
4	19,4	21,854	28,04	28,04	26,4	26,4	26,4
5	29,0	29,0	29,0	29,0	27,36	27,36	26,2
6	19,8	22,254	28,44	30,646	29,0	27,37	26,2
7	23,6	23,6	23,6	25,806	25,80	25,81	25,81
8	27,6	27,6	27,6	27,6	27,6	25,97	24,81
9	16,8	19,254	25,44	27,646	27,64	26,02	24,86
10	19,6	22,054	28,24	28,24	26,6	24,97	24,97
11	32,9	32,9	32,9	32,9	31,25	29,63	28,47
12	19,0	19,0	25,186	27,392	25,75	25,75	24,59
13	21,4	21,4	27,586	29,792	29,72	28,16	27,0
14	21,9	24,354	24,354	24,354	24,35	24,35	23,20
15	22,8	25,254	25,254	27,460	27,46	25,83	25,83
16	24,7	27,154	27,154	27,5	27,5	25,87	24,7
s_j^2	20,55	16,960	6,672	4,877	4,198	3,263	2,843
$(s^2 - s_j^2)/s^2$	-	0,175	0,675	0,763	0,796	0,841	
Відносний внесок	-	17,5 %	50,0 %	8,8%	3,3 %	7,2 %	2%
Коеф-т. b_i	-	-1,227	-3,093	-1,103	0,821	0,815	0,582

На першому етапі аналізу, з діаграми розсіювання (тут не наведено) знаходяться внески кожного фактору E_{Ii} , що визначаються величиною центрів зміщення змінних. (Слід мати на увазі, що частина параметрів комплексів, що характеризують криволінійний рух судна, на маневрі, що розглядається, "не працює"). Ці внески наведено в табл. 6.3.

Таблиця 6.3 Внески факторів у показник якості J_1

Фактори	E_1	E_2	E_3	R_V	R_N
q_2	-2,325	-2.30	-1.707	-2.260	0.45
q_3	-4.0	-0.319	0.827	-1.470	0.45
q_4	-0.375	0.313	0.354	-1.470	-0.45
q_5	5.075	0.780	1.148	2.260	0.45
q_6	-3.575	-2.617	-0.046	-1.470	0.45
q_7	0.275	-1.910	-1.047	-1.470	0.45
q_8	0.850	0.162	-0.205	-2.260	0.45
q_9	1.475	-0.710	-0.256	-1.470	-0.45
q_{10}	-4.450	-0.768	-0.671	-2.260	-0.45
q_{11}	0.625	0.036	0.629	2.260	0.45
q_{12}	-1.850	-0.278	-0.319	2.260	-0.90
q_{13}	-2.0	-0.478	0.031	-1.470	0.45
q_{14}	0.550	0.575	1.168	3.610	0.45
q_{15}	-0.875	2.193	-0.043	1.470	-0.45
q_{16}	-1.025	-0.386	-0.430	-2.260	-0.45
q_{17}	-4.0	0.026	-0.482	-2.260	-0.45
q_{18}	-3.750	-0.632	-0.533	-1.470	-0.45
q_{19}	-1.80	-1.775	-1.267	-2.260	0.45
q_{20}	-1.350	0.172	-0.281	-2.260	0.90
q_{21}	3.125	0.990	1.442	2.260	-0.45
q_{24}	3.025	2.386	-0.370	2.260	-0.45
q_{38}	-0.750	-1.288	-0.138	2.260	-0.45
q_{40}	-6.80	-0.025	-0.338	-1.470	-0.45
q_{45}	-4.225	-2.703	-2.108	-3.610	-0.45

На підставі результатів аналізу стовпця E_1 , виділено параметри q_{17} і q_{40} , що мають найбільші внески

Для кількісної оцінки виокремлених суттєвих чинників будується матриця повного факторного експерименту на два входи – табл. 7.4.

Статистичне опрацювання результатів розрахунків дає такі результати:

- порядкові дисперсії s_j^2 – див. у табл. 6.4;
- дисперсія відтворюваності одиничного рішення

$$s^2\{J_j\} = 7,554;$$

- дисперсія відтворюваності середнього значення

$$s^2\{J_{CP}\} = 2,014;$$

- дисперсія відтворюваності коефіцієнтів регресії

$$s^2\{b_i\} = 0,504.$$

Коефіцієнти регресії b_{17} і b_{40} істотних чинників q_{17} і q_{40} , які розраховуються за формулою (6.2), дорівнюють

$$b_{17} = -1,227; \quad b_{40} = -3,093.$$

Таблиця 7.4 Матриця повного факторного експерименту на два входи

q_{17}	q_{40}	Поєднання номерів	J_j	$J_{j \text{ CP}}$	s_j^2
-1	-1	3, 5, 7, 8, 11	22,6; 29,0; 23,6; 27,6; 32,9	27,180	17,552
+1	-1	14, 15, 16	21,9; 22,8; 24,7	23,133	2,043
-1	+1	2, 12, 13	17,6; 19,0; 21,4	19,400	3,360
+1	+1	1, 4, 6, 9, 10	16,9; 19,4; 19,8; 16,8; 19,6	18,540	2,408

При перевірці значущості коефіцієнтів регресії було прийнято величину довірчої ймовірності, що дорівнює 0.9. Число ступенів свободи $f=16-4=12$. Величина t з таблиці розподілу Стьюдента $t=1,356$. Добуток $t \cdot s\{b_i\}=0,962$. Оскільки, $|b_{17}| > t \cdot s\{b_i\}$ і $|b_{40}| > t \cdot s\{b_i\}$, то обидва коефіцієнти - **значущі**.

На другому етапі зі стовпця J_1 виключаються, відповідно до співвідношення (7.4), ефекти від значущих чинників (у цьому разі – значущими є обидва чинники – q_{17} і q_{40}). Виходять стовпці J_1^{17} і J_1^{40} (див. табл. 7.2). Внески кожного фактору, після виключення ефектів від q_{17} і q_{40} , на другому етапі – E_{2i} – наведено в табл. 7.3.

Виокремленими факторами на даному етапі є – q_6 та q_{15} . Коефіцієнти регресії за цими факторами визначаються аналогічно тому, як це було зроблено на першому етапі: $b_6 = -1,103$; $b_{15} = 0,821$. Перевірка рівня значущості ($t \cdot s\{b_i\}=0,787$) дає підстави віднести і ці коефіцієнти до значущих.

На третьому етапі було виокремлено фактори q_2 і q_{45} . Однак, після перевірки рівня значущості ($b_2 = -0,354$; $b_{45} = -0,621$; $t \cdot s\{b_i\} = 0,796$), ці фактори відійшли до шумового поля, оскільки умова (7.10) не виконувалася.

Для виявлення ефектів взаємодій будується діаграма взаємодій або її "табличний" варіант для кожного фактору, за якою:

- визначаються максимальні ($J_{V \max}$) і мінімальні ($J_{V \min}$) значення чинників на верхньому рівні та максимальні ($J_{N \max}$) і мінімальні ($J_{N \min}$) значення чинників на нижньому рівні;
- розраховуються різниці

$$R_V = J_{V \max} - J_{N \max}; \quad R_N = J_{V \min} - J_{N \min}.$$

Результати розрахунків наведено в табл. 7.3.

Аналіз результатів розрахунків показує, що великі внески можуть дати поєднання:

$$\begin{aligned} Z_1 &= q_5 q_{38}; & Z_2 &= q_{19} q_{21}; & Z_3 &= q_3 q_5; & Z_4 &= q_5 q_{19}; \\ Z_5 &= q_{15} q_{40}; & Z_6 &= q_{13} q_{40}; & Z_7 &= q_6 q_{40}; & Z_8 &= q_7 q_{40}; \\ Z_9 &= q_9 q_{40}; & Z_{10} &= q_2 q_{10}; & Z_{11} &= q_2 q_{16}; & Z_{12} &= q_2 q_{17}. \end{aligned}$$

Діаграма розсіювання для суттєвих взаємодій будується за даними табл. 6.5. За позитивні приймаються значення Z_i у тих рядках, де взаємодії чинників мають однакові знаки, а за негативні - де знаки різні.

Внески ефектів взаємодій E_Z наведено також у табл. 7.5. Аналіз наведених тут даних дає змогу виокремити дві суттєві взаємодії: Z_6 і Z_7 . Розрахунки (за наведеною вище методикою) і статистичний аналіз дають такі результати:

$$b_{Z_6} = 0,815; \quad b_{Z_7} = 0,582; \quad t \cdot s\{b_i\} = 0,563,$$

тобто обидва коефіцієнти а, отже, і обидва ефекти взаємодій - значущі.

Таблиця 7.5. Матриця ефектів взаємодій

Ефекти, експерименти	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5	Z_6	Z_7	Z_8	Z_9	Z_{10}	Z_{11}	Z_{12}
1	-	+	+	+	+	-	-	-	+	-	-	+
2	+	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	+
3	-	+	+	-	+	+	-	-	+	-	-	+
4	+	+	+	-	+	-	-	+	-	+	-	+
5	-	-	-	+	-	-	+	+	-	+	-	-
6	+	-	-	-	+	+	+	-	-	+	+	+

7	+	-	-	+	+	-	-	-	-	-	-	+
8	-	-	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+
9	-	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-	-
10	+	+	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+
11	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+
12	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	+	-
13	+	-	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+
14	+	-	-	+	+	-	+	-	+	-	+	+
15	-	-	+	-	+	+	-	+	-	-	-	+
16	+	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	-
Вклади, E_z	0,62	-1,90	-0,80	-1,24	-2,89	2,42	2,05	1,47	-0,46	1,43	1,76	-0,29

Ефекти взаємодій, виокремлені на черговому етапі, виявилися (як засвідчив статистичний аналіз) не значимими, що дало підстави віднести їх до шумового поля і на цьому **завершити процедуру** виявлення значущих чинників і значущих взаємодій **за критерієм J_1** .

Внески суттєвих чинників і суттєвих ефектів взаємодій у показник J_1 визначають таким чином:

– вибіркова дисперсія J показника якості матриці випадкового балансу (стовпця J_1 табл. 7.1) розраховується за формулою

$$s^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{r=1}^N (J_r - \bar{J})^2, \quad (7.11)$$

де $\bar{J}$ – середнє значення показника;

– дисперсія показника в міру виключення значущих чинників

$$s_i^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{r=1}^N (J_r^i - \bar{J}^i)^2; \quad (7.12)$$

– відносний внесок кожного фактору й ефекту взаємодій знаходиться виходячи зі співвідношення

$$\frac{s^2 - s_i^2}{s^2} \cdot 100\%. \quad (7.13)$$

Результати розрахунків за формулами (7.11)–(7.13) – відносні внески значущих чинників і ефектів взаємодій, а також коефіцієнти b_i моделей вигляду (7.1) – наведено в табл. 7.2.

