

Дакі О.А., Якусевич Ю.Г., Тришин В.В., Дорофєєва З.Я.

РОЗРОБЛЕННЯ ПРОПОЗИЦІЙ ЩОДО ДЕКОМПОЗИЦІЇ СУДНОВОЇ ХОЛОДИЛЬНОЇ УСТАНОВКИ ТА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ КОМПРЕСОРА

Метою роботи є розробка пропозицій щодо декомпозиції суднової холодильної установки та розробка математичної моделі компресора, що є основою для подальшої автоматизації відповідних процесів оцінки та контролю стану суднової холодильної установки в цілому. Поставлена мета досягається шляхом аналізу принципової схеми суднової холодильної установки з двоступеневою парокомпресійною холодильною машиною. Розглянуто найскладніший випадок двоступеневої холодильної машини, суміщеної зі споживачем холоду у вигляді морозильного комплексу (системи морозильних апаратів), усі інші випадки впливають з цього, як простіші та часткові. При цьому для вирішення різних завдань, в загальному сенсі, запропонована декомпозиція на трьох рівнях. Перший рівень декомпозиції передбачає розбивку суднової холодильної установки на два основні вузли: генератор холоду (холодильна машина або система холодильних машин) і споживач холоду. Другий рівень декомпозиції передбачає розбивку генератора і споживача холоду на окремі вузли, за допомогою математичних моделей, які синтезуються. Декомпозиція другого рівня дає змогу полегшити отримання рівнянь математичних моделей вузлів першого рівня за допомогою простіших рівнянь математичних моделей вузлів другого рівня. Третій рівень декомпозиції передбачає розбивку вузлів другого рівня на складові елементи з визначенням їхніх конструктивних характеристик, що використовується для проектування вузлів другого рівня. Визначено, що математичні моделі вузлів декомпозиції на другому рівні містять у собі рівняння трьох типів: рівняння першого типу, які дають взаємозв'язок між параметрами робочого процесу та конструктивними параметрами вузла; рівняння другого типу пов'язують конструктивні параметри з масогабаритними характеристиками, а рівняння третього типу пов'язують конструктивні параметри вузлів з їхніми економічними характеристиками. Найважливішим результатом досліджень є математична модель компресора у вигляді функції двох змінних із переходом до узагальненої математичної моделі компресора. Таким чином, використання математичних моделей компресора, розглянутих у статті, дає змогу розв'язати задачу автоматизованого проектування оптимізованих конструкцій компресорів і загалом холодильних машин, а також низки інших завдань синтезу й аналізу судових холодильних установок.

Ключові слова: модель, декомпозиція, суднова холодильна установка, компресор, контроль, параметри.

Постановка проблеми. Проблема математичного моделювання судових холодильних установок (СХУ) постала наприкінці ХХ століття, особливо у зв'язку з розвитком рибної промисловості. Збільшення виробництва мороженої рибопродукції вимагало невідкладного знаходження непростих рішень щодо оптимізації експлуатації СХУ. У свою чергу, це викликало необхідність проведення глибокої модернізації СХУ з метою поліпшення основних характеристик СХУ. І цей ланцюжок замкнувся на необхідності одержання точних закономірностей, що визначали всі параметри СХУ. Відсутність таких закономірностей вимагала розроблення математичних моделей холодильної машини, холодильної установки і низки технологічних процесів, що впливали на роботу холодильних установок різних типів.

