

УДК 631.331.85

Л.М.Маркіна

Луцький національний технічний університет

РОЗРАХУНОК ПЕРЕХІДНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕКТИФІКАЦІЙНОЇ КОЛОНИ ТА ПІДБІР РЕГУЛЯТОРА

Проведено аналіз та розрахунок перехідної характеристики на контрольній тарілці ректифікаційної колони та підбір регулятора.

Ключові слова: *перехідна характеристика, ректифікаційна колона, регулятор.*

Постановка проблеми. Спиртова промисловість України, на даний час, являє собою одну із найбільших, науково і технічно розвинутих галузей господарства. Теперішня потужність заводів була досягнута в середині 90-х років і досі поступово зростає за рахунок реконструкцій та введення у дію нових відділень, при цьому систематично замінюється застаріла апаратура. Незадовільна робота брагоректифікаційних установок часто призводить до підвищених витрат спирту, зниженню його якості, зниженню продуктивності установок і значної перевитрати енергії й води. Все це істотно впливає на економічні показники виробництва спирту і обумовлює зайву витрату матеріальних цінностей, у першу чергу таких важливих продуктів, як зерно, картопля, меляса та ін.

На сьогодні економічно вигідно виділяти ректифікований спирт із бражки на брагоректифікаційних установках. У брагоректифікаційних установках поєднуються технологічні операції сирцевих і ректифікаційних установок. Вони дають можливість отримати ректифікований спирт безпосередньо із бражки з меншими витратами енергії, води, робочої сили і при менших втратах спирту.

Ректифікація – це розділення рідких органічних летких сумішей на компоненти або групи компонентів (фракції) шляхом багаторазового двостороннього масо- і теплообміну між паром і рідиною потоками, що рухаються протитечею.

При взаємодії фаз у процесі ректифікації відбувається дифузія легко леткого компоненту x рідини в пару і важко леткого компоненту z пари в рідину. Спосіб контактування потоків може бути ступеневим (в тарілчастих колонах) або безперервним (в колонах з насадкою).

Призначення контактних пристроїв (тарілок, насадки) полягає в створенні умов, що сприяють максимальному зближенню потоків пари і рідини, які стикаються. Щоб ці потоки могли обмінюватись речовинами і енергією, вони повинні бути нерівноважними. При контактуванні парового і рідинного потоків у результаті масо- і теплообміну величина нерівноважності зменшується, а потоки віддаляються один від іншого і процес продовжується шляхом нового контактування цих фаз вже на другій, суміжній ступені з іншими рідинами і паровими потоками. В результаті багаторазового повторного контактування на наступних тарілках (ступенях) по висоті колони потоків рідини і пари, що рухаються в протилежних напрямках, склад взаємодіючих фаз суттєво змінюється: паровий потік при русі вгору збагачується легко летким, а рідинний, стікаючи вниз, збіднюється ним і збагачується важко летким. При достатньо великому шляху контакту потоків можна одержати в кінцевому результаті пару збагачену більш-менш чистим легко летким компонентом, яка виходить з верхньої частини колони, концентрація якої дає дистилат. З нижньої частини колони відводять порівняно чистий важко леткий компонент, так званий кубовий залишок.

Рідинний потік в колоні (флегма) утворюється за рахунок конденсації пари, що виходить з верхньої частини, в спеціальних теплообмінних апаратах – дефлегматорах, або водиться в колону у вигляді живлення. Для створення парового потоку в нижню частину колони вводять відповідну кількість тепла за рахунок безпосередньої подачі гріючої пари (відкритий обігрів колони) або за рахунок її подачі в спеціальний теплообмінник, через поверхню теплопередачі тепло якого передається киплячому кубовому залишку (закритий підігрів).

Переважно суміш різних компонентів (живлення) у вигляді рідини, пари або змішаному вигляді подають в середню частину колони. Частина колони, розміщена вище введення живлення, називається концентраційною, а частина, розміщена нижче, називається відгонною або вичерпуючою. Верхня тарілка відгінної частини колони називається тарілкою живлення.