Внески значущих чинників і ефектів взаємодій у показник J_1 (T) можна наочно подати у вигляді аналітичної залежності виду (6.1), або у вигляді гістограми – рис. 7.1.

По осі абсцис на рис. 7.1 проставлено (у порядку зменшення внесків) значущі чинники й ефекти взаємодії, а за віссю ординат – внески цих чинників (ефектів) у показник J_1 (у відсотках).

$$T = 22,2 - 3,093N_X - 1,227C_{M16} - 1,103N_M + 0,815N_X C_{M21} + 0,82C_{M23} + 0,582N_N N_X.$$

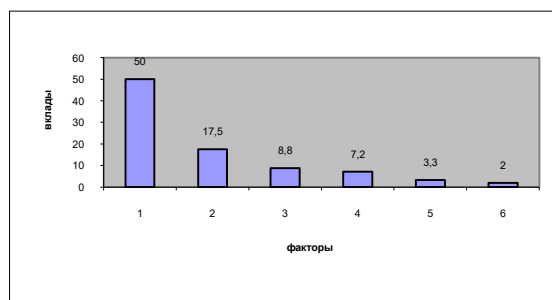


Рис.7.1. Внески параметрів і ефектів взаємодій у показник T

Фактори на рис. 7.1. відповідають: 1 – N_X ; 2 – C_{M36} ; 3 – N_M ; 4 – $C_{M23} \cdot N_X$; 5 – C_{M23} ; 6 – $N_M \cdot N_X$.

Подібним чином було проаналізовано вплив безрозмірних параметрів пропульсивних комплексів на всі сорок два запропонованих вище показника якості $J_2 - J_{42}$. Частка кінцевих результати розрахунків за окремими показниками наведено (у вигляді гістограм) нижче.

На рис. 7.2 – 7.7 проілюстровано вплив **значущих** параметрів (факторів) комплексів і **значущих** ефектів взаємодій на деякі маневрові показники якості прямолінійного руху:

- відносну нерівномірність кутової швидкості обертання первинних двигунів $\Delta\omega_D$ – рис. 7.2;
- тривалість перехідних процесів у силовій установці $(T)_{Cyrev}$ під час реверсу – рис. 7.3;
- максимальну потужність первинних двигунів P_{Dm} – рис. 7.4;
- відносні витрати енергії W на виконання маневру – рис. 7.5;
- максимальний кидок струму ГЕД на реверсах $(I)_{MTm}$ – рис. 7.6;
- вибіг електроходу до кінця розгону $(XI)_{раз.}$ – рис. 7.7.

Зазначені на рис. 7.2. чинники та взаємодії відповідають: 1 – N_D ; 2 – c_{DR} ; 3 – C_{G7} ; 4 – C_{G8} ; 5 – C_{M16} ; 6 – $N_D \cdot c_{DR}$; 7 – $c_{DR} \cdot C_{M16}$; 8 – C_{G10} .

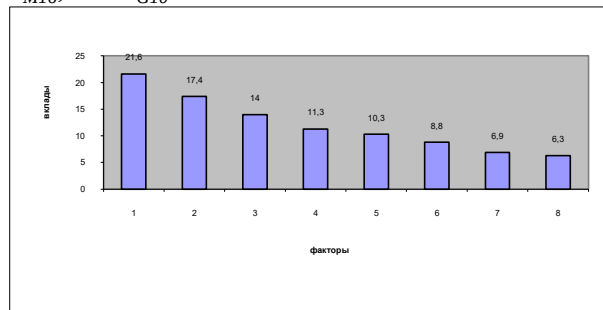


Рис. 7.2. Внески параметрів і ефектів взаємодій у показник $\Delta\omega_D$

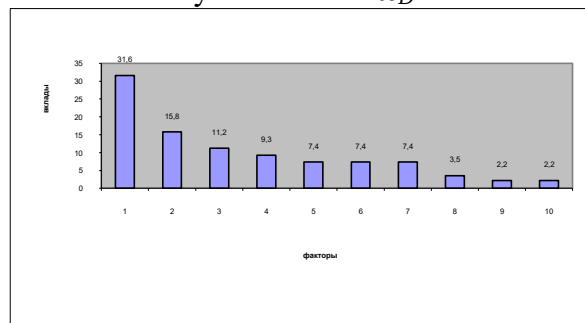


Рис. 7.3. Внески параметрів і ефектів взаємодій у показник $(T_{Cy})_{rev.}$

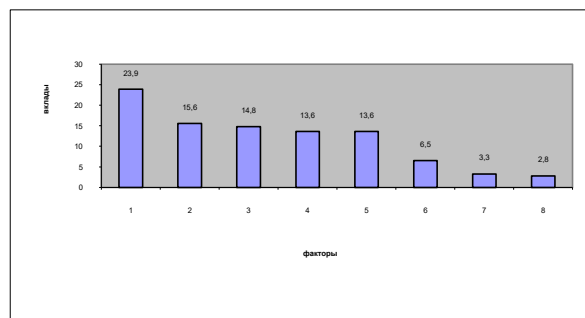


Рис. 7.4. Внески параметрів і ефектів взаємодій

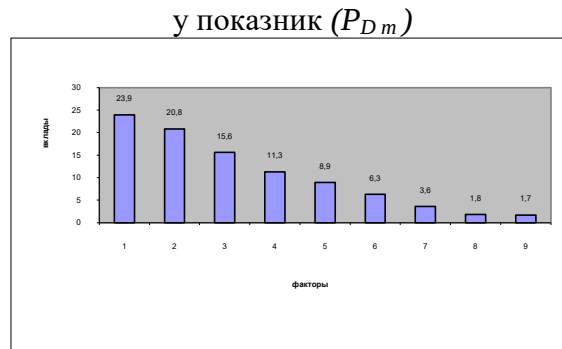


Рис. 7.5. Внески параметрів і ефектів взаємодій
у показник W

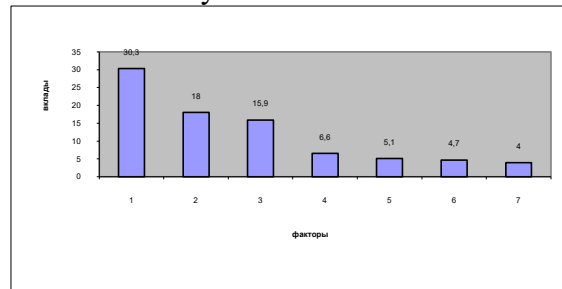


Рис. 6.6. Внески параметрів і ефектів взаємодій
у показник $(I_M)_{Tm}$

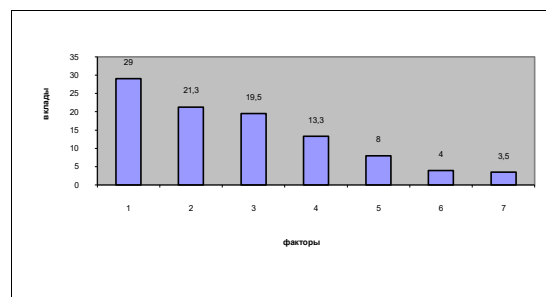


Рис. 6.7. Внески параметрів і ефектів взаємодій
у показник $XI_{разг.}$

На рис. 7.3 фактори й ефекти належать до: 1 – k_2 ; 2 – C_{M16} ; 3 – N_X ; 4 – N_D ; 5 – C_{G7} ; 6 – C_{M17} ; 7 – C_{M20} ; 8 – $k_2 \cdot C_{M16}$; 9 – $k_2 \cdot N_X$; 10 – $C_{M16} \cdot N_X$.

Фактори на гістограмі рис. 7.4 відповідають: 1 – C_{M16} ; 2 – C_{G7} ; 3 – C_{M23} ; 4 – C_{M17} ; 5 – C_{M20} ; 6 – $C_{M16} \cdot C_{G7}$; 7 – $C_{M17} \cdot C_{M23}$; 8 – $C_{G7} \cdot C_{M23}$.

Представлений на рис. 7.5 вплив факторів на показник W враховує: 1 – N_X ; 2 – C_{M23} ; 3 – C_{M17} ; 4 – C_{M20} ; 5 – C_{M16} ; 6 – C_{M18} ; 7 – $N_X \cdot C_{M16}$; 8 – $N_X \cdot C_{M17}$; 9 – C_{M21} .

Фактори на рис. 7.6. відповідають: 1 – k_2 ; 2 – N_M ; 3 – C_{G8} ; 4 – C_{M42} ; 5 – $N_M \cdot C_{G8}$; 6 – C_{M16} ; 7 – C_{M41} .

На рис. 7.7 позначення по осі абсцис відповідають: 1 – N_X ; 2 – C_{M16} ; 3 – C_{M20} ; 4 – C_{M23} ; 5 – $C_{M16} \cdot C_{M23}$; 6 – $C_{M20} \cdot C_{M23}$; 7 – N_M .

Найважливішими показниками якості виконання маневрів під час криволінійного руху можна вважати:

- відносна зміна потужності первинних двигунів (ΔP_D);
- відносна зміна кутової швидкості обертання ГЕД і гребних гвинтів – $\Delta \omega_M$;
- відносні витрати енергії на повний оборот судна – W_{II} ;
- відносне зниження швидкості руху судна з виходом на циркуляцію – $(\Delta v)_{II}$;

– відносний діаметр циркуляції – D_{II} ;

– висування судна – L_1 .

Гістограми з внесками **значущих** параметрів і **значущих** ефектів взаємодій параметрів у перелічені показники якості наведено, відповідно, на мал. 7.8 – 7.13.

На рис. 7.8 фактори відповідають: 1 – C_{M16} ; 2 – N_X ; 3 – C_{M21} ; 4 – $C_{M16} \cdot N_X$; 5 – C_{RY} ; 6 – $C_{M16} \cdot C_{M21}$; 7 – $C_{\lambda 21}$; 8 – C_{65} ; 9 – C_{61} ; 10 – C_{22} .

Гістограма на рис. 7.9 показує вплив на $\Delta\omega_M$: 1 – N_X ; 2 – C_{M16} ; 3 – $N_X \cdot C_{M16}$; 4 – $C_{\lambda 21}$; 5 – C_{RY} ; 6 – C_{61} .

На рис. 7.10 по горизонтальній осі відкладено: 1 – N_X ; 2 – C_{M16} ; 3 – C_{61} ; 4 – $C_{\lambda 21}$; 5 – C_{65} ; 6 – C_{RY} ; 7 – $N_X \cdot C_{M16}$; 8 – C_{M23} ; 9 – C_{M17} .

