

УДК 681.5.03

DOI: 10.31891/2219-9365-2020-67-1-2

ВАСИЛЬСВ М. В.

Одеський національний політехнічний університет

## РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ КОМПРЕСОРНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ ЗРІДЖЕННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ

*Перш за все, така тема як компресори для зрідження природного газу на превеликий жаль не дуже добре вивчена. І тому, в даній публікації буде представлено детальне дослідження даного об'єкта. Насамперед, перш за все буде розглянуто сам об'єкт, з чого він складається, які його властивості, як в ньому проходять процеси зрідження природного газу. Так спочатку треба повністю вивчити сам об'єкт, а вже потім переходити до побудови його математичної моделі яку в майбутньому можна застосувати для більш детального аналізу, спочатку теоретично а вже потім і в практичних цілях. Це дозволить досягти великих результатів при побудові автоматичної системи керування компресора для зрідження природного газу. Отже буде спочатку вивчений вже сам об'єкт а вже потім на основі отриманих знань ми будемо будувати математичну модель яка в майбутньому знадобиться для розробки автоматичної системи керування. В даній публікації розглядаються загальні положення як про самий об'єкт так і про аспекти керування ним. Перш за все звертається увага на побудову математичної моделі, адже саме вона і є основною метою даного дослідження. Були розроблені параметричні схеми, які вказують на те, які вхідні параметри є у компресорної установки, яке збурення наноситься та які параметри є на виході з цієї компресорної установки. Детально розглянута математична модель в основу якої і була закладена параметрична схема та виведено загальні положення по будові даного об'єкта в іншому середовищі, де можливо більш детально вивчити всі переваги і недоліки компресорної установки для зрідження природного газу. Викладені всі основні формули які були описані для даного об'єкта і які були використані для будівництва математичної моделі. Була побудована математична модель яка відповідає окремо виділеній параметричній схемі і яка повністю відповідає даній параметричній схемі. а основі отриманих математичних формул була створена математична модель яка була перенесена в спеціальне середовище, де вже більш детально можливо дослідити в майбутньому різні схеми регулювання даним об'єктом.*

*Ключові слова: компресор, зрідження, природний газ, математична модель, зрідження.*

M. VASYLIEV

Odessa National Polytechnic University

## DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL OF A COMPRESSOR UNIT FOR NATURAL GAS LIAUEFACTION

*First of all, such a topic as compressors for liquefaction of natural gas is unfortunately not very well studied. Therefore, this publication will present a detailed study of this object. First of all, the object itself will be considered, what it consists of, what its properties are, how natural gas liquefaction processes take place in it. So first you need to fully study the object itself, and only then proceed to build its mathematical model, which in the future can be used for more detailed analysis, first theoretically and then for practical purposes. This will achieve great results in the construction of an automatic control system for the compressor for liquefaction of natural gas. So, first the object itself will be studied, and only then, based on the acquired knowledge, we will build a mathematical model that will be needed in the future to develop an automatic control system. Of course, if you do not fully study all the properties of the object, such as the physical processes that take place there and the properties of the compressor. And having already put together all the available information, we can have a complete picture of this object. And from this information that has been collected, we can finally move on to the development of a more detailed mathematical model, which will be, albeit simplified, but still close to reality. Only then, already having this mathematical model, you can move on to a more detailed study in theory. And after conducting theoretical research, it is possible to check all the results of the study on a mathematical model, which will help to understand whether they are effective. Because it is more profitable to check theoretical information on a mathematical model than to do it on a real object. This can be costly, and in the case of an installation such as a natural gas liquefaction compressor, it is very expensive. And therefore this mathematical model will be appropriate. This model can be used in a more detailed study of this object because at the moment there is no holistic picture for the dagono object. It will also be possible to apply this model to find the necessary laws of regulation which will help to increase productivity of the compressor installation for liquefaction of natural gas. And this model will help to solve this question and to establish full-fledged work on studying of the given compressor installation.*

*Keywords: compressor, liquefaction, natural gas, mathematical model, liquefaction.*

**Постановка проблеми.** На разі проблематика постає наступна: наразі у відкритих джерелах дуже мало інформації на дану тематику, але і сам об'єкт ще не до кінця вивчений, адже в наявності не було виявлено повноцінної математичної моделі компресора для зрідження природного газу. Саме тому для більш детального вивчення необхідно розробити повноцінну математичну модель. Це дозволить насамперед повноцінно дослідити даний об'єкт. Також це дозволить знайти необхідні закони регулювання які допоможуть підвищити продуктивність компресорної установки. Наразі проблематично знайти готову математичну модель і тому дана робота дозволить вирішити дану проблему та отримати в наявність готову модель яку можливо все застосовувати для більш детального вивчення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Вивчаючи останні публікації у відкритих джерелах інформації, було виявлено, що саме повноцінної інформації, де би була повністю описана а потім і

представлена математична модель компресорної установки по розрідженню природного газу. Лише окремі математичні моделі різних деталей даного об'єкта, але щоби все було зібрано в одну математичну модель, такого не має в наявності у відкритих джерелах. Були вивчені публікації наступних авторів: Шаміна В.А., Галеркін Ю.Б. та ін.