Колона, яка має концентраційну і відгонну частини, називається повною ректифікаційною колоною. В такій колоні створюються найбільш сприятливі умови для отримання в практично чистому вигляді компонентів бінарної системи, але можлива її самостійна робота відгінної та концентраційної колон. Такі колони називаються неповними.

Зрошення флегмою, необхідне для проведення ректифікації, в відгінних колонах досягається шляхом подачі живлення в рідкому вигляді на верхню тарілку. При відсутності дефлегматора для утворення флегми неповні відгонні колони вважаються відкритими.

У повних і концентраційних колонах зрошення здійснюється за рахунок конденсату пари, що виходить з колони. Решту пари утворює дистилат (верхня частина колони), тому зрошення і відбір дистилату кількісно зв'язані між собою.

Для розділення багатокомпонентних сумішей використовується декілька послідовно працюючих ректифікаційних колон, кожна з яких розділяє суміш, що надходить на дистилат, який складається з одного або декількох легко летких компонентів і залишок із одного чи багатьох важко летких компонентів.

Технічний режим на ректифікаційній колоні встановлюють і регулюють таким чином, щоб забезпечити необхідну продуктивність, якість і вихід отриманого спирту-ректифікату і побічних продуктів ректифікації – головної фракції етилового спирту і сивушного масла і виключення втрат.

Традиційно витрату пари регулюють за величиною тиску в кубі колони. Зміна тиску в колонах апарату змінюється з умови виключення втрат з бардою і лютерною водою.

Специфічною особливістю експлуатації бражної колони є те, що при збільшенні нормативного тиску пари в колоні різко збільшуються енергозатрати на перегонку, знижується міцність бражного дистилату, тоді як зниження тиску пари нижче допустимого приводить до позанормативних втрат спирту з бардою.

Витрата води на дефлегматори і конденсатори в типових схемах регулюють, як правило, по величині тиску над верхніми тарілками колон. Конденсатори колон повинні бути «прогріті» на $2/3 - 3/4$, но не менше ніж на $1/2$ його висоти. Особливістю перегріву конденсаторів колон тягне за собою зменшення флегмового числа колон, зниження якості спирту. Ці особливості експлуатації потребують забезпечення високоточного контролю і регулювання технологічних процесів при ректифікації.

Витрату встановлюють виходячи з необхідної продуктивності установки. Для забезпечення необхідної продуктивності установки і забезпечення отримання високої якості кінцевого продукту при управлінні установкою необхідно прагнути до постійної витрати, регулюючи завантаження установки і відбором спирту-ректифікату.

Суттєвим моментом є те, що відбір непастеризованого спирту із конденсатора колони ректифікації ведуть в неперервно в мінімальній кількості, рівній $1 - 5 \%$ від об'єму, що виготовляється, умовного спирту і регулюють в відповідності з необхідною якістю спирту-ректифікату.

Однією з основних умов функціонування систем керування описаними раніше параметрами являється кінцева якість пастеризованого спирту, в якому повинно міститися альдегідів не більше 4 мг/л , важких ефірів не більше 30 мг/л . При перевищенні вказаних величин відбір непастеризованого спирту необхідно збільшити.

Одночасно відбір головної фракції етилового спирту з епюраційної колони також встановлюють в відповідності з необхідною якістю готового продукту. При правильно вибраному режимі епюрації концентрація альдегідів в епюраті повинна знаходитися на рівні слідових кількостей, не більше 1 мг на 1 л абсолютного спирту (в епюраті).

Одним із вирішальних факторів, що визначають ефективність роботи установки є стабільність тиску котельного пару, а також води, що йде на поверхню теплообмінника, які необхідно підтримувати постійними для забезпечення рівномірного їх розподілення по колонам і дефлегматорам при регулюванні.

Визначивши основні технологічні параметри, що мають найбільший вплив на режим роботи кожної колони, складають алгоритми регулювання цих параметрів (тиск в нижній колоні БК, ЕП, РК; концентрації спирту в основному технологічному процесі на виході з апарату БК, ЕП; концентрації спирту, що відбирається з колони ректифікації).