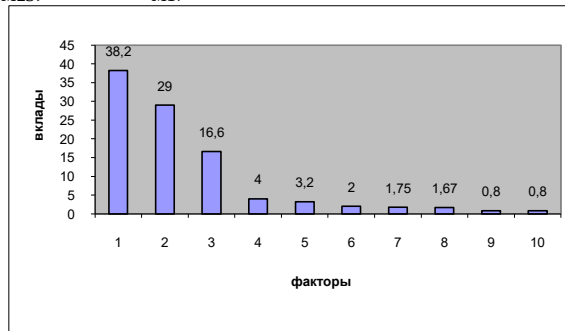


Рис. 7.8. Внески параметрів і ефектів взаємодій у показник (ΔP_D)

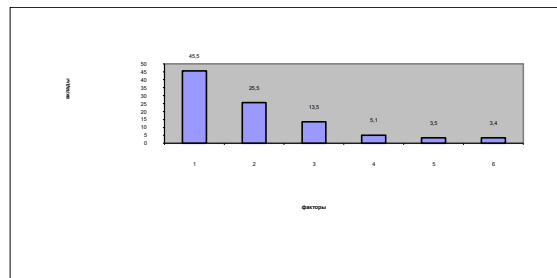


Рис. 7.9. Внески параметрів і ефектів взаємодій у показник ($\Delta\omega_M$)

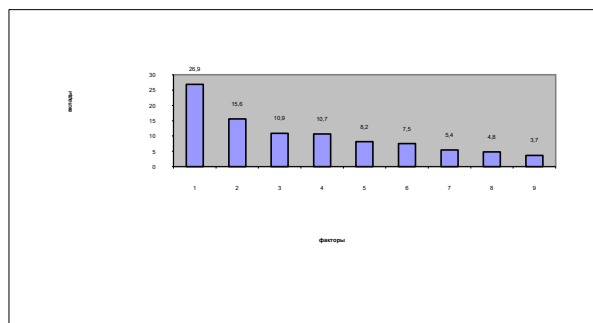
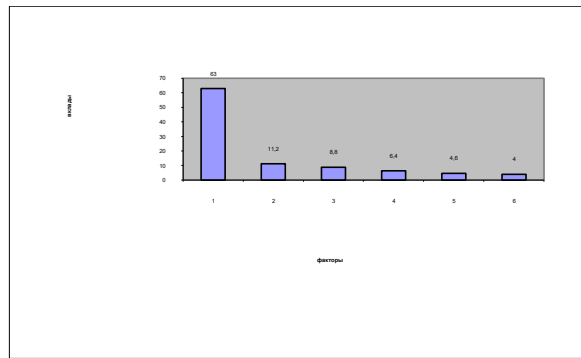
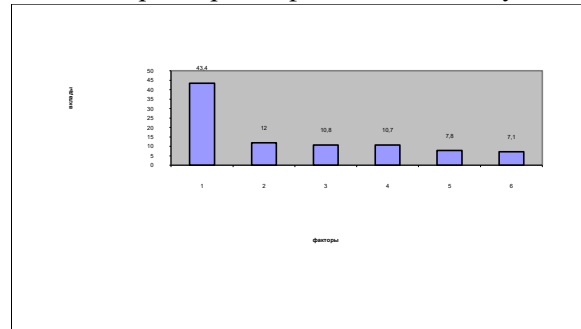
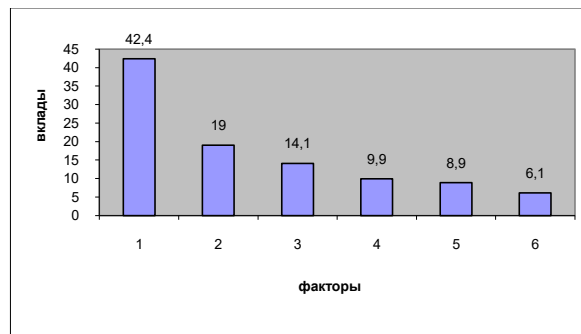


Рис. 7.10. Внески параметрів і ефектів взаємодій у показник W_{II}

Рис. 7.11. Внески параметрів і ефектів взаємодій у показник $(\Delta v)_{\text{Ц}}$ Рис. 7.12. Внески параметрів і ефектів взаємодій у показник $D_{\text{Ц}}$ Рис. 7.13. Внески параметрів і ефектів взаємодій у показник L_1

На рис. 7.11 показано вплив на $(\Delta v)_{\text{Ц}}$ таких параметрів та ефектів: 1 – N_X ; 2 – $N_X \cdot C_{\lambda 21}$; 3 – $C_{65} \cdot C_{\lambda 21}$; 4 – $C_{\lambda 21}$; 5 – C_{61} ; 6 – C_{65} .

Параметри й ефекти взаємодій параметрів, що впливають, як показано на рис. 7.12, на показник якості $D_{\text{Ц}}$ позначено: 1 – N_X ; 2 – $N_X C_{\lambda 21}$; 3 – C_{61} ; 4 – $C_{\lambda 21}$; 5 – C_{65} ; 6 – C_{RY}

Гістограма на рис. 7.13 із внесками значущих параметрів та ефектів у показник L_1 має такі позначення: 1 – N_X ; 2 – C_{61} ; 3 – $C_{61} \cdot C_{\lambda 21}$; 4 – $C_{\lambda 21}$; 5 – C_{M16} ; 6 – $N_X \cdot C_{61}$.

Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити такі висновки. Для більшості показників якості найбільш значущими параметрами є енергоозброєність електроходу N_X і параметри асинхронного частотно-керованого ГЕД – C_{M16} , C_{M23} , C_{M20} , C_{M17} . З параметрів, що характеризують головні генератори, істотні внески дають C_{G7} і C_{G8} . Досить вагомими є ефекти взаємодій параметрів, причому, як правило, це – ефекти взаємодій найбільш значущих (за відповідним показником) параметрів.

Вплив змін значень інших параметрів пропульсивних комплексів і ефектів взаємодій параметрів, як показує статистичне опрацювання результатів розрахунків, істотно менший. Іншими словами, у подальших розрахунках чисельні значення цих параметрів можна приймати неварійованими.

3. МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМІВ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВКАХ ПРОПУЛЬСИВНИХ КОМПЛЕКСІВ

Метод розрахункових кривих.

Структурна схема розрахункового режиму наведена на рис. 4

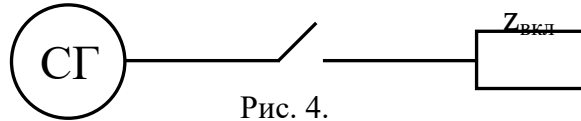


Рис. 4.

Перелік необхідних для розрахунку вихідних даних наведено в табл. №1.

Таблиця №1

Найменування	Позначення	Джерело інформації
1. Повна номінальна потужність генератора, кВа	S_{NG}	За варіантом
2. Повна потужність навантаження, що включається, кВа	$S_{вкл}$	За варіантом
3. Коефіцієнт потужності навантаження, що включається	$\cos \phi_{вкл}$	За варіантом

"Провал" напруги необхідно визначати наступним чином:

- обчислити повну провідність статичного навантаження, що включається, у відносних одиницях

$$Y_{вкл} = \frac{S_{вкл}}{S_{NG}};$$

- за розрахунковими кривим обов'язкового додатку 1 [1] для заданого типу генератора, визначити максимальний "провал" напруги ΔU , який відповідає величині повної провідності і коефіцієнту потужності навантаження, що включається.

Аналітичний метод розрахунку.

Структурна схема розрахункового режиму наведена на рис.5

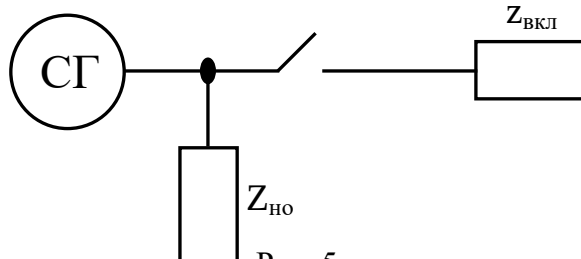


Рис. 5.

"Провал" напруги необхідно визначати наступним чином:

- обчислити повну провідність статичного навантаження, що включається, у відносних одиницях

$$Y_{вкл} = \frac{S_{вкл}}{S_{NG}};$$

- визначити повну провідність попереднього навантаження у відносних одиницях

$$Y_{ho} = \frac{S_{ho}}{S_{N\Gamma}};$$

- визначити активну і реактивну складові провідності навантаження, що включається

$$g_{вкл} = Y_{вкл} \cdot \cos \varphi_{вкл} \quad b_{вкл} = Y_{вкл} \cdot \sin \varphi_{вкл};$$

- визначити активну і реактивну складові провідності попереднього навантаження

$$g_{ho} = Y_{ho} \cdot \cos \varphi_{ho} \quad b_{ho} = Y_{ho} \cdot \sin \varphi_{ho};$$

Примітка: Якщо в початковому режимі генератор працював на холостому ходу прийняти $g_{ho}=b_{ho}=0$; $U_{qo}=i_{fo}=1$; $U_{do}=i_{do}=i_{qo}=0$;

- визначити сумарні активну і реактивну складові провідності навантаження генератора

$$g_{h\Sigma} = g_{вкл} + g_{ho} \quad b_{h\Sigma} = b_{вкл} + b_{ho}$$

- визначити складові напруги генератора в вихідному статичному режимі

$$U_{do} = \frac{x_q \cdot g_{ho}}{\sqrt{(1 + x_q \cdot b_{ho})^2 + (x_q \cdot g_{ho})^2}} \quad U_{qo} = \frac{1 + x_q \cdot b_{ho}}{\sqrt{(1 + x_q \cdot b_{ho})^2 + (x_q \cdot g_{ho})^2}}$$

- визначити складові струму статора і струм збудження генератора в вихідному статичному режимі

$$i_{do} = g_{ho} \cdot U_{do} + b_{ho} \cdot U_{qo} \quad i_{qo} = \frac{U_{do}}{x_q} \quad i_{fo} = U_{qo} + x_d \cdot i_{do}$$

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

$$\left. \begin{aligned} U_{d1} &= \frac{x_q'' \cdot g_{h\Sigma} \cdot (i_{fo} - (x_d - x_d'') \cdot i_{do}) + (1 + x_d'' \cdot b_{h\Sigma}) \cdot \mu_q \cdot x_q \cdot i_{qo}}{(1 + x_d'' \cdot b_{h\Sigma})(1 + x_q'' \cdot b_{h\Sigma}) + x_d'' \cdot x_q'' \cdot g_{h\Sigma}^2} \\ U_{q1} &= \frac{(1 + x_q'' \cdot b_{h\Sigma}) \cdot (i_{fo} - (x_d - x_d'') \cdot i_{do}) - x_d'' \cdot g_{h\Sigma} \cdot \mu_q \cdot x_q \cdot i_{qo}}{(1 + x_d'' \cdot b_{h\Sigma})(1 + x_q'' \cdot b_{h\Sigma}) + x_d'' \cdot x_q'' \cdot g_{h\Sigma}^2} \end{aligned} \right\}$$

