

Трофименко А.О.

Дунайський інститут водного транспорту
Державного університету інфраструктури та технологій

Якусевич Ю.Г.

Дунайський інститут водного транспорту
Державного університету інфраструктури та технологій

Федунов В.М.

Дунайський інститут водного транспорту
Державного університету інфраструктури та технологій

Тришин В.В.

Дунайський інститут водного транспорту
Державного університету інфраструктури та технологій

КОМПЛЕКСНА МОДЕЛЬ КОНТРОЛЕРА ОБМЕЖЕННЯ НАВАНТАЖЕННЯ НА РУХОВУ УСТАНОВКУ НА ОСНОВІ КОЛИВАНЬ НА ЕЛЕКТРИЧНУ МЕРЕЖУ СУДНА

Метою статті є розробка комплексної моделі контролера обмеження навантаження на рухову установку на основі коливань на електричну мережу судна. Для досягнення мети дослідження запропонований квазістатичний регулятор обмеження навантаження заснований на вимірюванні коливань частоти в мережі, прискореннях валів тяги, а також автономному прогнозуванні та експлуатаційній оцінці витрат тяги гвинта. У ході виконання дослідження встановлені основні етапи моделювання квазістатичного управління обмеженням навантаження підрулювача: 1) моделювання чутливості до тяги коливань навантаження; 2) моделювання регуляторів обмеження навантаження підрулюючого пристрою; 3) моделювання регулятора обмеження навантаження на основі ймовірності втрати крутного моменту; 4) моделювання регулятора обмеження навантаження на основі втрати крутного моменту в реальному часі; 5) моделювання регулятора обмеження навантаження на основі прискорення тяги. Основні переваги запропонованої моделі можна сформулювати таким чином: використання контролера обмеження навантаження дозволяє зменшити коливання частоти мережі та прискорення карданного валу; застосування контролера на основі прискорення дозволяє утримувати прискорення в межах встановленої межі порогу, що забезпечує збільшення терміну служби підрулюючих машин і зниження витрат на їх обслуговування; розподіл квазістатичного контролера обмеження навантаження між підрулюючими машинами дозволяє програмувати контролер всередині тяги, що підвищує надійність його роботи; контролер обмеження навантаження може повторно регулювати опорний сигнал швидкості. Найбільш суттєвим результатом, отриманим у ході дослідження, є сукупність виразів, які дозволяють формально представити та промодельовати процес обмеження навантаження на рухову установку на основі коливань на електричну мережу судна з використанням відповідного контролера. Запропонована модель контролера може бути використана для зменшення коливань частоти і потужності в електричній мережі і для запобігання надмірних механічних навантажень на окремі підрулювачі.

Ключові слова: комплексна модель, контролер, обмеження, електрична мережа судна, квазістатичний регулятор.

Постановка проблеми. Залежно від типу споживача, режиму роботи і чутливості до погодних умов, споживачі можуть отримувати різні рівні навантаження від електричної мережі, що може призвести до коливань навантаження з різними частотами. Особливо високі частоти коливань

навантаження, які не були враховані при оптимізації експлуатаційних витрат, можуть викликати коливання напруги та потужності в мережі судна, що може призвести до серйозних проблем. Крім того, такі коливання можуть збільшити механічне та теплове навантаження на первинні вантажники

та збільшити витрати палива. Залежно від рівня підвищеного ризику відключення електроенергії динамічні порушення потужності генератора, викликані споживачами, можна розділити на наступні основні групи:

1) статичні перешкоди внаслідок операцій судна та сервісних функцій, таких як:

- сервомотори для різних гідравлічних систем: лебідок, рульового механізму і т. д.;
- перекачування, стиснення, вентиляція;
- опалення, кондиціонування і т. д.;

2) низькочастотні збурення:

- перешкоди, обумовлені навантаженнями на підрулювач;
- кранові роботи;
- бурові навантаження (в залежності від відкладів) тощо;