Важливим технологічним параметром, визначаючим режим роботи будь-якої з колон БРУ, є тиск в її нижній частині, який залежить від витрати граючої пари в кип'ятильник (Додаток А).

Основним параметром, характеризуючим стан процесу в кожній колоні, є концентрація цільового продукту (спирту) в основному технологічному потоці на виході з апарату. Через відсутність серійних датчиків для автоматичного визначення цього параметра його безпосереднє регулювання неможливе. Проте, при постійному тиску в колоні між концентрацією і температурою кипіння рідини на контрольній тарілці існує однозначна залежність, яку можна використовувати для непрямого регулювання концентрації.

Особливо високі вимоги ставляться до якості регулювання концентрації спирту, що відбирається з колони, ректифікації, оскільки він є кінцевим продуктом виробництва.

Особливістю відбору спирту-ректифікату необхідної якості є те, що цей параметр регулюється по непряму показнику – по температурі на 16-ій (живильній) тарілці колони ректифікації. Температуру необхідно строго підтримувати в вибраних межах і не допускати ні збільшення, ні зниження температури. Так, збільшення температури тягне за собою зниження міцності і погіршення якості спирту-ректифікату. Наприклад, відбір спирту по температурі вище $2-3^{\circ}\text{C}$ від нормальної протягом 15-20 хвилин погіршує аналітичні, органолептичні показники змінної або всієї добової виготовці спирту за рахунок збільшення домішок вищих спиртів. В той же час, пониження температури на живильній тарілці колони ректифікації тягне за собою перегрузку колони, провал і втрату спирту з лютерною водою, порушення режиму відбору сивушного мала.

Відбір спирту, який регулюється по температурі на контрольній тарілці є найбільш сильною керуючою дією в ректифікаційній колоні, що необхідно враховувати при розробці систем автоматичного керування. Виклад основного матеріалу. Експериментальна перехідна характеристика $h(t)$ статичного об'єкта в усіх випадках, крім найпростішого, коли об'єкт становить собою типову аперіодичну ланку першого степеня, має вигляд, зображений на рисунку 1.

Особливістю такої характеристики є те, що відхилення регульованої величини, починаючи з нульового значення при $t = \tau_0$, де τ_0 - величина запізнювання, з плином часу стабілізується на певному рівні $h(\infty)$, змінюючись зі швидкістю, що спочатку зростає від нуля до максимуму, а потім зменшується від максимуму до нуля, завдяки чому крива $h(t)$ має точку перегину (т.А на рисунку 4.1). В найпростішому вигляді структурна модель статичного об'єкта уявляється послідовним з'єднанням ланки запізнювання та аперіодичної ланки першого степеня.

В такому випадку

$$W_{об}(p) = \frac{k_{об}}{T_{об}p + 1} e^{-\tau_0 p}, \quad (1)$$

де $k_{об}$ - коефіцієнт передачі об'єкта; $\tau_{об}$ - загальне запізнювання, с; $T_{об}$ - стала часу об'єкта, с.

Значення сталого відхилення регульованої величини визначається як

$$h(\infty) = k_{об} f(\infty), \quad (2)$$

де $f(\infty)$ - значення сталої збудуючої дії.

Для одиничної стрибкоподібної збудуючої дії $f(\infty) = 1$. Тому

$$h(\infty) = k_{об}. \quad (3)$$

Отже, чисельне значення коефіцієнта передачі статичного об'єкта знаходять з кривої $h(t)$ як значення сталого відхилення регульованої величини (рис. 1).