Для забезпечення можливості створення математичних моделей СХУ необхідно виконати низку досліджень. Серед цих досліджень слід відзначити найбільш важливі проблеми, які потребують першочергового вирішення:

- 1) математичне моделювання процесів тепломасообміну під час заморожування риби;
- 2) створення фізичної та математичної моделей утворення снігової шуби на приладах охолодження зі зміною її характеристик у часі;
- 3) розроблення теорії тепло- і масообміну під час барботажу і кипіння холодоагенту в апаратах суднових холодильних установок;
- 4) математичне моделювання тепломасообміну в штабелі мороженої риби та процесів доморожування риби в завантаженому трюмі рефрижераторного судна;
- 5) математичне моделювання зміни якості охолодженої або мороженої рибопродукції залежно від навколишніх умов і роботи холодильної установки для різних видів риби;
- 6) математичне моделювання холодильних машин і установок, що дає змогу отримати характеристики з урахуванням усіх можливих чинників, що визначають роботу суднових холодильних машин і установок;
- 7) математичне моделювання зносу і надійності обладнання з визначенням раціональних періодів міжремонтних і регламентних робіт.

У роботі представлено пропозиції щодо декомпозиції суднової холодильної установки та запропоновано узагальнену математичну модель компресора зі складу суднової холодильної установки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженню та розвитку суднової холодильної техніки присвячено низку праць [1 - 10].

Так, у роботі [1] наведена математична модель холодильного компресора. Критерієм для оптимізаційної моделі в цій праці є вартість обладнання, яка в основному оцінюється і використовується судновласниками. Очевидно, що можна вибрати найдешевше обладнання з більш коротким терміном експлуатації, в той час як інший може вибрати найдорожче обладнання з низькими експлуатаційними витратами і тривалим терміном служби. Підхід, який використовується в цій роботі, полягає в мінімізації загальних витрат.

У роботі [2] розглянуто математичне моделювання процесів, що тривають у гвинтових компресорах. У статті представлено огляд прогресу таких методів, а також їх застосування в успішних конструкціях компресорів. Унаслідок їхнього впровадження навіть дрібні деталі тепер вважаються значущими в зусиллях із поліпшення продуктивності та зниження витрат. Незважаючи на це, все ще існують можливості для впровадження нових методів і процедур для поліпшення профілів ротора, оптимізації конструкції для кожного конкретного завдання та спеціалізованого проектування компресорів, усі з яких можуть призвести до поліпшення продукту та нових сфер застосування. Мета цієї статті – дати огляд діяльності з математичного моделювання процесу роботи гвинтового компресора за останні п'ять десятиліть.

У статті [3] виконано побудову та дослідження пускових характеристик електроприводу поршневого суднового компресора холодильної установки з використанням математичної моделі невірноваженого моменту навантаження. Залежність навантаження на валу електропривода поршневого компресора від кута повороту представлено у вигляді математичної моделі. Визначено, що при додаванні в модель змінного моменту інерції маховика, який створює момент інерції, пульсації швидкості обертання і струму на усталеному режимі зменшуються, а час пуску також стає меншим, що сприятливо позначається на роботі пристрою. Досліджено можливість встановлення маховика зі змінним моментом інерції на валу електроприводу поршневого компресора.

В роботі [4] досліджена динаміка кривошипного механізму та запропонована методика розрахунку моменту опору однопоршневого компресора суднової холодильної установки. Розроблена математична модель, що описує залежність моменту опору компресора від кута повороту вала приводного електродвигуна. Для компресора ХКВ-6 малої холодильної установки проведена верифікація результатів моделювання.

Але саме питання розроблення пропозицій щодо декомпозиції суднової холодильної установки та математичної моделі компресора у відповідному контексті у цих дослідженнях розглянуто не в повному обсязі.

Мета дослідження. Мета роботи полягає у розробленні пропозицій щодо декомпозиції суднової холодильної установки та розроблення математичної моделі компресора, що є основою для подальшої автоматизації відповідних процесів оцінки та контролю стану суднової холодильної установки в цілому.

Основні результати дослідження. В основу створення математичної моделі СХУ покладено принцип декомпозиції холодильної установки на основні вузли та елементи. Принципову схему СХУ з двоступеневою парокомпресійною холодильною машиною наведено на рис. 1.