3) коливання середньої частоти:

- коливання, обумовлені наслідками втрати тяги/крутного моменту гвинта, що передається через електричні підрулювачі;

- активні коливання компенсації крену;

- коливання від впливу хвильових навантажень першого порядку, що діють на судно як при динамічному позиціонуванні, так і при русі;

4) високочастотні коливання:

- коливання в діапазоні частоти згоряння циліндра, що впливають на крутний момент двигуна;

- різні швидко мінливі електричні ефекти в мережі, наприклад, гармонійні спотворення струму і напруги;

- шум, похибка вимірювань.

Визначені динамічні порушення потужності генератора, викликані споживачами, можна зменшити шляхом моделювання контролеру обмеження навантаження двигуна. Таким чином, завдання моделювання контролеру обмеження навантаження двигуна, заснованого на коливаннях навантаження на мережу, є актуальним. При цьому, коли гвинти схильні до великих втрат тяги, запропонований контролер може знизити коливання навантаження на підрулювачі і мережу, і, тим самим, запобігти надмірному зносу і пошкодженню силових передавальних частин підрулюючого пристрою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Багато вчених досліджують шляхи оптимізації управління електричною мережею судна, в тому числі на основі моделювання відповідних процесів [1–10].

Наприклад, у роботі [1] визначено, що експлуатація морської силової установки представляє

собойо типову масштабну і складну систему, безпосередньо пов'язану з безпекою судноплавства. Щоб гарантувати ідеальну роботу, система управління повинна бути в змозі підтримувати частоту і напругу на терміналі електричної мережі стабільними як в сталому стані, так і в перехідних процесах. Втім, навіть для добре налаштованого Якщо є механізм, який може виявити зміни топології електричної мережі і допомогти контролеру підготуватися до цього, це могло б полегшити роботу морського інженера-електрика. Для реалізації цієї ідеї був розроблений проект під назвою «Дослідження методів управління бортовим електриком». Ця робота є першою частиною даного проекту і зосереджена на створенні структури для морської енергетичної системи. На основі цієї структури продовжуються подальші дослідження з контролю топології та зміни контролерів.

У роботі [2] зазначено, що на даний час кількість електроенергії, виробленої на борту суден, різко зросла, особливо для повністю електричних суден, куди вся необхідна енергія надходить з електроенергетичної системи. У цьому контексті традиційні методи розрахунку попиту на електроенергію та вибору розміру системи генерації стали неадекватними, оскільки базуються на дуже застарілих припущеннях. Метою даної роботи є представлення оптимальної задачі для правильного і ефективного вибору розмірів системи генерації. Необхідна потужність буде розрахована з використанням традиційного підходу, заснованого на коефіцієнті навантаження. Оптимальна задача буде розв'язана за допомогою генетичних алгоритмів і забезпечить оптимальні розміри, коефіцієнти навантаження і одиничні зобов'язання для кожного генератора в кожному сценарії судна.

У роботі [3] розглянуто правила Міжнародної морської організації щодо викидів з суден вуглекислого газу, сірка й оксиду азоту. У статті зазначено, що для вирішення цієї проблеми судна з електричною силовою установкою можуть використовувати систему управління навантаженням, керовану батареєю (LCS), щоб відповідати нормам викидів. У цьому дослідженні дані про навантаження, виміряні протягом одного року на судні, аналізуються за допомогою карти, що самоорганізується. За результатами аналізу розробляється оптимальна кількість генерації потужності та ємність акумулятора, а також будується алгоритм LCS. Моделювання системи генерації електроенергії на судні за допомогою MATLAB Simulink дозволяє перевірити алгоритм і переконатися в його ефективності. Запропонований

алгоритм LCS, запропонований в даному дослідженні, забезпечує зниження витрати палива на 1,01 % і зниження заряду акумулятора на 10,97 % у порівнянні з існуючим алгоритмом.