Примітка: При відсутності попереднього навантаження вираження для визначення складових напруги приймають вид:

$$\left. \begin{aligned} U_{d1} &= \frac{x_q'' \cdot g_{h\Sigma}}{(1 + x_d'' \cdot b_{h\Sigma})(1 + x_q'' \cdot b_{h\Sigma}) + x_d'' \cdot x_q'' \cdot g_{h\Sigma}^2} \\ U_{q1} &= \frac{1 + x_q'' \cdot b_{h\Sigma}}{(1 + x_d'' \cdot b_{h\Sigma})(1 + x_q'' \cdot b_{h\Sigma}) + x_d'' \cdot x_q'' \cdot g_{h\Sigma}^2} \end{aligned} \right\}$$

При включенні навантаження з коефіцієнтом потужності $\cos \varphi < 0,4$

$$\left. \begin{aligned} U_{d1} &= 0 \\ U_{q1} &= \frac{1}{1 + x_d'' \cdot b_{h\Sigma}} \end{aligned} \right\}$$

При $x_d'' = x_q''$ вираження для визначення складових напруги приймають вид

$$\left. \begin{aligned} U_{d1} &= \frac{x'' \cdot g_{H\Sigma}}{\left(1 + x'' \cdot b_{H\Sigma}\right)^2 + \left(x'' \cdot g_{H\Sigma}\right)^2}, \text{ де } x'' = x_d'' = x_q'' \\ U_{q1} &= \frac{1 + x'' \cdot b_{H\Sigma}}{\left(1 + x'' \cdot b_{H\Sigma}\right)^2 + \left(x'' \cdot g_{H\Sigma}\right)^2} \end{aligned} \right\}$$

- визначити "провал" напруги генератора з урахуванням демпферних обмоток в перший момент після включення навантаження

$$U_1 = \sqrt{U_{d1}^2 + U_{q1}^2} \quad \Delta U_1 = (U_1 - 1) \cdot 100 \%.$$

Примітка: При включенні статичної або імпульсної навантажень з коефіцієнтом потужності $\cos \varphi > 0,8$ розрахунок закінчити. Максимальний "провал" напруги прийняти $\Delta U = \Delta U_1$.

- визначити складові напруги генератора без урахування демпферних обмоток в перший момент після включення навантаження

$$\left. \begin{aligned} U_{d2} &= \frac{x_q \cdot g_{H\Sigma} \cdot \left(i_{fo} - (x_d - x_d') \cdot i_{do}\right)}{\left(1 + x_d' \cdot b_{H\Sigma}\right) \cdot \left(1 + x_q \cdot b_{H\Sigma}\right) + x_d' \cdot x_q \cdot g_{H\Sigma}^2} \\ U_{q2} &= \frac{\left(1 + x_q \cdot b_{H\Sigma}\right) \cdot \left(i_{fo} - (x_d - x_d') \cdot i_{do}\right)}{\left(1 + x_d' \cdot b_{H\Sigma}\right) \cdot \left(1 + x_q \cdot b_{H\Sigma}\right) + x_d' \cdot x_q \cdot g_{H\Sigma}^2} \end{aligned} \right\}$$

Примітка: При відсутності попереднього навантаження вираження для визначення складових напруги приймають вид:

$$\left. \begin{aligned} U_{d2} &= \frac{x_q \cdot g_{H\Sigma}}{\left(1 + x_d' \cdot b_{H\Sigma}\right) \cdot \left(1 + x_q \cdot b_{H\Sigma}\right) + x_d' \cdot x_q \cdot g_{H\Sigma}^2} \\ U_{q2} &= \frac{1 + x_q \cdot b_{H\Sigma}}{\left(1 + x_d' \cdot b_{H\Sigma}\right) \cdot \left(1 + x_q \cdot b_{H\Sigma}\right) + x_d' \cdot x_q \cdot g_{H\Sigma}^2} \end{aligned} \right\}$$

При включенні навантаження з коефіцієнтом потужності $\cos \varphi < 0,4$

$$\left. \begin{aligned} U_{d2} &= 0 \\ U_{q2} &= \frac{1}{1 + x_d' \cdot b_{H\Sigma}} \end{aligned} \right\}$$

При $x_d = x_q$ вираження для визначення складових напруги приймають вид:

$$\left. \begin{aligned} U_{d2} &= \frac{x \cdot g_{H\Sigma}}{\left(1 + x_d' \cdot b_{H\Sigma}\right) \cdot \left(1 + x \cdot b_{H\Sigma}\right) + x_d' \cdot x \cdot g_{H\Sigma}^2}, \text{ где } x = x_d = x_q \\ U_{q2} &= \frac{1 + x \cdot b_{H\Sigma}}{\left(1 + x_d' \cdot b_{H\Sigma}\right) \cdot \left(1 + x \cdot b_{H\Sigma}\right) + x_d' \cdot x \cdot g_{H\Sigma}^2} \end{aligned} \right\}$$

- визначити "провал" напруги генератора без урахування демпферних обмоток в перший момент після включення навантаження

$$U_2 = \sqrt{U_{d2}^2 + U_{q2}^2} \quad \Delta U_2 = (U_2 - 1) \cdot 100 \%$$

- визначити максимальний "провал" напруги генератора при включенні статичного навантаження

$$\Delta U = \frac{\Delta U_1 + \Delta U_2}{2}.$$

Структурна схема розрахункового режиму наведена на рис.6.

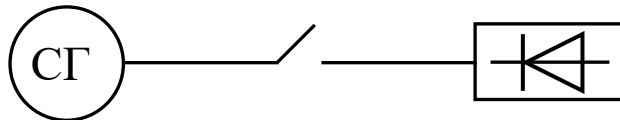


Рис. 6.

Перелік необхідних для розрахунку вихідних даних наведено в табл. № 3.

Розрахунок "провалу" напруги необхідно виконати наступним чином:

- визначити повну потужність навантаження, що включається, приведену до сторони змінного струму:

$$S_{вкл} = \frac{P_d}{\lambda}$$

Примітка: Активна потужність навантаження, що включається, прийняти $P_{нл}=P_d$; прийняти коефіцієнт потужності навантаження, що вмикається, рівним $\cos \varphi_{вкл}=\lambda$.

Аналітичний метод розрахунку.

Структурна схема розрахункового режиму наведена на рис. 7.

Перелік необхідних для розрахунку вихідних даних наведено табл.2.

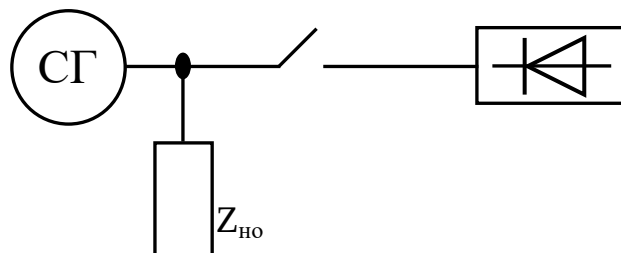


Рис. 7

Далі розрахунок виконувати у відповідності до підпункту 3.1.2.3.

Метод розрахункових кривих.

. Структурна схема розрахункового режиму наведена на рис.8;

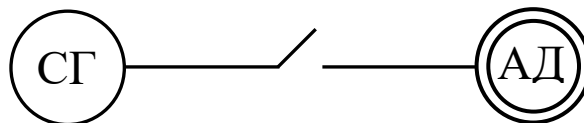


Рис. 8

Перелік необхідних для розрахунку вихідних даних наведено в табл. №4;

3.3.1.3. "Провал" напруги необхідно визначати наступним чином:

- визначити для конкретного типу двигуна по таблиці довідкового додатка 3 повну провідність y_{gn} і коефіцієнт потужності двигуна $\cos \varphi_{gn}$ при пуску; по таблиці довідкового додатка 2 знайти базисний опір генератора і визначити повну провідність двигуна при пуску в відносних одиницях

$$Y_g = Y_{gn} \cdot z_{\delta g};$$

- з переліку розрахункових кривих обов'язкового додатку 1 для заданого типу генератора визначити максимальний "провал" напруги, відповідний заданій величині провідності і коефіцієнту потужності асинхронного двигуна.

Аналітичний метод розрахунку.

Структурна схема розрахункового режиму наведена на рис. 9.

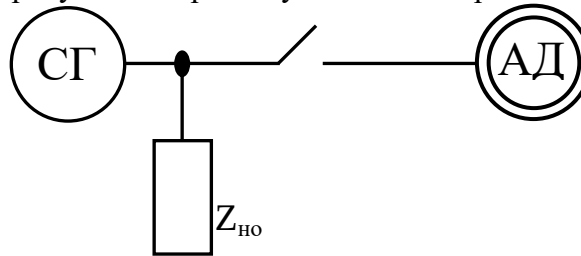


Рис. 9

Перелік необхідних для розрахунку вихідних даних наведено в табл. №5.

3.3.2.3. "Провал" напруги необхідно визначати наступним чином:

- визначити для конкретного типу двигуна по табл.1 довідкового додатка 3 величину повної провідності в Сіменсах і коефіцієнт потужності, відповідні нерухомому стану двигуна;
- визначити величини повної, активної і реактивної провідностей двигуна в момент включення в відносних одиницях

$$Y_g = Y_{gn} \cdot z_{\delta g} \quad g_g = Y_g \cdot \cos \varphi_{gn} \quad b_g = Y_g \cdot \sin \varphi_{gn};$$

- визначити повну провідність попереднього навантаження генератора в відносних одиницях

$$Y_{no} = \frac{S_{no}}{S_{NG}};$$

- визначити активну і реактивну провідності попереднього навантаження генератора

$$g_{no} = Y_{no} \cdot \cos \varphi_{no} \quad b_{no} = Y_{no} \cdot \sin \varphi_{no}$$

Примітка: Якщо у вихідному режимі генератор працював на холостому ході, то прийняти $g_{no} = b_{no} = 0$.

- визначити сумарні активну і реактивну складові провідності навантаження генератора в момент включення

$$g_{\Sigma} = g_g + g_{no} \quad b_{\Sigma} = b_g + b_{no}.$$

Далі розрахунок виконувати відповідно до підпункту 3.1.2.3.

3.3.2.4. У тому випадку, якщо необхідно визначити "провал" напруги при запуску асинхронного двигуна, що не включений в галузевий стандарт, слід попередньо визначити його повну провідність;

3.3.2.5. Перелік необхідних для розрахунку вихідних даних наведено в табл. №6;

Таблиця № 5

3.3.2.6. Повну провідність асинхронного двигуна слід розраховувати наступним чином:

визначити параметри двигуна в пусковому режимі:

$$x_r = x_{2n} + x_m; \quad \mu = \frac{x_m^2}{x_{Sg} \cdot x_r}; \quad T_r = \frac{x_r}{r_{2n}};$$

визначити еквівалентні активний і реактивний опори двигуна в пусковому режимі:

$$x_S = (1 - \mu) \cdot x_{Sg}; \quad r_{\text{эг}} = r_{\text{ог}} + \frac{\mu \cdot x_{Sg}}{T_r}; \quad x_{\text{эг}} = x_S + \frac{\mu \cdot x_{Sg}}{T_r};$$

визначити повну провідність двигуна і коефіцієнт потужності в пусковому режимі

$$Y_{\text{gn}} = \frac{1}{\sqrt{r_{\text{эг}}^2 + x_{\text{эг}}^2}}; \quad \cos \varphi_{\text{gn}} = \frac{r_{\text{эг}}}{\sqrt{r_{\text{эг}}^2 + x_{\text{эг}}^2}}.$$

Далі розрахунок виконувати відповідно до підпункту 3.3.2.3, починаючи з формули (2).