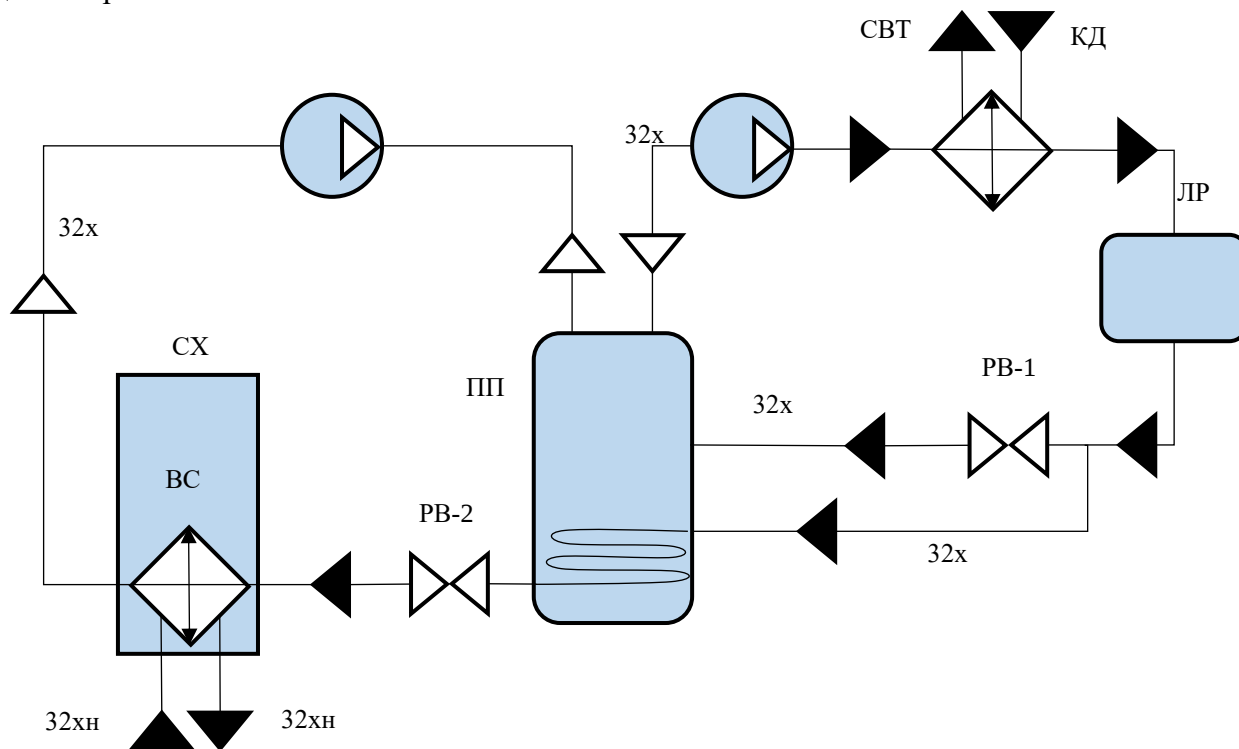


Рисунок 1 – Принципова схема суднових холодильних установок

ВС – випарна система; СХТ, СВТ – ступінь стиснення з використанням компресорів низького та високого тиску; КД – конденсатор; ЛР – лінійний ресивер; ПП – проміжний посуд; СХ – споживач холоду; РВ-1, РВ-2 – регулюючі ventилі; 32х – хладагент; 32хн – холодоносій

Для загальності розглядається складніший випадок двоступеневої холодильної машини, суміщеної зі споживачем холоду у вигляді морозильного комплексу (системи морозильних апаратів), усі інші випадки випливають з цього, як простіші та часткові.

Для розв'язання різних завдань, в загальному сенсі, декомпозиція може здійснюватися на різних рівнях (рис. 2).

Перший рівень декомпозиції передбачає розбивку СХУ на два основні вузли: генератор холоду (холодильна машина або система холодильних машин) і споживач холоду. Декомпозицію першого рівня використовують для вирішення завдань аналізу роботи СХУ під час спільної роботи певного генератора і споживача холоду.