Але у відомій літературі відсутня інформація щодо моделювання контролера обмеження навантаження на рухову установку судна.

Постановка завдання. Метою статті є розробка комплексної моделі контролера обмеження навантаження на рухову установку на основі коливань на електричну мережу судна.

Викладення основного матеріалу. Моделювання квазістатичного управління обмеженням навантаження підрулювача складається з таких основних етапів (рис. 1):

- 1) моделювання чутливості до тяги коливань навантаження;
- 2) моделювання регуляторів обмеження навантаження підрулюючого пристрою;
- 3) моделювання регулятора обмеження навантаження на основі ймовірності втрати крутного моменту;
- 4) моделювання регулятора обмеження навантаження на основі втрати крутного моменту в реальному часі;
- 5) моделювання регулятора обмеження навантаження на основі прискорення тяги.

Моделювання чутливості до тяги коливань навантаження реалізується за допомогою наступних виразів. Залежність номінальної потужності від номінальної тяги виражається у такому виразі:

$$P_{0,p} = \frac{2\pi K_{Q0p}}{\rho^{1/2} DK_{T0p}} T_{0,p}^{3/2} = \text{const}. \quad (1)$$

Чутливість амплітуди коливань потужності до зміни швидкості обертання гвинта виражається:

$$\frac{\partial \Delta P_{mp}}{\partial \omega_p} \approx 3k_1 \omega_{0p}^2 (1 - \beta_{loss,p}), \quad (2)$$

де зміни тертя крутного моменту можна проігнорувати.

Номінальна тяга гвинта виражається так:

$$T_{0,p} = \frac{1}{4\pi^2} \rho D_p^4 K_{T0p} n_{0,p}^2 = k_2 \omega_{0p}^2, \quad (3)$$

$$k_2 = \rho D_p^4 K_{T0p},$$

А чутливість тяги до зміни швидкості можна порівняти за допомогою:

$$\frac{\partial T_{0,p}}{\partial \omega_p} = 2k_2 \omega_{0p}. \quad (4)$$

З наведених виразів видно, що коливання силового навантаження на мережу будуть падати з ква-

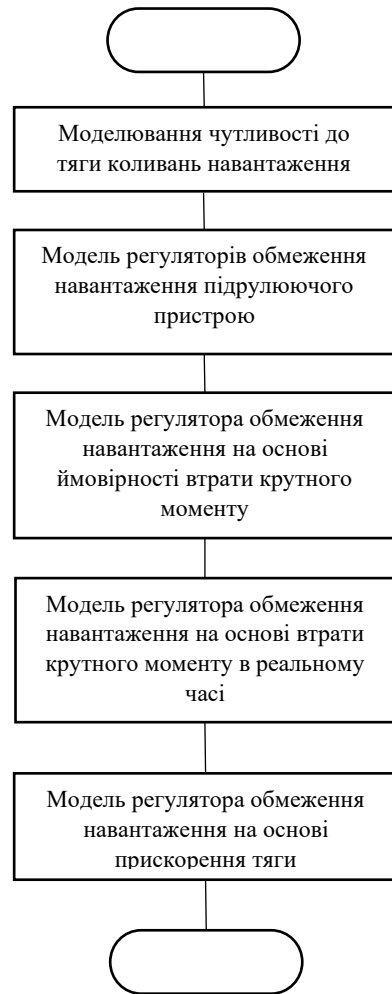


Рис. 1. Структура комплексної моделі контролера обмеження навантаження на рухову установку на основі коливань на електричну мережу судна

дратом номінальної швидкості гвинта ω_p , в той час як тяга буде падати лінійно з ω_{0p} . Порівнюючи зміни коливань потужності (2) зі зміною номінальної тяги (4), виходить такий вираз:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta P_{mp}}{\partial T_{0,p}} &\approx \frac{3k_1}{2k_2} \omega_{0p} (1 - \beta_{loss,p}) \approx \\ &\approx \frac{3D_p K_{Q0p}}{8\pi^2 K_{T0p}} \dot{E}_{0p} (1 - \beta_{loss,p}) \end{aligned} \quad (5)$$

Таким чином, чутливість зменшеної тяги для зменшення коливань навантаження на мережу буде збільшуватися лінійно при номінальній швидкості гвинта.