Аналітичний метод розрахунку

. Перелік необхідних для розрахунку вихідних даних наведено в табл. №7.

3.4.1.2. Визначають опір навантаження, що включається, у в.о.

$$x_n = \frac{x_s + x'_{rn}}{Z_{\delta z}}.$$

3.4.1.3. Визначають напруги генератора у в.о.:

– у надперехідному режимі

$$U'' = \frac{x_n}{x_n + x''_d};$$

– у перехідному режимі

$$U' = \frac{x_n}{x_n + x'_d};$$

– у встановленому режимі

$$U_y = \frac{x_n}{x_n + x_d}.$$

3.4.1.4. Уточнюють значення постійних часу генератора у сек

$$T''_d = \frac{(x_n + x''_d) x'_d}{(x_n + x'_d) x''_d} T''_{d2}; \quad T'_d = \frac{x_n + x'_d}{(x_n + x_d) x'_d} T'_{d2}.$$

3.4.1.5. Задаючись значеннями часу t визначають напруги у в.о.:

– генератора без урахування системи АРН

$$U_z(t) = (U'' - U') e^{-t/T''_d} + (U' - U_y) e^{-t/T'_d} + U_y$$

– збудження генератора, що створюється системою АРН

$$\Delta U_\epsilon(t) = (1 - U_y) \left[1 - \left(1 - k \frac{t}{T'_d} \right) e^{-t/T'_d} \right]$$

де значення коефіцієнта k прийняти для системи АРН з електромашинним збудником рівним 1.

– сумарної напруги мережі

$$U(t) = U_z(t) + \Delta U_e(t)$$

За наведеним залежностям в одній системі координат будують три криві $U_z(t)$, $\Delta U_e(t)$, $U(t)$, що описують динамічні процеси зміни напруги генератора при прямому пуску асинхронного двигуна (рис. 10). За графіком $U(t)$ визначають максимальний провал напруги генератора і порівнюють з аналогічним значенням, визначеним в п. 3.3.

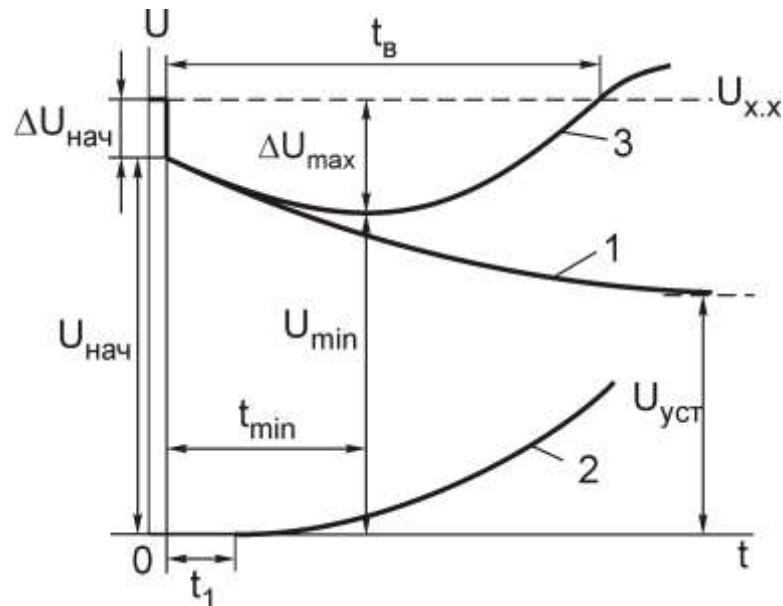


Рис. 10. Зміна напруги в СЕС при включенні навантаження
1 - зниження напруги генератора без АРН; 2 - підвищення напруги генератора під дією АРН; 3 - результуюча напруга мережі.

4. МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В АВТОМАТИЗОВАНІЙ СЕС

Для оцінки правильності проведених розрахунків перехідних процесів у СЕС скористаємося засобами імітаційного моделювання в середовищі *Matlab/Simulink*. Модель розглянутої СЕС наведена на рис. 19. На ній наведені наступні основні елементи:

- *Diesel Generator Alternator* – підсистема, що моделює електромеханічну частину дизельного генератора;
- *Diesel Generator and Governor* – підсистема, що моделює механічну частину дизельного генератора й регулятор частоти;
- *Diesel Generator AVR and Exciter* – підсистема, що моделює систему АРН і збудження генератора;
- *Port-Forward Cable* – підсистема, що моделює трифазну лінію електропередачі (ЛЕП);
- *Line Voltage Sensor* – підсистема, що моделює вимірник трифазної лінійної напруги;
- *Current Sensor* – підсистема, що моделює вимірник струму;
- *Si-pu* – підсистема, що моделює приведення величин до базисних;
- *Time-Based Fault* – підсистема, що моделює трифазне КЗ;
- *Base Load* – підсистема, що моделює попереднє навантаження;
- *Asynchronous machine* – підсистема, що моделює трифазний асинхронний електродвигун;

Наведена модель дозволяє проводити дослідження перехідних процесів у типовий судновий автоматизованої СЕС змінного струму, яка містить два дизельні генератори одного типу, статичне навантаження й асинхронний електродвигун, що підключається.

Модель передбачає ручне й програмувальне відключення/підключення другого генератора й електродвигуна за допомогою блоку *Circuit Breaker*. Для підвищення точності розрахунків у модель ураховуються параметри розподілених ЛЕП до й після ГРЩ за допомогою блоків *Port-Forward Cable*. У якості навантаження електродвигуна використовується постійне значення активного моменту (блок *Ideal Torque Source*), що імітує навантажувальний момент, наприклад, суднової лебідки. Момент інерції дизельних генераторів (блок *Diesel Generator Inertia*) також приймається незмінним і рівним середньому значенню.

У моделі передбачена імітація двох точок трифазного металевого КЗ: на шинах ГРЩ (блок *Time-Based Fault*) і на затискачах попереднього навантаження (блок *Time-Based Fault1*).

Кожна підсистема маскована набором параметрів об'єкта, що імітується, які викликаються у вигляді діалогового вікна шляхом подвійного натискання лівої кнопки миші на зображенні підсистеми.