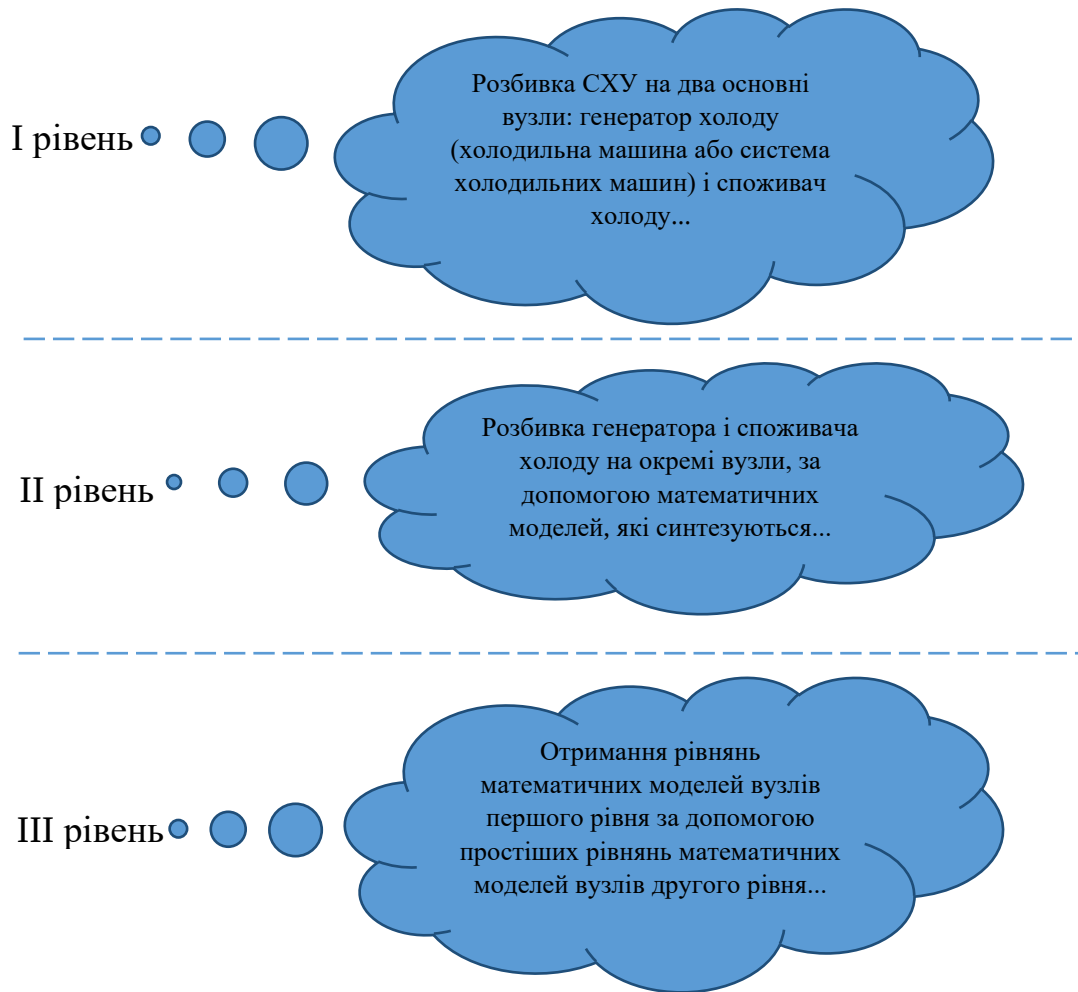


Рисунок 2 – Тривірнева декомпозиція суднової холодильної установки

Другий рівень декомпозиції передбачає розбивку генератора і споживача холоду на окремі вузли, за допомогою математичних моделей, які синтезуються. На цьому рівні генератор холоду розбивається, наприклад, на такі вузли (рис. 1): компресор (компресори СНТ і СВТ), конденсатор, лінійний ресивер, проміжну посудину, випарну систему (у частині, що обслуговує холодильну машину), споживач холоду в загальному разі розбивається на ізольований контур, охолоджувальну (випарну) систему (у частині, що обслуговує споживача холоду) та заморожувальний (охолоджувальний) продукт, а також механізми та допоміжні пристрої.