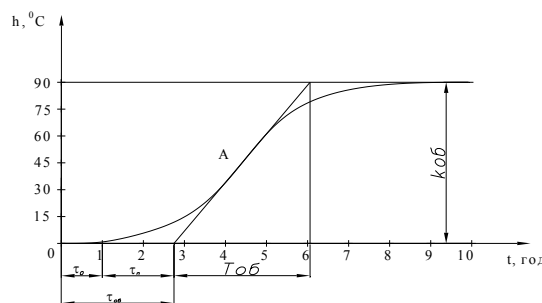


Рис. 1. Крива розгону ректифікаційної колони

$$k_{об} = 90.$$

При цьому розмірністю $k_{об}$ є

$$\frac{\text{розмірність регульованої величини}}{\text{розмірність збурюючої дії}}.$$

Для знаходження загального (умовного) запізнювання $\tau_{об}$ та сталої часу $T_{об}$ треба провести дотичну до перехідної характеристики в точці перегину (рисунок 1, точка А), де швидкість зміни регульованої величини має найбільше значення.

Проекція на вісь часу відрізка дотичної, обмеженого віссю часу та асимптотою кривої $h(t)$, визначає чисельне значення сталої часу $T_{об}$:

$$T_{об} = 11934 \text{ (с)} = 2.75 \text{ (год)}.$$

Чисельне значення запізнювання $\tau_{об} = \tau_0 + \tau_n$, знаходиться як відрізок часу від початку координат до точки перетину осі часу дотичною до перехідної характеристики $h(t)$ в точці перегину кривої.

$$\tau_{об} = 9889,2 \text{ (с)} = 3,315 \text{ (год)}.$$

Отже, передаточна функція об'єкта регулювання має вигляд:

$$W_{об}(p) = \frac{90}{3,315p + 1} e^{-2,75p}.$$

Для аналізу об'єкта регулювання була використана система MATLAB.

Перетворимо нашу передаточну функцію в зручну форму для середовища MATLAB:

$$W_{об}(p) = \frac{90}{3,315p + 1} e^{-2,75p} = \frac{90}{(3,315p + 1)e^{2,75p}}.$$

В передаточній функції об'єкта регулювання співмножник $e^{-\tau_{об}p}$ можна записати у вигляді ряду Тейлора. У випадках відносно невеликих значень часу запізнювання можливо обмежитись тільки першим степенем змінної p :

$$e^{\tau_{об}p} = 1 + \tau_{об}p. \quad (4)$$

Отже, підставивши в нашу функцію, отримаємо:

$$\frac{90}{(3,315p + 1)(1 + 2,75p)} = \frac{90}{9,116p + 6,065p + 1}.$$

Для розрахунку коефіцієнта передачі П-регулятора використаний метод розширених частотних характеристик (РЧХ). Цей метод при синтезі САР задовільняє вимогу до степеня затухання $\Psi=0,75$ перехідного процесу системи. Метод, що використовується, базується на понятті амплітудно-фазових частотних характеристик (АЧФХ) об'єкта $W_{об}$ и регулятора $W_{ар}$. Їх отримуємо з ПФ $W_{об}(s)$ и $W_{ар}(s)$ заміною оператора Лапласа s оператором $(j-m)\omega$, де m -ступінь коливальності:

$$\Psi = 1 - e^{-2\pi m} \text{ при } \Psi = 0,75,$$

$$m = \frac{\ln(1 - \Psi)}{-2\pi} = \frac{\ln(1 - 0,75)}{-2\pi} = 0,2206.$$

1. Отримуємо розширену АЧФХ об'єкта регулювання.
2. Записуємо інверсну розширену АЧФХ об'єкта регулювання.
3. Записуємо інверсну розширену АЧФХ об'єкта регулювання в алгебраїчному вигляді:

$$\left. \begin{aligned} R(m, \omega) &= \operatorname{Re}(\bar{W}in) \\ J(m, \omega) &= \operatorname{Im}(\bar{W}in) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

де $R(m, \omega)$ - інверсна розширена дійсна ЧХ об'єкта регулювання, $J(m, \omega)$ - інверсна розширена уявна ЧХ об'єкта регулювання.