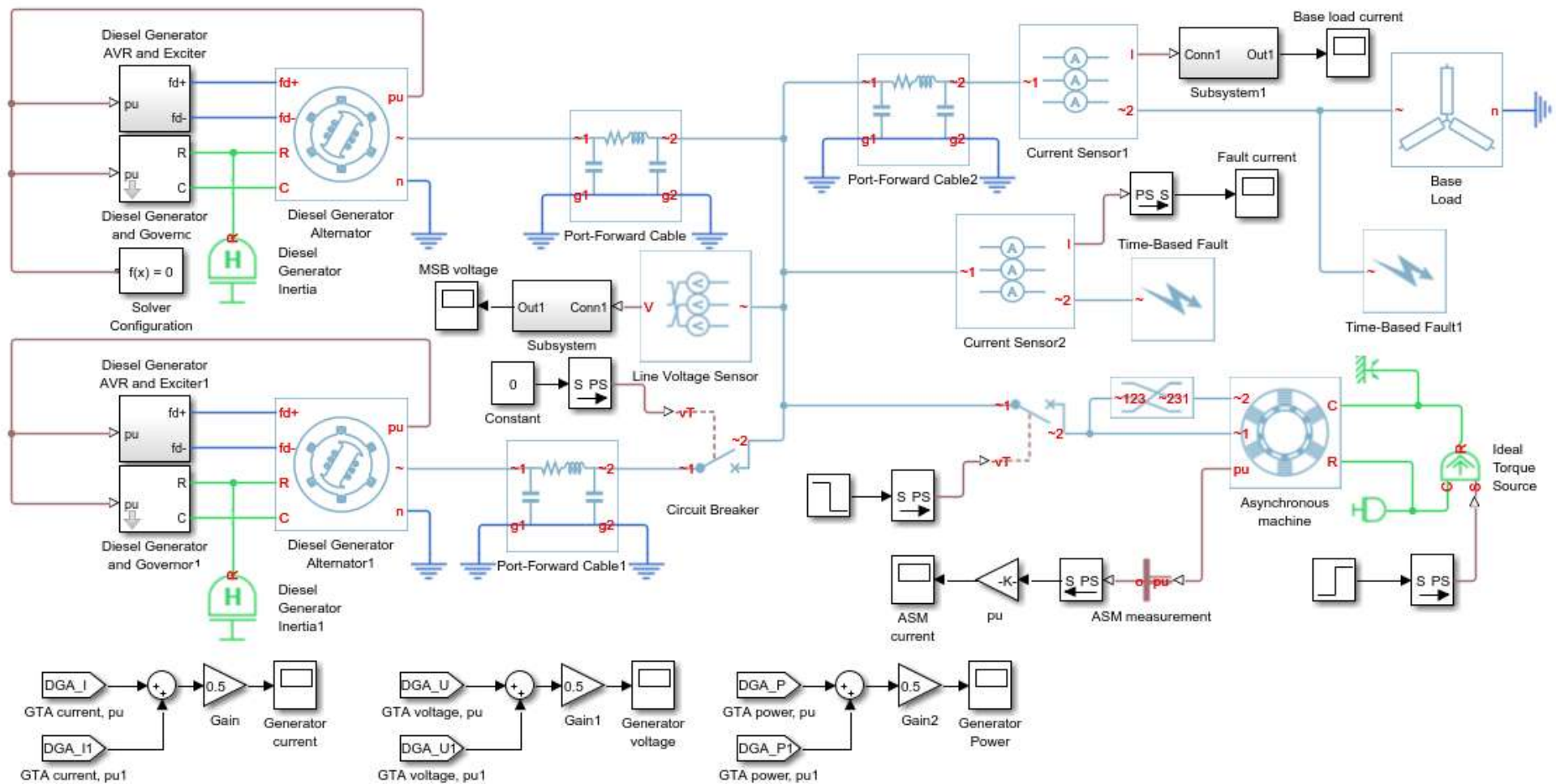


Рис. 19. Імітаційна модель автоматизованої СЕС

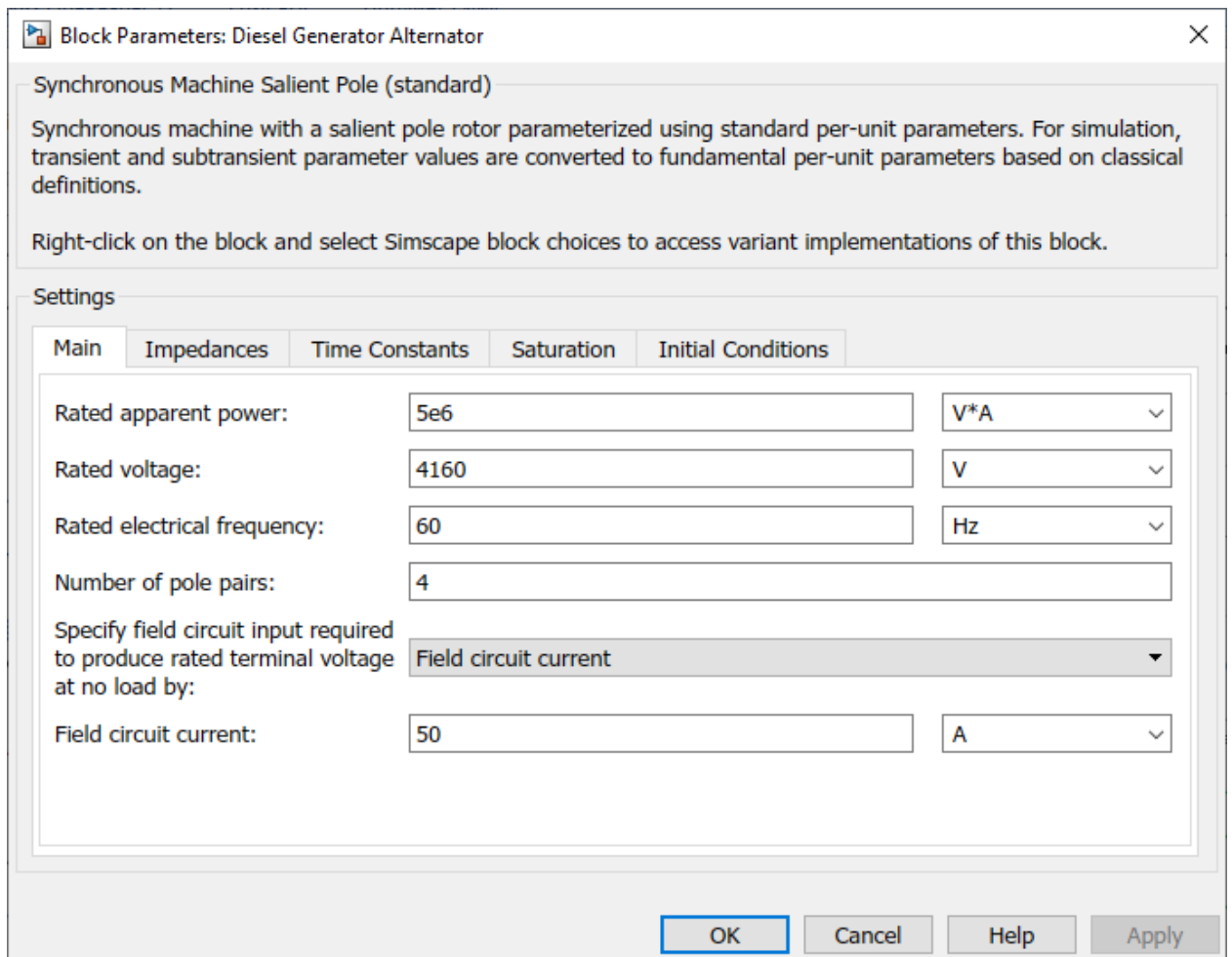


Рис. 20. Діалогове вікно імітаційної моделі дизельного генератора (вкладка «Основні параметри»)

Rated apparent power: Повна номінальна потужність генератора S_N , кВА;

Rated voltage: Номінальна лінійна напруга генератора U_N , В;

Rated electrical frequency: Номінальна електрична частота, Гц;

Number of pole pairs: число пар полюсів;

Specify field circuit input required to produce rated terminal voltage at no load by: Вкажіть параметр вхідного ланцюга обмотки збудження, необхідний для отримання номінальної напруги на клеммах без навантаження. Варіанти: номінальний струм обмотки збудження, номінальну напругу обмотки збудження.

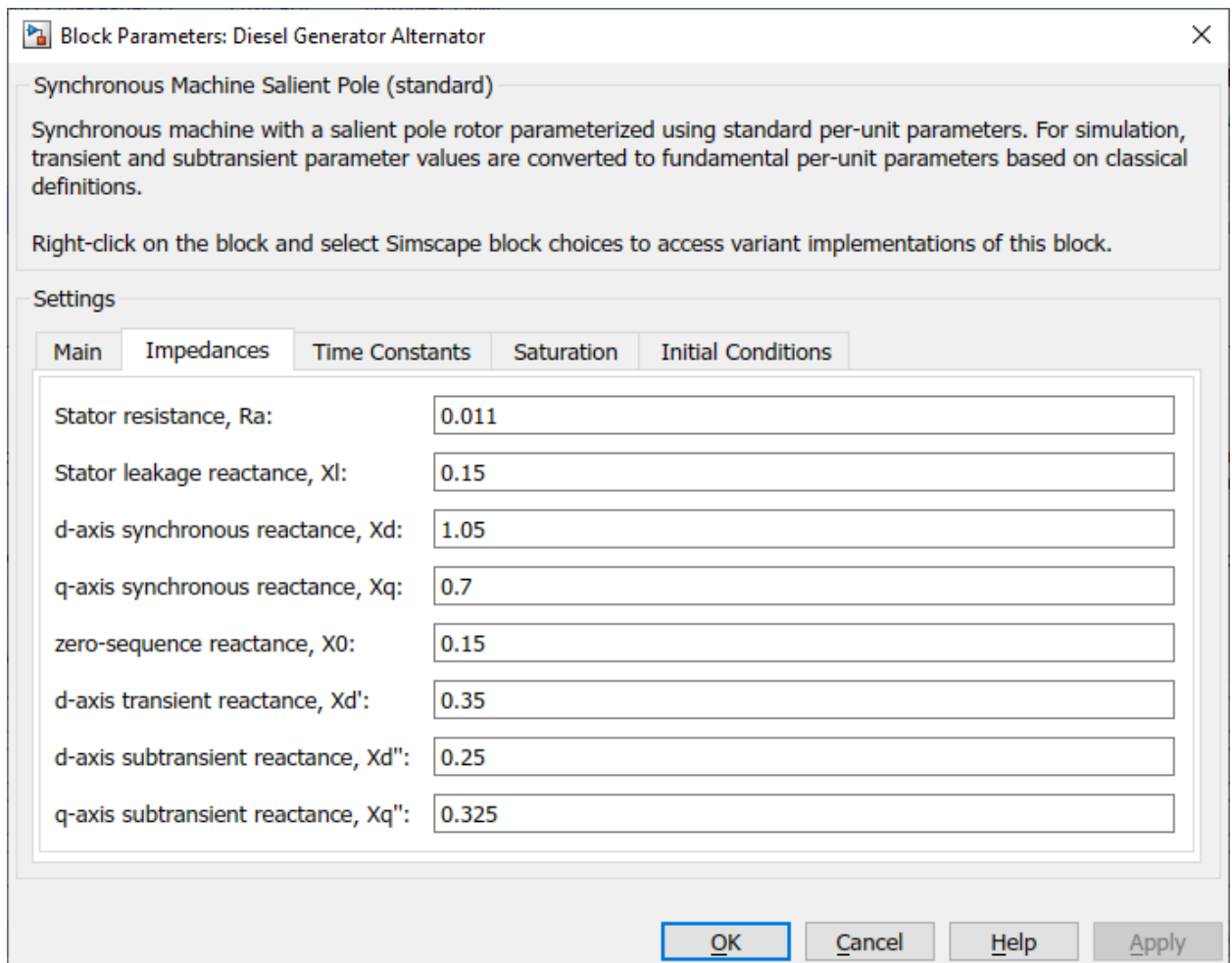


Рис. 21. Діалогове вікно імітаційної моделі дизельного генератора (вкладка «Опори»)

Stator resistance, R_a : Активний опір фази генератора $r_{348(75)}$, в.о.;
Stator leakage reactance, X_l : Індуктивний опір розсіювання фази генератора, в.о.;
d-axis synchronous reactance, X_d : Індуктивний опір по поздовжній осі x_d , в.о.;
q-axis synchronous reactance, X_q : Індуктивний опір по поперечній осі x_q , в.о.;
zero-sequence reactance, X_0 : Індуктивний опір нульової послідовності, в.о.;
d-axis transient reactance, X_d' : Перехідний індуктивний опір по поздовжній осі x_d' , в.о.;
d-axis subtransient reactance, X_d'' : Надперехідний індуктивний опір по поздовжній осі x_d'' , в.о.;
q-axis subtransient reactance, X_q'' : Надперехідний індуктивний опір по поперечній осі x_q'' , в.о.

