

УДК 681.51:621.316.79

О.А. Лепський О. А., О.А. Онищенко
ОНМА

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ СУДНОВИХ ХОЛОДИЛЬНИХ УСТАНОВОК

У контур охолодження суднових холодильних установок завжди вбудовують регулятори тиску конденсації. Основна функція, виконувана таким регулятором - стабілізація заданого тиску конденсації P_k холодоагенту (ХА) при змінюваних збурюваннях: температурі й витраті охолоджувальної води (В).

Регулятори тиску існують різних типів. Найчастіше, це керовані насоси охолоджуваної води, або керовані окремим виконавчим (регульовальним) органом поворотні заслінки. Типова функціональна й структурна схеми контуру регулювання тиску (температури) конденсації наведені на рис. 1, а, б.

Однак при способі регулювання за схемою, показаною на рис. 1, є істотний недолік, який полягає у наступному. Відомо, що зменшенню тиску конденсації P_k холодоагенту відповідає зменшення споживаною компресором холодильної установки електричної енергії. За різними літературними джерелами [1-3], зменшення температури конденсації (або тиску конденсації) ХА на 1°C приводить до зменшення витрат електричної енергії від 1,5 % до 4 % при одночасному збільшенні холодопродуктивності Q_0 . Ці позитивні властивості пояснюють зменшенням навантаження на компресор, який подає перегріті пари ХА у конденсатор. Очевидно, що зменшення значення тиску конденсації може бути викликано збільшенням витрати охолодної води й (або) зменшенням її температури.

У системі регулювання, наведеної на рис. 1, а, при зменшенні витрати й (або) збільшенні температури води тиск конденсації зростає. Регулятор відкриває регульовальний орган (РО) на більший кут, тим самим збільшуючи витрату охолодної води. При цьому зросло раніше значення тиску конденсації P_k холодоагенту зменшується й стабілізується на рівні заданого тиску $P_{кз}$ - епюра на рис. 1, в. Аналогічно описаному буде протікати динамічний процес й при збільшенні витрати й (або) зменшенні температури охолодної води (рис. 1, г).

У останньому випадку тиск (температура) конденсації змог би бути зменшеним за рахунок існування надлишкової енергії води до рівня $P'_{кз}$, але регулятор стабілізує тиск P_k на заздалегідь фіксовано-

му заданому рівні $P_{кз}$ і усуває тим самим, з енергетичної точки зору позитивну дію зовнішніх збурювань.

Мета даної статті - представити більш енергетично ефективні, економічні способи регулювання тиску конденсації у судових холодильних установках, обладнаних конденсаторами з водяним охолодженням.

Перший спосіб дозволяє за рахунок уведення додаткових зворотних зв'язків за витратою G й температурою t охолодної води зменшувати тиск конденсації відповідно до змін збурювань - збільшення витрати G (або) зменшення температури води. Структурна схема такої системи регулювання тиску конденсації з додатковими зворотними зв'язками наведена на рис. 2.

Як видно з рисунку, у систему, що складається із контуру холодної води (об'єкта регулювання), регулятора й датчика негативного зворотного зв'язку за тиском з передатним коефіцієнтом K_{oc} , додатково підключені до задавального входу регулятора (окрім сигналів завдання U_3 і головного зворотного зв'язку за тиском (температурою) U_{ocP}) ще два зворотних зв'язки. Перший - за витратою води з датчиком витрати BG . Другий зв'язок - за температурою води з датчиком температури BT . Сигнали з датчиків симетруються по нульовому рівні вихідної напруги у номінальному режимі роботи холодильної установки за допомогою елементів порівняння 2 і 3 й напруг симетрування U_{cG} і U_{ct} . Тобто, у номінальному режимі роботи холодильної установки вихідні сигнали $U_1 = 0$ і $U_2 = 0$. Вихідні сигнали елементів порівняння U_1 і U_2 надходять до нелінійних блоків $НБ1$ і $НБ2$, з яких знімаються сигнали зворотних зв'язків U_{ocG} і U_{oct} .