Розглянемо моделювання регуляторів обмеження навантаження підрулюючого пристрою. Рухова здатність, як правило, обмежена в залежності від статичного рівня наявної потужності і здатності запобігати затемнення. Рухова уста-

новка повинна бути обмежена, якщо наявна потужність стає негативною. Таким чином, контроль обмеження навантаження буде мати стабільні, плавні і відносно повільні реакції.

Запропоновано модифікований допустимий ліміт регулювання силової установки. Він складається зі статичної (існуючої) і динамічної (запропонованої) частини:

$$P_{s,thp} \left(\frac{\partial \Delta P_{pm}}{\partial T_{0,p}}, \Delta \omega_g, \Delta \omega_p, \beta_{loss,p} \right) = P_{s,thp} (P_{th}, P_{av,start}, \&, P_{cont,gi}^{max}, P_{gi}, P_{rgi}) + P_{d,thp} \left(\frac{\partial \Delta P_{pm}}{\partial T_{0,p}}, \Delta \omega_g, \Delta \omega_p, \beta_{loss,p} \right), \quad (6)$$

де динамічна частина залежить від чутливості коливаним силового навантаження до номінальної тяги $\frac{\partial \Delta P_{pm}}{\partial T_{0,p}}$, коливаним частоти мережі $\Delta \omega_g$ і втрат крутного моменту $\beta_{loss,p}$ або коливаним частоти обертання карданного вала $\Delta \omega_p$.

Динамічна частина закону контролю обмеження навантаження буде визначатися для кожного гвинта самостійно:

$$P_{d,thp} = L_{d,thp} P_{thp}. \quad (7)$$

Всі запропоновані контролери засновані на колюваннях частоти мережі. Хоча частоту легко виміряти, завдання може полягати в тому, щоб з'ясувати, який тяга викликає більше перешкод для мережі і вимагає більш високого зниження навантаження, ніж інші. Таким чином, конструкція контролера буде ґрунтуватися на аналізі виразу

$$L_{d,thp} = L_{d,thp} \left(\Delta E_{pm}, \delta E_{p,loss}, \frac{\partial \Delta P_{pm}}{\partial T_{pm}} \right) = -k_{thp1} \left(\frac{\partial \Delta P_{pm}}{\partial T_p} \right) \frac{1}{t} \int_0^1 (Q_{mg} - Q_{eg})^2 dt, \quad (8)$$

де k_{thp1} – посилення контролера;

Q_{mg} та Q_{eg} – механічний і електричний крутний момент на генераторах.

Запропонований контролер теоретично враховує множину важливих ефектів, які залежать від такого:

- чутливість коливаним потужності до розвинутої тяги;
- прискорення карданного вала;
- втрати енергії в мережі через колювання частоти мережі.

На подальших етапах моделювання ці ефекти будуть кількісно визначені, тобто втрати енергії в мережі можна отримати безпосередньо з балансу крутного моменту генератора, тобто прискорення вала.

Розглянемо моделювання регулятора обмеження навантаження на основі ймовірності втрати крутного моменту. Виходячи зі значення виразу (5), втрата крутного моменту нижче порогового значення пропорційна середній втраті крутного моменту і застосовуються такі положення:

$$\frac{\partial \Delta P_{mp}}{\partial T_{0,p}} (q_{h,p}) \approx \text{const}. \quad (9)$$

Запропонований підхід до регулювання обмеження навантаження базується на ймовірності втрати крутного моменту:

$$L_{d,thp} = -k_{thp1} |\omega_{0,p}| N_{p,loss} (q_{h,p}, V_s, H_w, \mu) \int_0^1 (Q_{mg} - Q_{eg})^2 dt. \quad (10)$$

де $q_{h,p}$ – поріг врахування коливаним високої інтенсивності та поріг коливаним низької інтенсивності.