Декомпозиція другого рівня дає змогу полегшити отримання рівнянь математичних моделей вузлів першого рівня за допомогою простіших рівнянь математичних моделей вузлів другого рівня. При цьому істотно полегшується перевірка адекватності цих моделей на підставі даних випробувань окремих вузлів холодильної машини і споживача холоду.

Третій рівень декомпозиції передбачає розбивку вузлів другого рівня на складові елементи з визначенням їхніх конструктивних характеристик, що використовується для проектування вузлів другого рівня.

Математичні моделі вузлів декомпозиції на другому рівні містять у собі рівняння трьох типів: рівняння першого типу, які дають взаємозв'язок між параметрами робочого процесу та конструктивними параметрами вузла; рівняння другого типу пов'язують конструктивні параметри з масогабаритними характеристиками, а рівняння третього типу пов'язують конструктивні параметри вузлів з їхніми економічними характеристиками.

Математичну модель компресора пропонується розглядати у вигляді функції двох змінних:

$$Q_o = f(t_o, t_k), \quad (1)$$

де Q_o – значення холодопродуктивності, як основного ефекту компресора, що працює в системі холодильної машини;

t_o, t_k – параметри циклу робочого процесу компресора (температури кипіння і конденсації).

До теперішнього часу на суднах експлуатується велика кількість одно- і двоступеневих поршневих компресорів, що вирізняються різними конструктивними особливостями циліндро-поршневої та клапанної груп і режимами роботи.

Рівняння узагальненої математичної моделі компресора може бути представлено в такому вигляді:

$$\frac{Q_o}{V_n} = [\exp(a_1 + b_1 t_1)](t_o + 90)^{(c_1 + d_1 t_1)},$$

$$\frac{N_e}{V_n} = (b_2 + a_2 t_k)t_o + (d_2 + c_2 t_k), \quad (2)$$

де V_n – теоретична об'ємна продуктивність, м³;

N_e – ефективна потужність, кВт.

Розрахунок математичних моделей для наявних компресорів показав їхню хорошу збіжність з експериментальними даними в межах точності експерименту. Для гвинтових маслозаповнених компресорів, що набули широкого поширення у суднових холодильних установках, внутрішні процеси у компресорі наразі слабо вивчені, особливо для роботи на нерозрахункових режимах і в режимах часткової холодопродуктивності. Наявні експериментальні характеристики численних родин гвинтових компресорів дають змогу отримати апроксимаційні узагальнені рівняння математичних моделей саме у формі рівнянь (2).

Висновки. З метою створення комплексної математичної моделі суднових холодильних установок у роботі запропоновано принцип трирівневої декомпозиції холодильної установки на основні вузли та елементи. Як приклад розглянуто математичну модель компресора у вигляді функції двох змінних із переходом до узагальненої математичної моделі компресора (під час розгляду одно- і двоступеневих поршневих компресорів). Використання математичних моделей компресора, розглянутих у статті, дає змогу розв'язати задачу автоматизованого проектування оптимізованих конструкцій компресорів і загалом холодильних машин, а також низки інших завдань синтезу й аналізу суднових холодильних установок.