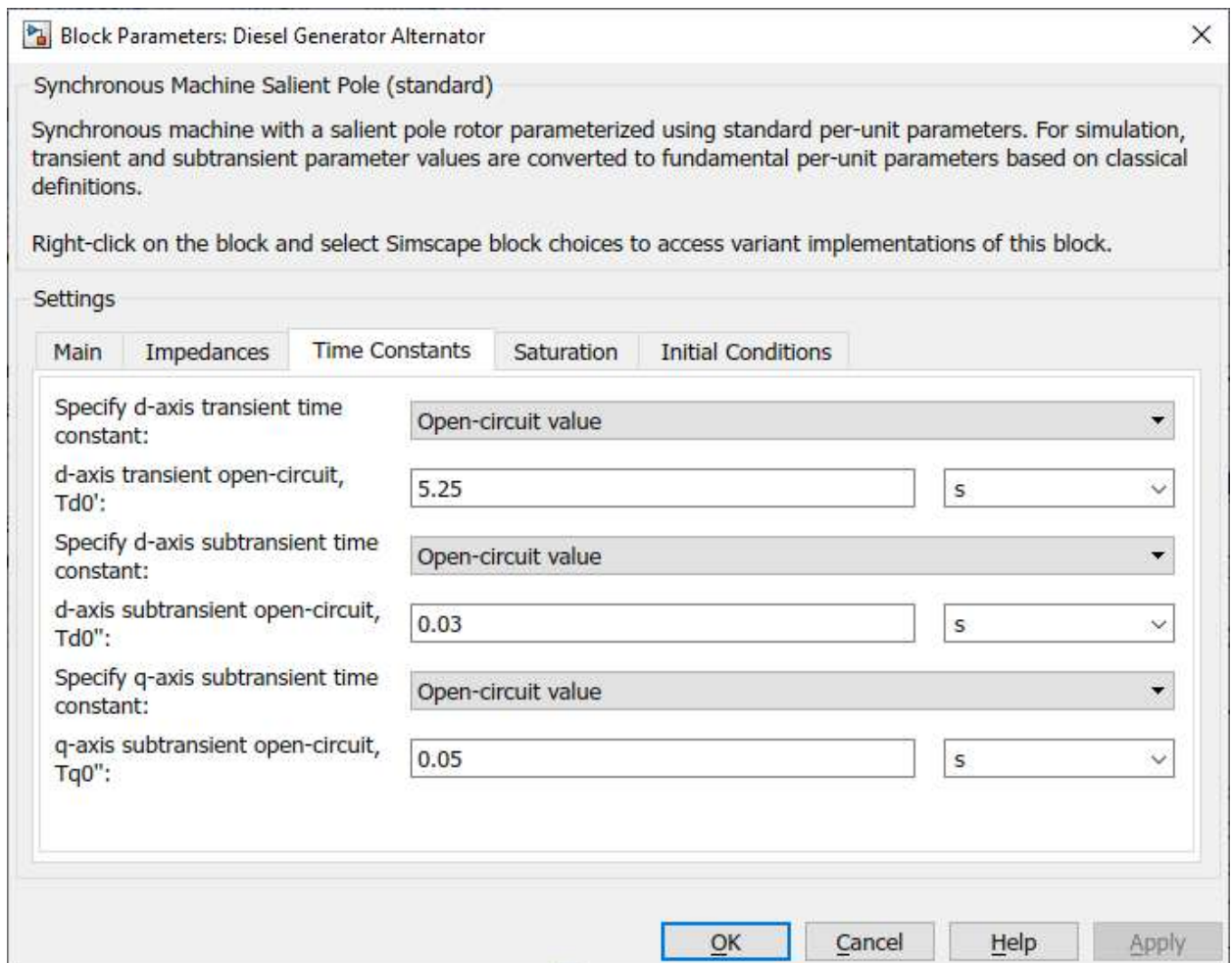


Рис. 22. Діалогове вікно імітаційної моделі дизельного генератора (вкладка «Сталі часу»)

Specify d-axis transient time constant: уточнити тип перехідної сталої часу по поздовжній осі. Варіанти: XX або K3;

d-axis transient, T_{d0}' : перехідна стала часу по поздовжній осі (стала часу обмотки збудження) T'_{dr} , с;

Specify d-axis subtransient time constant: уточнити тип надперехідної сталої часу по поздовжній осі. Варіанти: XX або K3;

d-axis subtransient open-circuit, T_{d0}'' : надперехідна стала часу по поздовжній осі (стала часу заспокійливої обмотки) T''_{dr} , с;

Specify q-axis subtransient time constant: уточнити тип надперехідної сталої часу по поперечній осі. Варіанти: XX або K3;

q-axis subtransient open-circuit, T_{q0}'' : надперехідна стала часу по поперечній осі T''_{qr} , с.

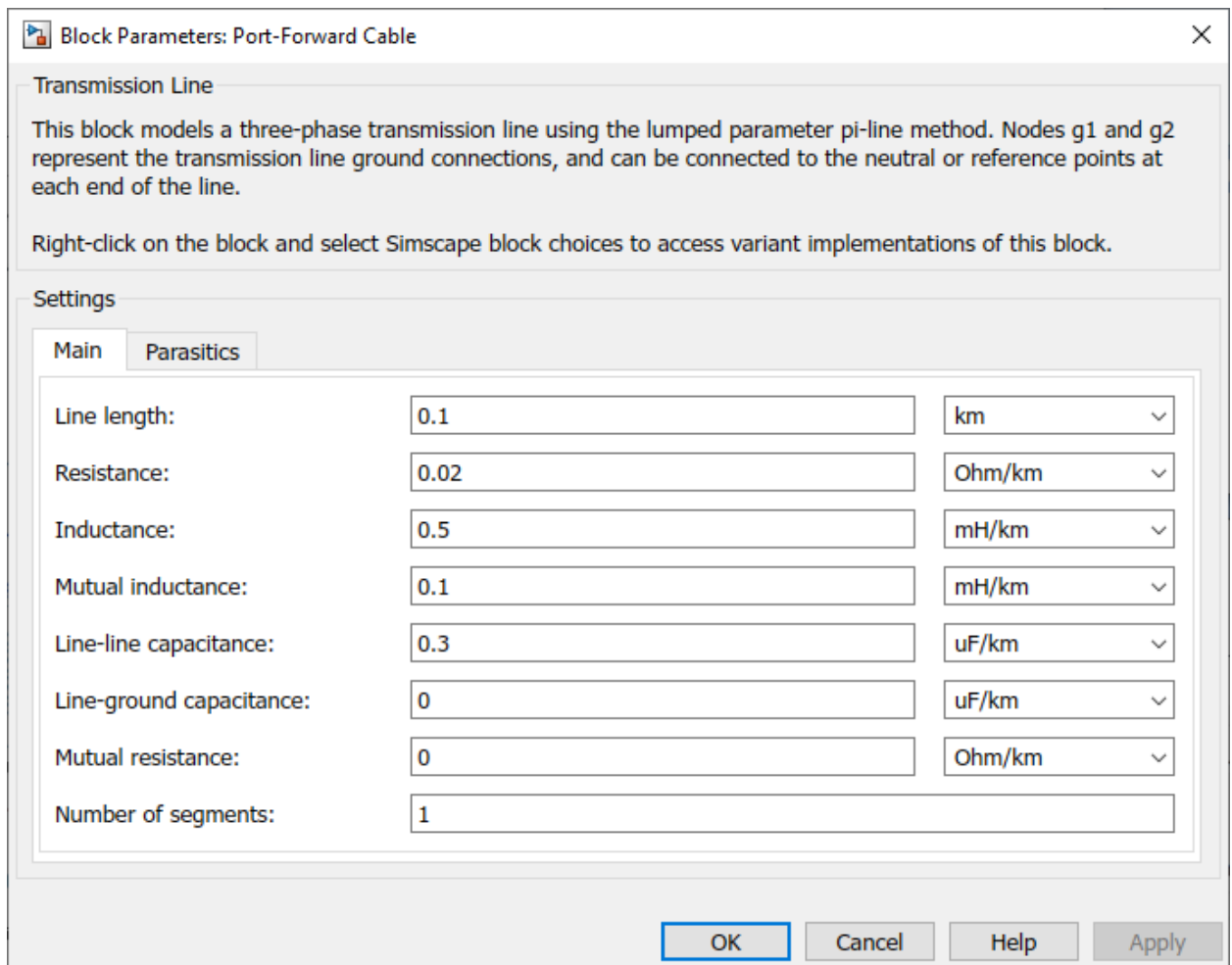


Рис. 23. Діалогове вікно імітаційної моделі ЛЕП
(вкладка «Основні параметри»)

Line length: довжина лінії (кабелю) l , км

Resistance: питомий активний опір лінії (кабелю) R , Ом/км

Inductance: питомий індуктивний опір лінії (кабелю) L , мГн/км

Mutual inductance: питома взаємна індуктивність лінії (кабелю) M , мГн/км

Line-line capacitance: міжлінійна питома ємність C_l , мкФ/км

Line-ground capacitance: питома ємність між лінією і «землею» C_g , мкФ/км

Mutual resistance: питомий взаємний активний опір R_m , Ом/км

Number of segments: кількість паралельних трифазних ліній (кабелів) n .

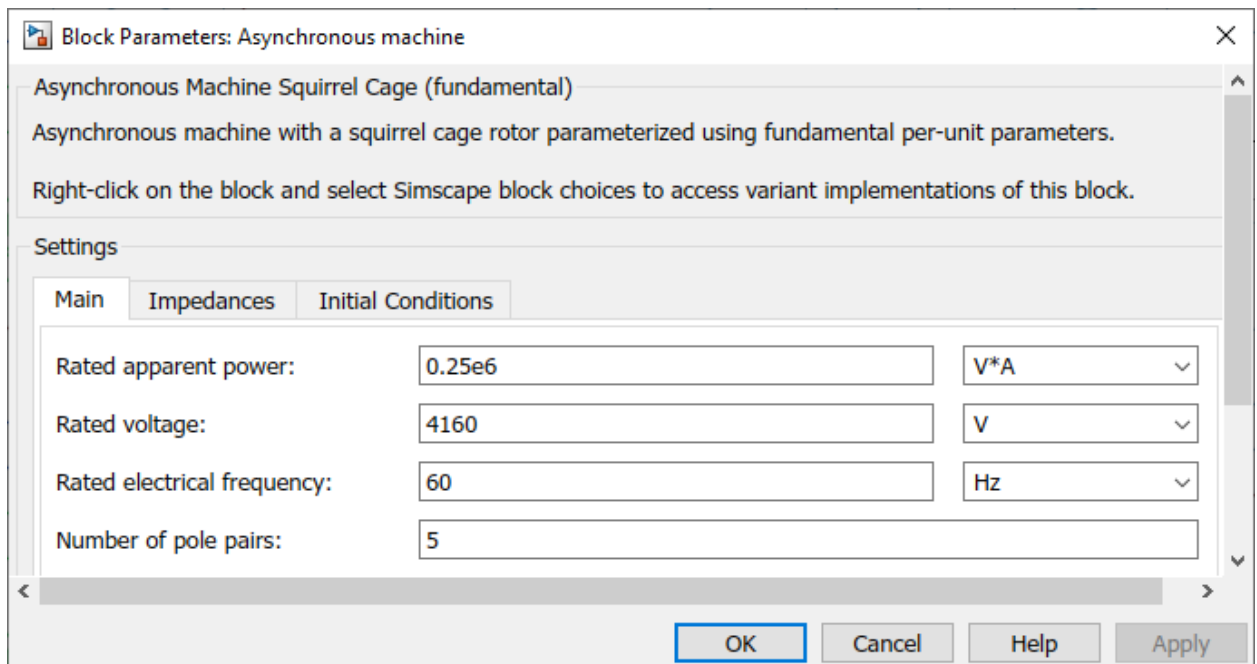


Рис. 24. Діалогове вікно імітаційної моделі АД
(вкладка «Основні параметри»)

Rated apparent power: Повна номінальна потужність АД P_n , кВА;

Rated voltage: Номінальна лінійна напруга АД U_n , В;

Rated electrical frequency: Номінальна електрична частота, Гц;

Number of pole pairs: число пар полюсів;