Швидкість судна V_s , спостережувана висота хвилі H_w і напрямок на хвилі μ , повинні бути забезпечені з системи управління судном. Висока точність необхідної інформації контролеру не потрібна. H_w може бути пов'язана зі швидкістю вітру, припускаючи, що генеруються вітрові хвилі.

У запропонованому підході управління чутливість коливаним потужності до зміни тяги гвинта виражається за допомогою ймовірності виникнення втрат тяги, тобто $N_{p,loss}$.

При моделюванні регулятора обмеження навантаження на основі втрати крутного моменту в реальному часі ймовірність $N_{p,loss}$ замінюється на $q_{h,p} - \beta_{p,loss}$. Запропонований підхід до управління враховує середнє значення $q_{h,p} - \beta_{p,loss}$:

$$L_{d,thp} = -k_{thp1} |\omega_{0,p}| \Delta \bar{\beta}_{p,loss} \int_0^1 (Q_{mg} - Q_{eg})^2 dt = -k_{thp1} |\omega_{0,p}| \Delta \bar{\beta}_{p,loss} \int_0^1 \left(\frac{d}{dt} \omega_g \right)^2 dt, \quad (11)$$

$$\Delta \bar{\beta}_{p,loss} = \left(q_{h,p} - \beta_{p,loss} \right).$$

Середні відносні втрати $\Delta \bar{\beta}_{p,loss}$ крутного моменту можна розрахувати, знаючи тільки швидкість гвинта $\omega_{0,p}$ і крутний момент тяги Q_{mp} .

Середні відносні втрати крутного моменту отримують при низькочастотній фільтрації розрахункового крутного моменту навантаження:

$$\begin{aligned} \Delta \bar{\beta}_{p,loss} &= \widehat{\Delta \beta}_{p,loss} - T_{Qf} \Delta \bar{\beta}_{p,loss}, \\ \Delta \widehat{\beta}_{p,loss} &= q_{h,p} - \widehat{\beta}_{p,loss}, \\ \widehat{\beta}_{p,loss} &= \frac{\widehat{Q}_{ap^*}}{\widehat{Q}_{0p}} = \frac{4\pi^2 \widehat{Q}_{ap^*}}{D_p^5 K_{Q0p} \omega_p^2}, \end{aligned} \quad (12)$$

де T_{Qf} – константа часу фільтра низьких частот, \widehat{Q}_{ap^*} – оцінка тривалого крутного моменту вантажу, отриманого від спостерігача крутного моменту пропелерного навантаження:

$$\widehat{\omega}_p = \frac{1}{J_p} (Q_{mp} - \widehat{Q}_{ap^*}) + l_{1p} (\omega_p - \widehat{\omega}_p), \quad (13)$$

$$\widehat{Q}_{ap^*} = l_{2p} (\omega_p - \widehat{\omega}_p),$$

де l_{1p}, l_{2p} – збільшення спостерігача, і \widehat{Q}_{ap^*} – розширений крутний момент вантажу, включаючи тертя:

$$\widehat{Q}_{ap^*} \approx Q_{ap^*} = Q_{ap} + Q_{fp}. \quad (14)$$

Точка рівноваги динаміки помилок спостерігача може бути показана як глобально експоненціально стабільна в разі постійного крутного моменту, якщо спостерігач набирає l_{1p}, l_{2p} обрану відповідно до

$$l_{1p} > \frac{-l_{2p}}{J_p}, \quad l_{2p} > 0. \quad (15)$$

Моделювання регулятора обмеження навантаження на основі прискорення тяги. Вплив втрати крутного моменту на пропелер і коливання мережі можна кількісно оцінити за допомогою середніх відносних втрат крутного моменту. Подібний підхід можна отримати, вимірявши на гвинті в реальному часі швидкість обертання вала, тобто його прискорення. Вимірювання прискорення може використовуватися в якості показника тяжкості втрат тяги на гвинті і подальшої передачі коливань навантаження в мережу. Швидкість гвинта і коливання навантаження, як правило, будуть низькими в низькошвидкісному режимі і значно вище в швидкісному режимі.