Результуючий сигнал δ надходить на вхід регулятора, а його значення визначається алгебраїчною сумою сигналів завдання й зворотних зв'язків:

$$\delta = U_3 - U_{ocP} - U_{ocG} + U_{oct}$$

Із цього вираження видно, що помилка регулювання δ , а отже й задане значення тиску конденсації $P_{кзад}$, залежать не тільки від напруги завдання U_3 на вході регулятора і у процесі роботи може змінюватись.

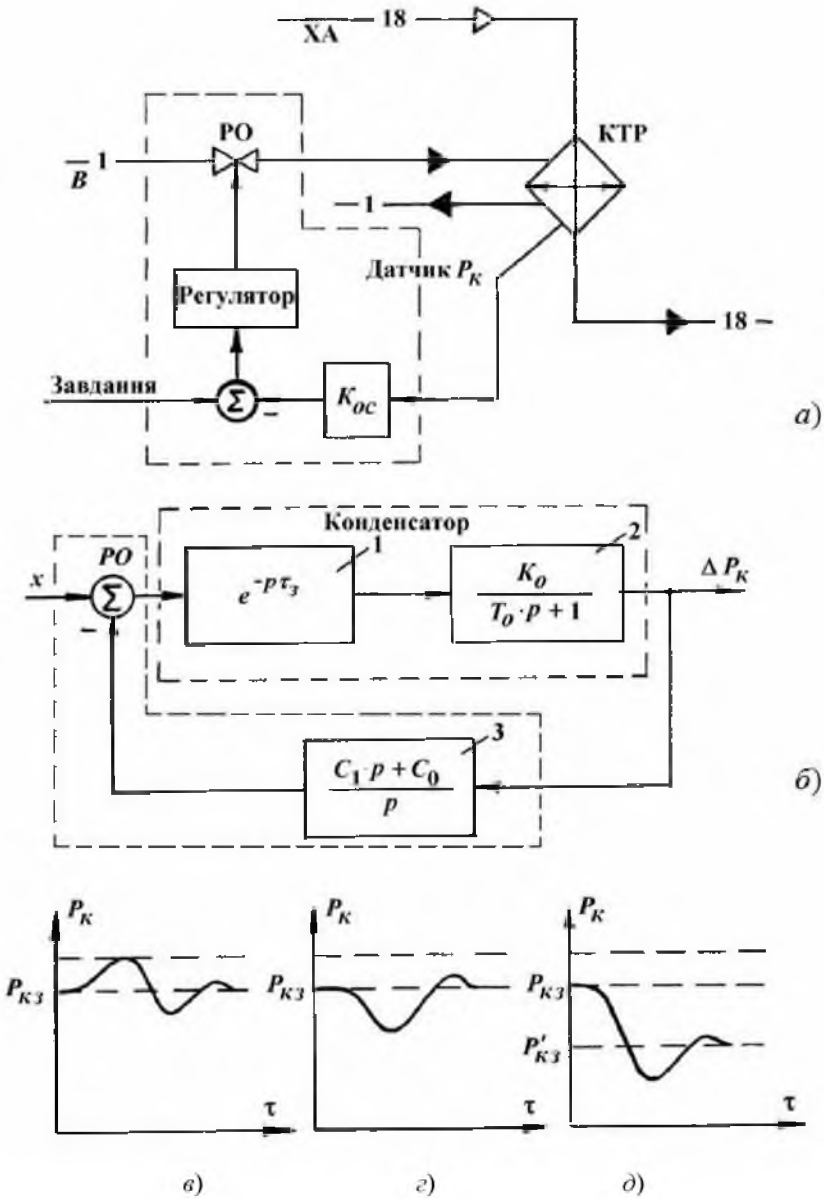


Рис.1 Функціональна (а) й структурна (б) схеми системи керування тиску конденсації та процеси при регулюванні тиску конденсації (в, з, д)