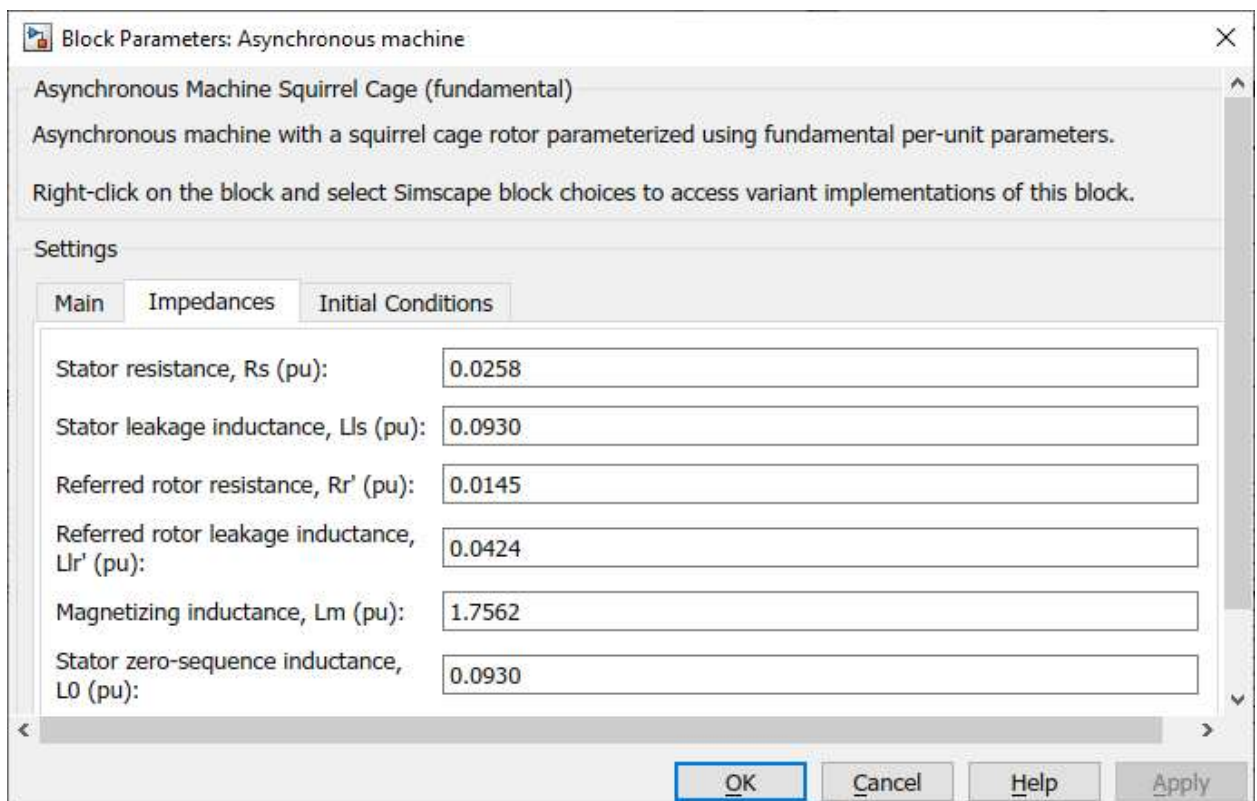


Рис. 25. Діалогове вікно імітаційної моделі АД
(вкладка «Опори»)

Stator resistance, R_s (pu): активний опір фази статора r_{sg} , в.о.

Stator leakage inductance, L_{ls} (pu): індуктивність (індуктивний опір) розсіювання фази статора x_{sg} , в.о.

Referred rotor resistance, R_r' (pu): наведене активний опір ротора r_2 , в.о.

Referred rotor leakage inductance, L_{lr}' (pu): індуктивність (індуктивний опір) розсіювання ротора x_2 , в.о.

Magnetizing inductance, L_m (pu): індуктивність (індуктивний опір) основної гілки намагнічування x_m , в.о.

Stator zero-sequence inductance, L_0 (pu): індуктивність (індуктивний опір) нульової послідовності фази статора, в.о.

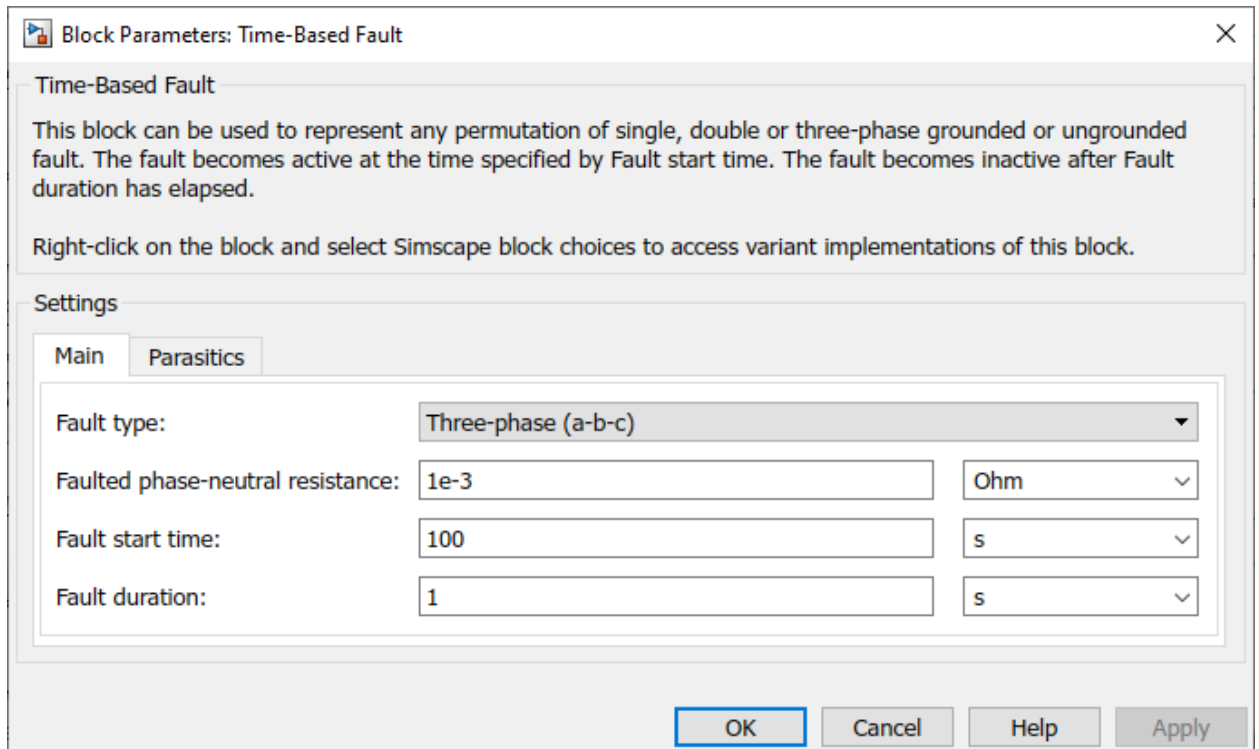


Рис. 26. Діалогове вікно імітаційної моделі трифазного КЗ
(вкладка «Основні параметри»)

Fault type: тип КЗ. Варіанти: фаза-земля, фаза-фаза, дві фази - земля, трифазне, три фази - земля.

Faulted phase-neutral resistance: активний опір КЗ, Ом

Fault start time: модельний час початку дії КЗ, с

Fault duration: тривалість КЗ, с.

У наведеній моделі (рис. 19) необхідно ініціалізувати параметри блоків за допомогою діалогових вікон (рис. 20-26) відповідно до вихідних даних розділів 3 та 4 цієї допомоги з урахуванням додатків 1-5.

При дослідженні перехідних процесів в СЕС при підключенні асинхронного електродвигуна необхідно в моделі відключити другий генератор шляхом завдання в блоці Constant значення 1. Також блоками Step встановити час включення двигуна після завершення всіх перехідних процесів пуску першого генератора в СЕС, наприклад, 10 с.

Після даних маніпуляцій запустити моделювання і зафіксувати перехідний процес зміни напруги на виході генератора (рис. 27). За даним графіком ідентифікувати: початковий провал напруги $\Delta U''$, початкову напругу генератора U'' , максимальний провал напруги $\Delta U_{\max}$, час відновлення напруги генератора t_v і порівняти отримані значення з аналогічними значеннями п. 3.3 і 3.4. Зробити висновок про точність використовуваних в роботі методів визначення провалів напруги.

ЛІТЕРАТУРА

1. Application-oriented propulsion systems / Интернетиздание фирмы Schottel, <http://www.schottel.de>, 2008, 12 с.
2. Azipod® C, Propulsion and thruster units for 1300 – 4500 кВт/ Интернетиздание фирмы ABB Oy, <http://www.abb.com/marine>, 26.05.2010, 18 с.
3. Azipod® Propulsion / Интернетиздание фирмы ABB Oy, <http://www.abb.com/marine>, 26.11.2009, 18 с.
4. Azipod® XO, The new generation Azipod® takes podded propulsion to a new level / Интернетиздание фирмы ABB Oy, <http://www.abb.com/marine>, 2010, 11 с.
5. CRP Azipod® Propulsion Concept / Интернетиздание фирмы ABB Oy, <http://www.abb.com/marine>, 2002, 16 с.
6. Project Guide for Azipod® Propulsion System. Версия 4.1.0. / Интернетиздание фирмы ABB Oy, <http://www.abb.com/marine>, 2004, 77 с.
7. Project Guide for Compact Azipod® Propulsion System / Интернетиздание фирмы ABB Oy, <http://www.abb.com/marine>, 26.03.2004, 43 с.
8. Черніков П.С., Яровенко В.О., Зарицька О.І. Вплив законів управління частотно регульованими гребними електродвигунами на маневрені характеристики електроходів Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: «Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії». – Х.: НТУ «ХПІ», 2020– № 3 (1357). – С.45–51
9. Yarovenko V.A. Dynamics of propelling teleetric power plants of electric ships' propulsive complexes Development of Scientific Schols of Odessa National Maritime University: collective monograph. Riga : Izdevnieciba "Baltija Publishing". 2020. 500 p. <https://doi.org/10.30525/978-9934-588-86-0.08>
10. Yarovenko V.O., Chernicov H.S., Schumylo J.M., Zarinska O.I. Mathematical model of transient modes of electric ships' propulsion complexes with thrusters. *Transport Development* – Odesa, ONMU , 2022 – №3(14). P.110-129. DOI <https://doi.org/10.33082/td.2022.3-14.0>
11. Schumylo J.M., Yarovenko V.O., Zarinska O.I. Dynamic similarity of electric ships' propulsive complexes. *Transport Development* – Odesa, ONMU , 2022 – №4(15). P.43-57. DOI <https://doi.org/10.33082/td.2022.4-15.05>
12. Шумило, О., Яровенко, В., Зарицька, О., & Криворучко, Д. (2023). Вплив конструктивних параметрів електроходів на діаграму керованості. *Вісник Одеського національного морського університету*, (68), 53-65.
13. Oleksandr Shumylo, Volodymyr Yarovenko, Mykola Malaksianj, Oleksiy Melnyk (2003). Comprehensive Assessment of Hull Geometry Influence of a Modernized Ship on Maneuvering Performance and Propulsion System Parameters, *Scientific Journal of Maritime Research (Pomorstvo)*, Vol 37 (2023) 314-325.