**Формулювання цілей статті.** Розробити повноцінну модель компресорної установки для зрідження природного газу.

**Виклад основного матеріалу.** Спочатку треба все таки знати, а навіщо взагалі нам такий об'єкт як компресорна установка для зрідження природного газу. На даний момент, природний газ є найчистішим і одним з найдешевших органічних видів палива. Основною проблемою природного газу є транспортування на велику відстань. Рішенням цієї проблеми є скраплення газу за допомогою криогенних установок. В 2018 р. імпорт зрідженого природного газу (ЗПГ) склав 600 млн. тон по всьому світу, проте в найближчі 20 років імпорт ЗПГ має зрости в 2–3 рази що обумовлює необхідність розробки більш продуктивних і економічних шляхів виробництва ЗПГ. Особливе значення скраплення метану набуває в умовах дефіциту транзиту традиційним методом природного газу. Створення потужностей по виробництву рідкого метану – один з головних шляхів відходу від газової залежності будь-якої держави або підприємства. Головна перевага скраплення метану – зменшення обсягів кожного кубометра в 600 разів при атмосферному тиску і температурі  $-161,45\text{ }^{\circ}\text{C}$ . В зв'язку з небезпечністю виробництва та великими енергетичними витратами, створення такого виробництва неможливе без системи автоматизації.

Тепер у нас з'являється чітке розуміння того, навіщо взагалі потрібен даний об'єкт і чому важливо максимального його дослідити, адже без цього буде неможливо створити ефективну систему автоматизації для цього об'єкта.

Ще треба коротко описати компресорну установку для зрідження природного газу. Відцентрові компресори представляють собою обладнання, що входить до групи компресорів динамічного типу з радіальною конструкцією. Головною перевагою установок даного типу є їх висока продуктивність, яка в рази перевищує показники компресорів інших видів. Завдяки цьому, відцентрові компресори, структура яких дозволяє використовувати їх при інтенсивній експлуатації, широко використовуються в промислових масштабах.

Компресорні установки, що відносяться до групи обладнання відцентрового типу, являють собою широке розмаїття агрегатів, різних за своїми характеристиками і технічним оснащенням. Але при цьому, відцентровим компресорів характерно загальне стандартне оснащення. Так, обладнання даного типу включає в себе такі основні елементи, як:

- корпус обладнання;
- патрубки – вхідний і вихідний пристрої;
- робочі колеса;
- дифузор;
- привід – може бути різних типів (дизельний, електричний та інші).

Основними перевагами проточних частин відцентрового компресора з осерадіальними робочими колесами є: підвищена витрата, яка виражається в коефіцієнті витрати та підвищений напір (коефіцієнт питомої роботи).

Завдяки цим якостям відцентрові ступені з осерадіальними робочими колесам в порівнянні зі звичайними сходами з циліндричними робочими колесами при одних і тих же початкових умовах відрізняються підвищеною швидкохідністю і суттєво зниженими габаритними розмірами.

В компресорній установці використовується холодоагент змішаного типу, за допомогою якого здійснюється охолодження природного газу до необхідної температури зрідження.

Охолодження здійснюється за рахунок випаровування холодоагенту високого тиску у теплообмінник через який проходить газ. Далі холодоагент сепарується і проходить через компресор, який підвищує його тиск до заданого (5,1 МПа). Під час випаровування, холодоагент поглинає внутрішню енергію газу тим самим знижуючи температуру газу до температури конденсації ( $-163\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Детально вивчивши, що являє собою компресор для зрідження природного газу та повністю розглянувши принцип дії, час все таки перейти до створення математичної моделі об'єкта. А саму математичну модель можна скласти якщо є повне розуміння про даний об'єкт та знати як протікає технологічний процес по розрідженню природного газу в компресорі. Адже без цієї інформації не буде можливості скласти повноцінну математичну модель компресора, так як не було б повної картини яка б показала як проходить процес зрідження та як це робить компресор. Можливо було б розробити математичну модель, вивчивши даний об'єкт хоча б на 50 %, але здається що така математична модель була би не дуже ефективною так як не до кінця були би вивчені всі можливості об'єкта та його властивості. Хоч математична модель і являє собою спрощену модель реального об'єкта, але все таки треба знати майже все про компресор, щоби модель вийшла більш достовірною. І лише завдяки детальному вивченню, буде можливо розробити повноцінну математичну модель, яка дозволить в майбутньому більш якісно проводити дослідження для цього об'єкта по створенню автоматичної системи керування.