ЛІТЕРАТУРА

1. Darko Glujić, Predrag Kralj, Dragan Martinović. A Simple Mathematical Model for Refrigerating Compressor Optimization. *Scientific Journal of Maritime Research*. 2018. № 32. URL: <https://hrcaak.srce.hr/file/296886> (дата звернення: 17.12.2022).
2. Stosic Nikola, Smith Ian, Kovacevic Ahmed, Mujic, Elvedin. Review of Mathematical Models in Performance Calculation of Screw Compressors. *International Journal of Fluid Machinery and Systems*. 2011. № 4. DOI: 10.5293/IJFMS.2011.4.2.271.
3. Chernyi Sergei, Aleksei Vyngra, Pavel Erofeev, Bogdan Novak. Analysis of the Starting Characteristics of the Complex Maritime Systems. *Procedia Computer Science*. 2020. № 167. 2164-2171. DOI : 10.1016/j.procs.2020.03.266.

4. Simulation of the resistance moment of single-piston compressor of ship refrigeration unit / Bukaros A.Iu. et al. *Technology audit and production reserves*. 2015. №4. P. 46-51.
5. Ocheretjanyj Yu.A., Ocheretjanyj Yu.A., Zhivitsa V.I., Belyj V.N., Onishhenko O. A., Vajnfeld E.I. Konceptija sistemy kompjuternogo monitoringa i tehničkoj diagnostiki refrizheratornoj holodilnoj ustanovki sudna. *Sudovye jenergeticheskie ustanovki*. 2011. № 28. P. 5–11.
6. Kumar M., Kar I.N. Fault Detection and Diagnosis of Air-Conditioning Systems using Residuals. *10th IFAC International Symposium on Dynamics and Control of Process Systems*. Mumbai, India. 2013. P. 607–612. doi:10.3182/20131218-3-in-2045.00113
7. Tassou S.A., Grace I.N. Fault diagnosis and refrigerant leak detection in vapour compression refrigerant systems. *International Journal of Refrigeration*. 2005. Vol. 28. № 5. P. 680–688. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2004.12.007
8. Snihovskij E.L., Snihovskij E.L., Klepanda A.S., Petuhov I.I., Sherstjuk A.V. K voprosu formirovanija algoritma diagnostirovanija tehničeskogo sostojanija parokompressionnyh holodil'nyh mashin. *Vestnik NTU "KhPi"*. 2014. № 11. P. 154–159.
9. Voropaj P.I., Shlenov A.A. Povyshenie nadezhnosti i jekonomičnosti porshnevnyh kompressorov. M.: Nedra, 1980. 359 p.
10. Подмазко О.С., Піщанська Н.О. Суднова холодильна техніка. Конспект лекцій. Одеса: ОНАХТ, 2020. 59с. URL: <https://drive.google.com/file/d/1O2GiWOWfmJdhCGCuCnrPWa9UJHyjb5wU/view?usp=sharing> (дата звернення: 11.12.2022)