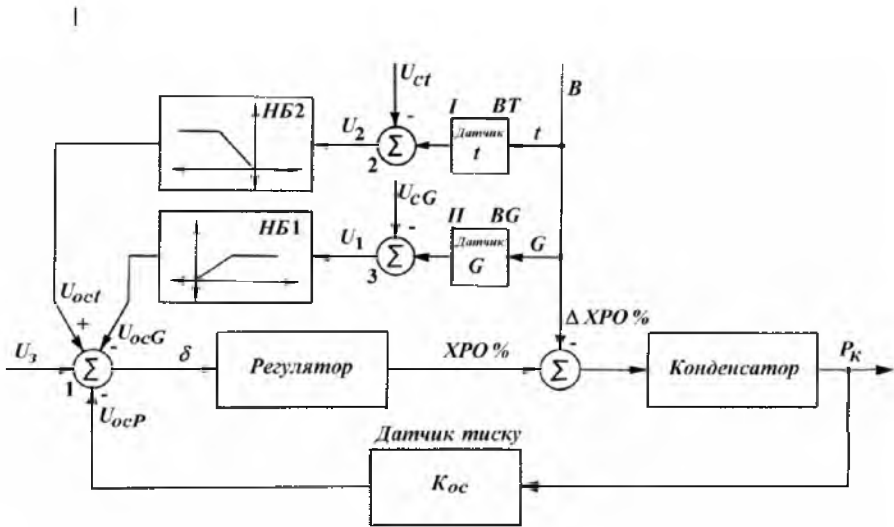


Рис.2 Структурна схема (система №1) системи регулювання тиску конденсації с датчиками витрати ВG й температури ВТ охолоджувальної води.

Як видно з рисунка, дуже важливіме є те, щоб у ході настроювання системи, регулюванням напруг симетрування U_{cG} , U_{cT} та залежностей нелінійних блоків $НБ1$ і $НБ2$ отримати такий режим, щоб при номінальних витраті й температурі води сигнали зворотних зв'язків U_{ocG} і U_{ocT} рівнялися нулю. При відхиленні від номінального значення витрати й (або) температури охолодної води нелінійні блоки $НБ1$ і $НБ2$ вступають у дію.

Розглянемо роботу системи більш докладно, наприклад, при змінах витрати води.

Нехай тиск конденсації P_k мав постійне, незмінне, значення на заданому рівні $P_{кзад}$. У випадку зменшення витрати води щодо номінального значення ($G_w < G_{wном}$) напруга U_{ocG} залишиться рівною нулю, що обумовлено тим, що $U1 < 0$, а також формою нелінійної залежності блоку $НБ1$. У результаті процес регулювання тиску конденсації буде здійснюватися аналогічно процесам, що проходять у наведених на рис. 1, а, б системі. Але при збільшенні витрати води ($G_w > G_{wном}$), напруга $U1$ стане більше нуля, а сигнал U_{ocG} почне відніматися із задавального U_z , зменшуючи тим самим величину значення δ , а отже й статичний тиск конденсації холодоагенту (див. рис. 1, д). Аналогічно описаному, процес регулювання тиску конденсації буде проходити й по каналу температури води.

Знак "плюс" на вході суматора 1 означає збільшення результуючого сигналу δ , а отже й витрати холодної води при збільшенні її температури.

Ділянки "обмеження" нелінійних характеристик блоків *НБ1* і *НБ2* уведені з метою обмеження мінімального значення тиску конденсації при значних зниженнях температури або різкому збільшенні витрати охолодної води.

Фізична реалізація запропонованої системи очевидна. У якості датчиків температури й витрати води використовуються стандартні вимірювальні прилади з аналоговими електричними сигналами на вході. Джерела напруг симетрування - типові блоки живлення постійного струму. Нелійними блоками з елементами порівняння можуть бути операційні підсилювачі з відповідною нелінійною корекцією. Для сучасних холодильних установок припустима також й програмна реалізація системи автоматизації, у тому числі й нелінійних залежностей за допомогою програмованих контролерів.

Другий спосіб регулювання тиску конденсації припускає відключення ланцюга зворотного зв'язку за тиском конденсації P_k . При такому включенні регулятор буде реагувати лише на відхилення P_k убік більший чим $P_{кзад}$, тобто на позитивні збурювання. Якщо P_k буде менше $P_{кзад}$, то регулятор ланцюг зворотного зв'язку розриває. Пропонована схема регулювання (рис. 3, *а*) у порівнянні з відомою (див. рис. 1, *а*, *б*) відрізняється додатковим логічним блоком і перемикачем *S*. Останній може перебувати у положеннях: "1" - зворотний зв'язок системи замкнутий і "2" - зворотний зв'язок системи розімкнутий.