У режимі низької швидкості гвинта у штатного регулятора швидкості не повинно виникнути ніяких проблем з підтриманням потрібної швидкості. Таким чином:

$$\frac{d\omega_p}{dt} \approx 0. \quad (16)$$

Оскільки крутний момент навантаження також збільшується ω_{0p} , і стандартний регулятор швидкості вала може мати проблеми з утриманням швидкості ω_p , близької до бажаної ω_{0p} .

При цьому прискорення вала $\frac{d\omega_p}{dt}$ збільшується пропорційно дисбалансу крутного моменту $Q_{mp} - Q_{ap}$, який більш виражений для гвинтів з малою інерцією, при низькій J_p :

$$\frac{d\omega_p}{dt} \approx 0 \rightarrow |Q_{mp} - Q_{ap} - Q_{fp}| > 0. \quad (17)$$

Дисбаланс крутного моменту відповідає за знос гвинта, що свідчить про те, що крутний момент гвинтового навантаження не повністю врівноважується крутним моментом двигуна. Таким чином, вал піддається коливанням крутного моменту. Ці вібрації можуть викликати вібрації вала і потенційно збільшити втому і швидкість зносу деталей передачі електроенергії.

Таким чином, у міру того як коливання крутного моменту навантаження на гвинт стають більш вираженими, прискорення вала збільшується і коливання навантаження з більшою величиною передаються в мережу. Тобто регулятор обмеження навантаження може ґрунтуватися на прискоренні вала, як показник великого навантаження гвинта і коливань крутного моменту генератора.

Висновки. У статті запропонована комплексна модель квазістатичного контролера, що обмежує навантаження рухової установки на основі коливань на електричну мережу судна. Найбільш важливі переваги запропонованих концепцій управління формулюються так:

- контролер обмеження навантаження зменшує коливання частоти мережі і прискорення карданного вала для змодельованих рішень з можливістю використання отриманих результатів в режимі реального часу;

- за допомогою контролера на основі прискорення можна утримувати прискорення валів в межах встановленої межі порогу. Це дозволяє збільшити термін служби підрулюючих машин і знизити витрати на обслуговування;

- між підрулюючими розподіляється квазістатичний контролер обмеження навантаження двигуна, тобто контролер може бути запрограмований всередині тяги, оскільки управління не залежить від зв'язку з іншими підрулювачами, генераторами або споживачами. Це підвищує надійність роботи контролера;

- контролер обмеження навантаження може повторно регулювати опорний сигнал швидкості з алгоритму розподілу тяги динамічного позиціонування.

Список літератури:

1. An Onboard Electrical Network Platform – Modeling & Simulation / Gang Ya. et al. *American Control Conference*. 2019. P. 2761–2766. URL: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=8552ef9784098a296cd4c745d37e2ce91ce913b0> (дата звернення: 02.04.24).
2. Boveri A., Silvestro F., Gualeni P. Ship Electrical Load Analysis and Power Generation Optimisation to Reduce Operational Costs. *2016 Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification* : International Conference (ESARS-ITEC), Toulouse, France, 2016. P. 1–6. URL: https://www.researchgate.net/publication/313542863_Ship_electrical_load_analysis_and_power_generation_optimisation_to_reduce_operational_costs (дата звернення: 02.04.24).
3. Jong-Hak L., Hun-Seok L., Jin-Seok O. Optimization of a load control system algorithm for electrically propelled ships using data mining. *SN Applied Sciences*. Vol. 3. URL: https://www.researchgate.net/publication/350216048_Optimization_of_a_load_control_system_algorithm_for_electrically_propelled_ships_using_data_mining (дата звернення: 02.04.24).
4. Da Rin A., Quaia S., Sulligoi G. Innovative concepts for power station design in all electric ships. *Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2008. SPEEDAM 2008* : International Symposium, on 11–13 June 2008 P. 569–573. DOI: 10.1109/SPEEDHAM.2008.4581216.
5. Abdeljalil L., Aït-Ahmed M., Benkhoris M.F., Singular perturbation modeling and control of embarked electrical network. *Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IEEE IECON)*, Paris, France, 2006. P. 454–459. DOI: 10.1109/IECON.2006.347242.
6. Abdeljalil L., Aït-Ahmed M., Benkhoris M.F. Modeling Approach For Simulation And Control Of Embarked Electrical Network. *International conference on Electrical Machines (ICEM)*, Cracow, 2004.
7. Yeager K.E., Willis J.R. Modeling of Emergency Diesel Generators in an 800 Megawatt Nuclear Power Plant. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1993. Vol. 8, No. 3. P. 433–441.
8. Abdeljalil L., Belhaj M., Aït-Ahmed M. Simulation and control of electrical ship network. *European Conference on Power Electronics and Applications (EPE)*, Dresden, 2005. 10 p. DOI: 10.1109/EPE.2005.219353.
9. Koushan K. Environmental and Interaction Effects on Propulsion Systems used in Dynamic Positioning, an Overview. *Proc. 9th Int. Symp. Practical Design of Ships and Other Floating Structures (PRADS'04)*, Lübeck-Travemünde, Germany. 2004. P. 1013–1020.
10. Kovudhikulrungsri, L. and T. Koseki. Precise Speed Estimation From a Low-Resolution Encoder by Dual-Sampling-Rate Observer. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2006. Vol. 11, N. 6. P. 661–670. DOI: 10.1109/TMECH.2006.886194.

Trofymenko A.O., Yakusevych Yu.H., Fedunov V.M., Tryshyn V.V. A COMPLEX MODEL OF A PROPULSION SYSTEM LOAD LIMITATION CONTROLLER BASED ON OSCILLATIONS IN THE SHIP'S ELECTRICAL NETWORK

The aim of the article is to develop an integrated model of a load limiting controller for a propulsion system based on fluctuations in the ship's electrical network. To achieve the research goal, the proposed quasi-static load limiting controller is based on measuring frequency fluctuations in the grid, accelerations of propeller shafts, as well as autonomous prediction and operational assessment of propeller thrust losses. In the course of the study, the main stages of modelling the quasi-static load limiting control of the thruster were established: 1) modelling the sensitivity to thrust of load fluctuations; 2) modelling the load limiting controllers of the thruster; 3) modelling the load limiting control based on the probability of torque loss; 4) modelling the load limiting control based on real-time torque loss; 5) modelling the load limiting control based on thrust acceleration. The main advantages of the proposed model can be summarized as follows: the use of a load limiting controller reduces fluctuations in the grid frequency and the acceleration of the propeller shaft; the use of an acceleration-based controller allows keeping the acceleration within the set threshold limit, which increases the service life of thrusters and reduces their maintenance costs; the distribution of a quasi-static load limiting controller between thrusters allows programming the controller within the thruster, which increases the efficiency of the system; the load limiting controller can re-adjust the speed reference signal. The most significant result obtained during the study is a set of expressions that allow to formally represent and model the process of limiting the load on the propulsion system based on fluctuations in the ship's electrical network using an appropriate controller. The proposed model of the controller can be used to reduce frequency and power fluctuations in the electrical network and to prevent excessive mechanical loads on individual thrusters.

Key words: complex model, controller, constraints, ship's electrical network, quasi-static controller.