REFERENCES

1. Darko Glujić, Predrag Kralj & Dragan Martinović. (2018). A Simple Mathematical Model for Refrigerating Compressor Optimization. *Scientific Journal of Maritime Research*. 32. Retrieved from <https://hrcak.srce.hr/file/296886>.
2. Stosic, Nikola & Smith, Ian & Kovacevic, Ahmed & Mujic, Elvedin. (2011). Review of Mathematical Models in Performance Calculation of Screw Compressors. *International Journal of Fluid Machinery and Systems* 4. 10.5293/IJFMS.2011.4.2.271.
3. Chernyi Sergei, Aleksei Vyngra, Pavel Erofeev & Bogdan Novak. (2020). Analysis of the Starting Characteristics of the Complex Maritime Systems. *Procedia Computer Science*. 167. 2164-2171. 10.1016/j.procs.2020.03.266.
4. (2015). Simulation of the resistance moment of single-piston compressor of ship refrigeration unit / Bukaros, A.Iu. et al. *Technology audit and production reserves*, 4, 46-51.
5. Ocheretjanyj, Yu.A., Ocheretjanyj, Yu.A., Zhivitsa, V.I., Belyj, V.N., Onishhenko, O. A. & Vajnfeld, E.I. (2011). Konceptija sistemy kompjuternogo monitoringa i tehničkoj diagnostiki refrizheratornoj holodilnoj ustanovki sudna [The concept of a system for computer monitoring and technical diagnostics of a ship's refrigeration refrigeration plant]. *Sudovye jenergeticheskie ustanovki*, 28, 5–11.
6. Kumar, M. & Kar, I.N. (2013). Fault Detection and Diagnosis of Air-Conditioning Systems using Residuals. *10th IFAC International Symposium on Dynamics and Control of Process Systems*. Mumbai, India. 607–612. 10.3182/20131218-3-in-2045.00113
7. Tassou, S.A. & Grace, I.N. (2005). Fault diagnosis and refrigerant leak detection in vapour compression refrigerant systems. *International Journal of Refrigeration*, Vol. 28, 5, 680–688. 10.1016/j.ijrefrig.2004.12.007
8. Snihovskij, E.L., Snihovskij, E.L., Klepanda, A.S., Petuhov, I.I. & Sherstjuk, A.V. (2014). K voprosu formirovanija algoritma diagnostirovanija tehničeskogo sostojanija parokompressionnyh holodil'nyh mashin. *Vestnik NTU "KhPi"*, 11, 154–159.
9. Voropaj, P.I. & Shlenov, A.A. (1980). Povyshenie nadezhnosti i jekonomičnosti porshnevnyh kompressorov. *Nedra*.

10. Podmazko, O.S. & Pishchanska, N.O. (2020). *Sudnova kholodylna tekhnika. Konspekt lektsii* [Ship refrigeration equipment. Lecture notes]. ONAKhT. Retrieved from <https://drive.google.com/file/d/1O2GiWOWfmJdhCGCuCnrPWa9UJHyjb5wU/view?usp=sharing>

Daki O.A, Yakusevych Yu.H., Tryshyn V.V., Dorofieieva Z.Ia.

DEVELOPMENT OF PROPOSALS FOR THE DECOMPOSITION OF THE SHIP REFRIGERATION UNIT AND THE COMPRESSOR MATHEMATICAL MODEL

The aim of the work is to develop proposals for the decomposition of the ship's refrigeration unit and to develop a mathematical model of the compressor, which is the basis for further automation of the relevant processes of assessment and control of the ship's refrigeration unit as a whole. This goal is achieved by analysing the schematic diagram of a ship refrigeration unit with a two-stage vapor-compression refrigeration machine. For the sake of generality, we consider the most complex case of a two-stage refrigeration machine combined with a cold consumer in the form of a freezer complex (system of freezers), and all other cases follow from this as simpler and more partial. At the same time, to solve various problems, in a general sense, a decomposition at three levels is proposed. The first level involves the separation of the ship's refrigeration unit into two main components: a cold generator (refrigeration machine) and a cold consumer. The second level involves splitting the generator and the cold consumer into separate nodes using mathematical models that are synthesized. The second-level breakdown makes it easier to obtain the equations of the mathematical models of the first-level nodes using the simpler equations of the mathematical models of the second-level nodes. The third level of decomposition involves the breakdown of second-level nodes into their constituent elements with the definition of their structural characteristics, which is used in the design of second-level nodes. It is determined that the mathematical models of the decomposition units at the second level contain equations of three types: equations of the first type, which give the relationship between the parameters of the workflow and the design parameters of the unit; equations of the second type relate the design parameters to the weight and size characteristics, and equations of the third type relate the design parameters of the units to their economic characteristics. The most important result of the research is a mathematical model of the compressor in the form of a function of two variables with a transition to a generalized mathematical model of the compressor. Thus, the use of the mathematical models of the compressor discussed in the article makes it possible to solve the problem of computer-aided design of optimized compressor designs and refrigeration machines in general, as well as several other problems of synthesis and analysis of ship refrigeration units.

Keywords: model, decomposition, ship refrigeration unit, compressor, control, parameters