Положення перемикача у будь-який момент часу залежить від вихідного сигналу *U* логічного блоку. Рівень сигналу визначається значенням P_k і може приймати одне із двох значень - логічного нуля або логічної одиниці.

Закон функціонування логічного блоку:

$$U = 1, \text{ при } P_k > P_{кзад}$$

$$U = 0, \text{ при } P_k < P_{кзад}$$

Уставка спрацьовування $U_{зад}$ логічного блоку регулюється у процесі настроювання системи й змінює рівні спрацьовування ключа *S*.

Найбільш ефективна робота запропонованої системи у таких випадках, коли холодильна установка працює у режимах суттєвих відхилень, що значно відрізняються від розрахункових режимів. Це положення ілюструється графіками динамічних процесів регулювання

тиску конденсації (рис. 3, б), побудованих за допомогою моделювання у середовищі *Matlab*. Крива 1 - для системи згідно рис. 3, б. Крива 2 - для системи згідно рис. 3, а.

Кожухотрубний конденсатор суднової холодильної установки риболовецького траулера моделювався у вигляді аперіодичної ланки із звеном запізнювання $W_o(p) = \frac{K_o}{T_o p + 1} \cdot e^{-p\tau_3}$, а регулятор здійснював пропорційно-інтегральний (ПІ) закон регулювання

$$W_p(p) = \frac{C_1 \cdot p + C_0}{p} \quad [3, 4].$$

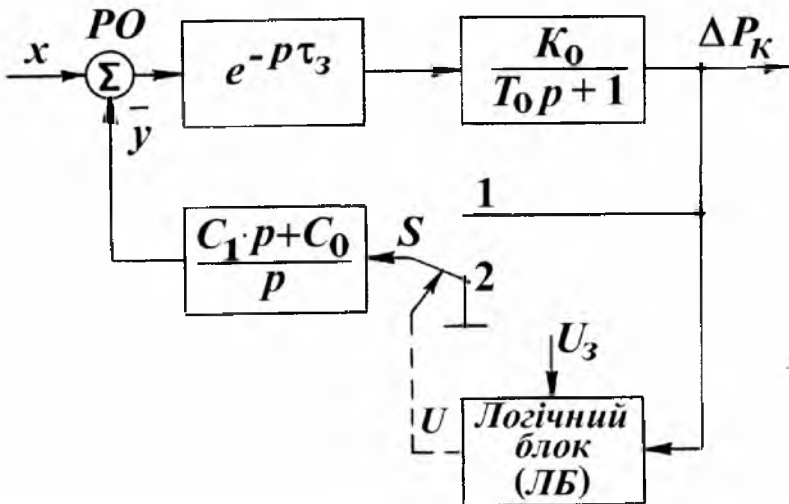


Рис.3, а - Структурна схема (система №2) системи регулювання тиску конденсації з логічним блоком

Параметри настроювання системи взяті безпосередньо з паспорту регулятора РІС-6800 суднової холодильної установки:

$C_0=110\%$ ХРО/(МПа·хв), $C_1=430\%$ ХРО/МПа.