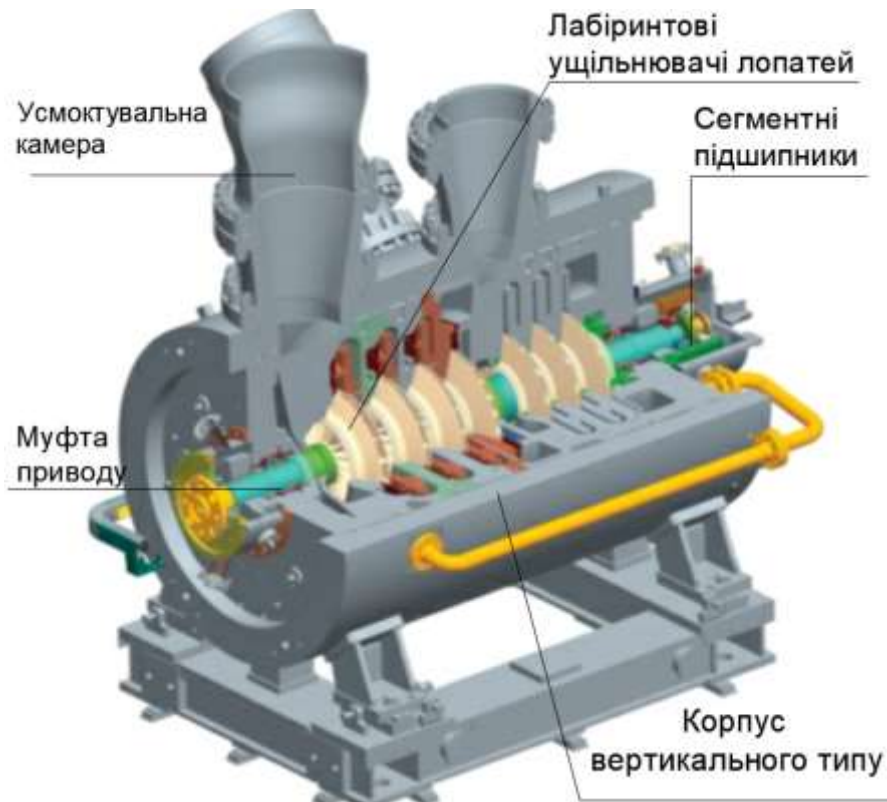


Рис. 1. Модель відцентрованого компресора K905-71-1C

Розглянемо математичну модель компресорної установки по контуру холодоагенту. Отже, стабілізувати на підставі уставки будемо – тиск холодоагенту. Параметрична схема компресора приведена нижче. З даної параметричної схеми зрозуміло, що входним впливом на компресорну установку для зрідження природного газу є частота обертання. З цієї самої схеми і випливає наступне, а саме що збуренням для даного об'єкта буде випаровування холодоагенту. Маючи в наявності як входні параметри так і збурюючий вплив, на виході ми будемо мати тиск холодоагенту. Треба насамперед виділити дану параметричну схему, адже саме вона дає зрозуміти, які взагалі параметри будуть використовуватись для будування математичної моделі компресора для зрідження природного газу. Дана схема дає більш конкретно зрозуміти, з якими саме параметрами буде проводитись робота для розрахунку майбутньої математичної моделі яка в подальшому буде використовуватись і для більш якісного дослідження даного об'єкта. Також схема дає зрозуміти основні параметри, які у нас є на самому початку, який параметр буде являти собою збурення та який параметр у нас буде на виході. Ця схема і виступить у подальшому орієнтиром для побудови математичної моделі.



Рис. 2. Параметрична схема компресорної установки

Передавальна функція асинхронного двигуна в спрощеному варіанті, при  $(\gamma/\nu)^2 = 1$  [1, с. 296].  
Перша частина передавальної функції асинхронного двигуна виглядає наступним чином:

$$\frac{\Delta M(p)}{\Delta w_1(p) - \Delta w(p)} = \frac{1}{T_{\text{эл}}p + 1} = \frac{750}{1,033p + 1}$$

Друга частина передавальної функції асинхронного двигуна виглядає так:

$$\frac{\Delta M(p)}{\Delta M(p) - \Delta M_{\text{г}}(p)} = \frac{1}{T_{\text{м}}p} = \frac{1}{0,0145p}$$

де  $T_{\text{м}}$ ,  $T_{\text{ел}}$  – механічна і електромагнітна постійна часу двигуна, відповідно.

Компресорна машина являє собою відцентровий агрегат для виробництва стисненого холодоагенту і діє аналогічно відцентрового насоса.

Робота відцентрових сил на шляху від входу в між лопатеві канали до виходу з них призводить до збільшення енергії потоку. Найпростіша теорія компресорних машин, що володіє прийнятною точністю, ґрунтується на термодинаміці ідеального газу.