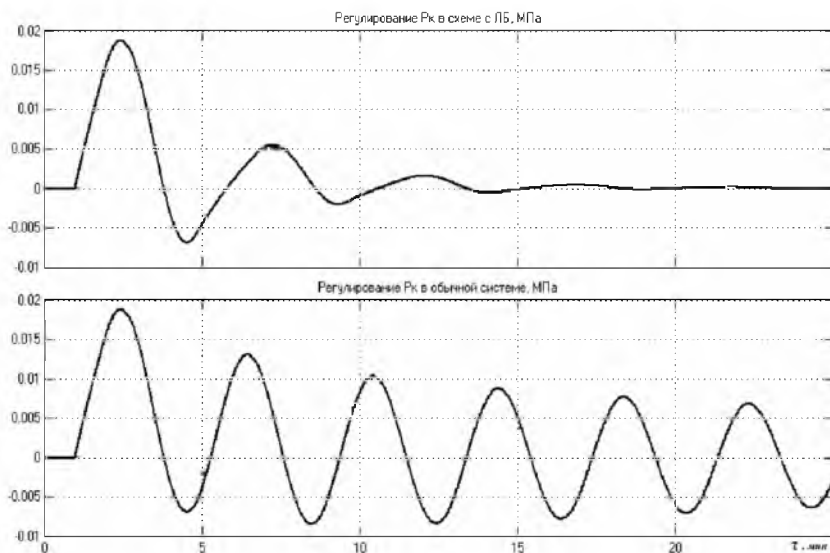


Рис. 3, б Процеси стабілізації тиску конденсації у кожухотрубному конденсаторі КТР-300 при позитивному збуренні: 1 – для системи із традиційним ПІ-регулятором; 2 – для системи із додатково убудованим логічним блоком

Динамічні параметри конденсатора визначені розрахунковим методом й мають наступні значення:

$\tau_z = 0,98$ хв, $T_O = 3,9$ хв, $K_O = 0,014$ МПа на 1% ходу регулювального органу (ХРО) – регулювального вентиля з електричним виконавчим механізмом, встановленого на трубопроводі подачі води в конденсатор.

У досліджуваній моделі [4, 5], у обидві системи, при незмінному настроюванні регулятора й $P_{зад} = 0$ (тобто режимі відхилення від абсолютного значення завдання тиску конденсації) вносилися однакові збурювання $X = 5\%$ ХРО й реєструвалася величина відхилення ΔP_K . Крива 1 показує, що процес регулювання, відповідній схемі, наведеній на рис. 3, б, затягнутий, для нього характерні висока частота й значна амплітуда коливань збільшень тиску конденсації.

При переході на пропоновану схему (крива 2), час перехідного процесу й ступінь коливальності тиску конденсації значно зменшені. Знизилася, також, і частота коливань тиску. Такий характер протікання процесу пояснюється співвідношенням динамічних пара-

метрів конденсатора, регулятора з логічним блоком і їхньою взаємодією, що спільно приводить до наступного.

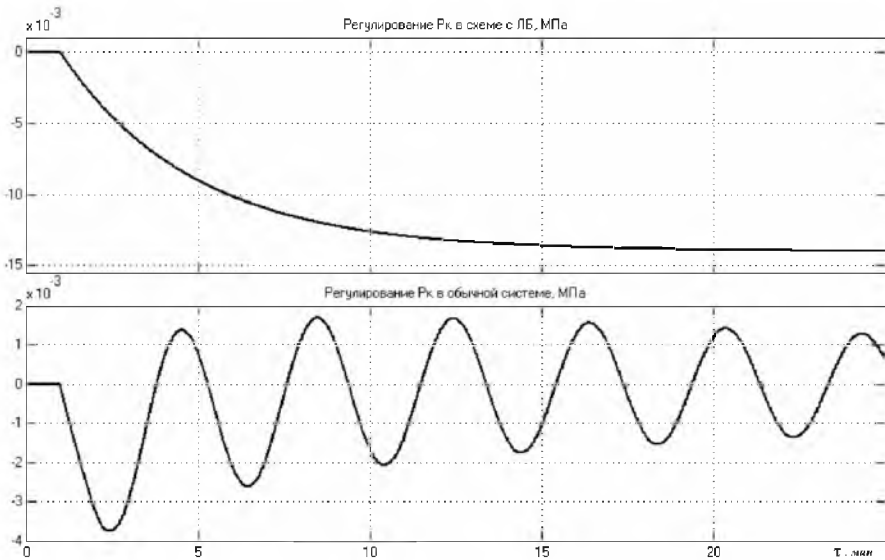


Рис. 3, в – Процеси стабілізації тиску конденсації у кожухотрубному конденсаторі КТР-300 при від'ємному збуренні: 1 – для системи із традиційним ПІ-регулятором; 2 – для системи с перемикаючою структурою (логічним блоком ЛБ)

Під час перехідного процесу, коли $P_k < P_{кзад}$ (регулятор відключений), величина ΔP_k через запізнювання у системі має позитивне значення. У результаті тиск P_k зросте й через певний час перевищить задане (нульове у цьому випадку - для режиму відхилень) значення, що й приведе до повторного спрацьовування регулятора. Процес буде повторюватися доти, поки тиск конденсації не встановиться на заданому значенні $P_{кзад}$, забезпечуваному інтегральною складовою регулятора.