В нашому випадку використовується закон Бойля–Маріотта, тобто обсяг газу пропорційний тиску при постійній температурі, використовуваний закон виражає ізотермічний процес:  $PV = \text{const}$ ,  $T = \text{const}$ .

При ізотермічному стисканні витрачається найменша кількість енергії в компресорному процесі. Маємо:  $PV = P_1V_1 = P_2V_2$ .

Для реалізації відцентрового компресора в одиночних трубопроводах використовується аперіодична ланка другого порядку, проте в більшості випадків приймається до уваги ще й запізнювання, але так як труба не має великої довжини і розгалужень, в даній системі немає сенсу ставити запізнювання. Таким чином, передатна функція компресора виглядає наступним чином:

$$W_{\text{com}} = \frac{k_c}{(T_1p + 1)(T_2p + 1)}$$

Розраховану математичну модель необхідно реалізувати в середовищі Simulink.

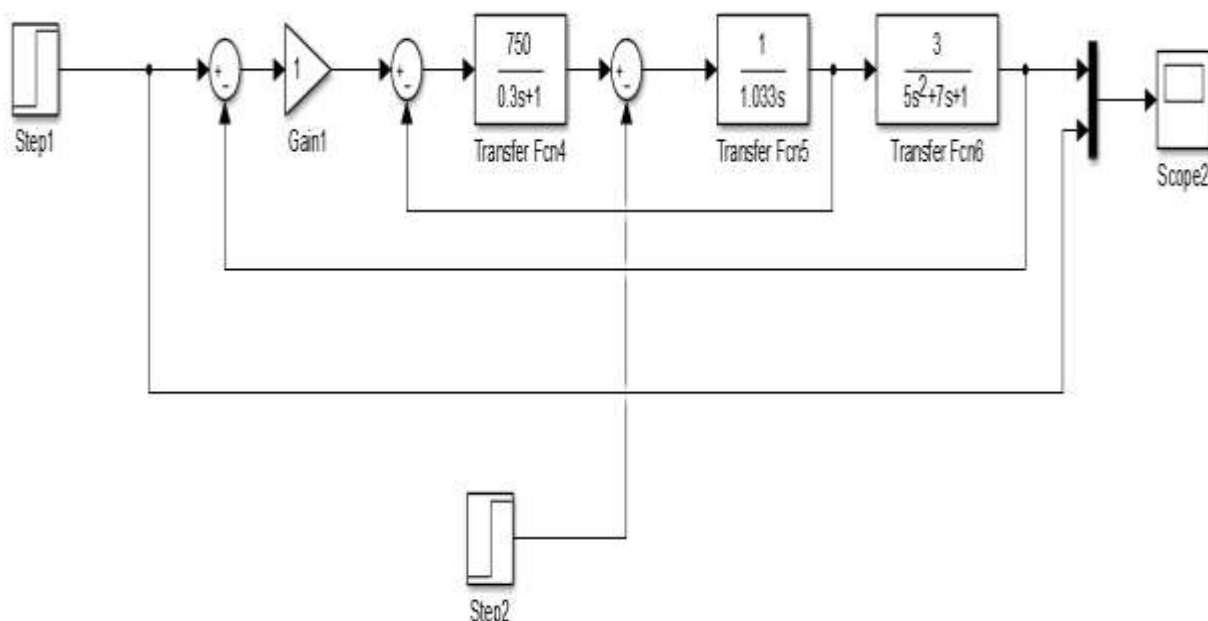


Рис. 3. Математична модель компресорної установки в середовищі Simulink

**Висновки.** У матеріалі більш детально описана математична модель компресора для зрідження природного газу. Всі знання про властивості даного об'єкта були зібрані в одну математичну модель і в результаті була отримана загальна математична модель, яка також була реалізована в середовищі Simulink. Ця модель дозволить в майбутньому більш краще вивчити властивості об'єкта в плані регулювання та дозволить оперативно отримати дані для впровадження системи автоматичного керування.

### **References**

1. Shamina V.A. Avtomatyzatsiia tekhnolohichnykh ob'ektiv ta protsesiv. Poshuk molodykh. Zbirnyk naukovykh prats KhII naukovo-tekhnichnoi konferentsii aspirantiv ta studentiv v m. Donetsku 17 – 20 kvitnia 2012 r. Donetsk: DonNTU, 2012. s.305
2. Halerkyn Yu.B., Kozachenko L. Y. Turbokompressory: Uchebnoe posobyе. Sankt-Peterburh: yzdatelstvo Polytekhnicheskoho unyversyteta, 2008, 374 s.
3. Cherkasskyi V.M. Nasosy, ventilyatory, kompressory: Uchebnoe posobyе dlia vuzov. Moskva: Enerhoatomyzdat, 1984, 316 s.