Очевидно, що якщо на вхід пропонованої системи надійде негативне збурювання, наприклад $X = -1$ % ХРО, тоді регулятор не відключить ланцюг зворотного зв'язку й тиск у конденсаторі у статичному режимі буде відрізнятися від уставки на значення

$$P_k = K_O \cdot X = 0,014 \cdot (-1) = -0,014 \text{ МПа.}$$

У цьому випадку тиск конденсації встановився на більш низькому рівні й тому знизилася навантаження на компресор. Для порів-

няння - у звичайній системі пішов процес стабілізації на задалегідь фіксованому, заданому тиску, що є в даній ситуації енергетично не вигідним.

Матлаб-модель системи, за схемою, наведеної на рис. 3, а наведена на рис. 4. Реалізація на аналоговій елементній базі такої системи описана у [3]. Програмна реалізація алгоритму керування на холодильній установці очевидна й безпосередньо впливає із представленої на рис. 3, а структурної схеми.

Розроблені структурні схеми й алгоритми регулювання, використовують принципи інваріантності до основних збурювань із елементами нелінійної корекції й змінюваної структури.

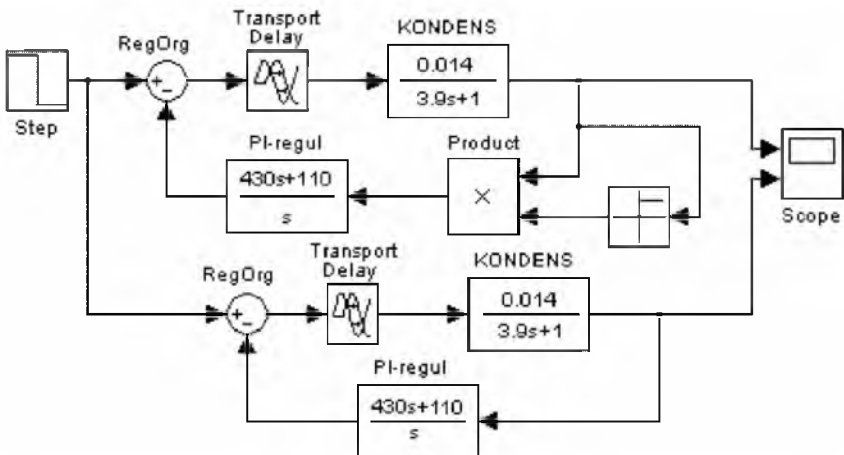


Рис.4 Моделі систем стабілізації тиску конденсації:
а) з логічним блоком; б) звичайна система

Висновок. Апаратне чи програмне використання запропонованих алгоритмів керування, як доведено у описаному прикладі за допомогою моделювання кожухотрубного конденсатора КТР-300 суднової холодильної установки, дозволяє значно покращити якість динамічних процесів. Це проявляється особливо яскраво при значних й частих змінах теплових навантажень на суднову холодильну установку. Результуюче значення отриманого енергетичного ефекту очевидне й потребує додаткових розрахунків.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dossat R.J. Principles of Refrigeration / R.J. Dossat, T.J. Horan. – NY: Prentice Hall Press, 2002. – P. 454.
2. Мааке В. Учебник по холодильной технике / В. Мааке, Г.-Ю. Эккерт, Ж.-Л. Кошпен; пер. с франц. под ред. В.Б. Сапожникова. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1998. – 1142 с.
3. Константинов Л.И. Судовые холодильные установки / Л.И. Константинов, Л.Г. Мельниченко. – М.: Пищевая промышленность, 1978. – 448 с.
4. Елагин М.Ю. Математическое моделирование нестационарных процессов в открытых термодинамических системах. – Тула: ТГУ, 1995. – 86 с.
5. Онищенко О.А. Электропривод систем температуры конденсации холодильных установок / О.А. Онищенко // Электромашинобудовання та електрообладнання. – 2006. – №66. – С. 190-192.