4. Задаючи різні значення частоти ω , на площині параметрів настройки АР будують лінію рівній степені затухання $\Psi=0,75$ по параметричним рівностям:

$$\left. \begin{aligned} K_i &= \omega(m^2 + 1)J(m, \omega) \\ K_p &= mJ(m, \omega) - R(m, \omega) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

5. Визначаємо параметри П-регулятора як координати точки перетину годографа і осі абсцис.

6. Отримаємо перехідну характеристику САР по якій розраховують степінь затування Ψ і порівнюємо з заданою $\Psi_{зад}=0,75$

В MATLAB:

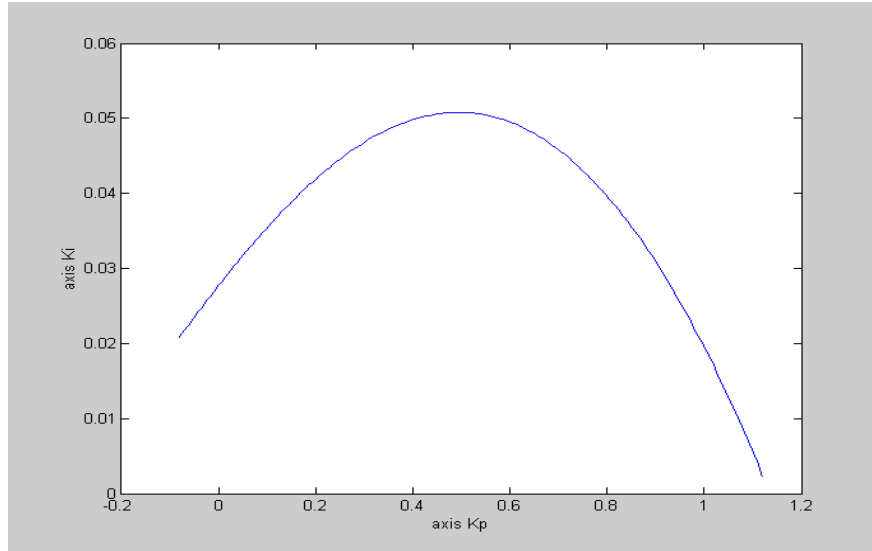


Рис. 2. Лінія рівної степені затування

Вибрано $K_p=1,1$

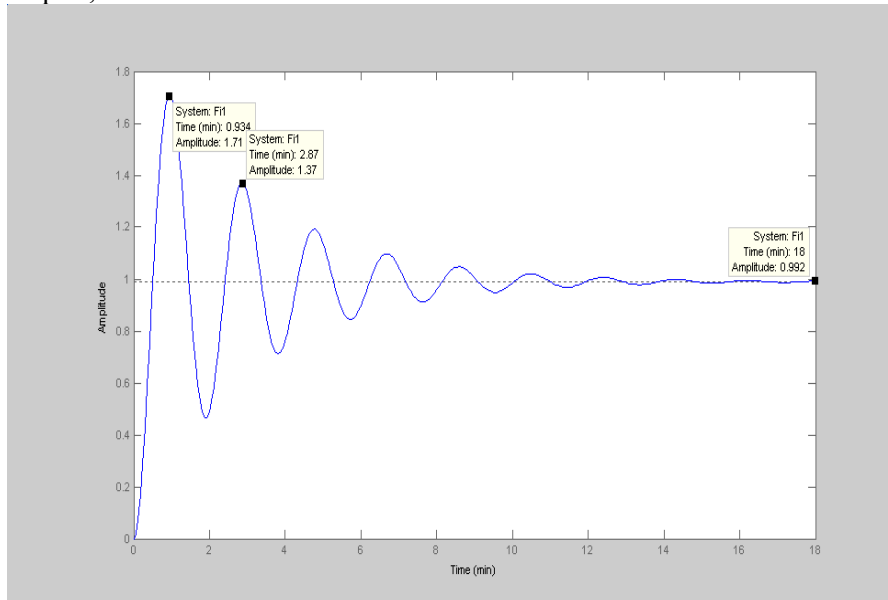


Рис. 3. Перехідна характеристика САР з П-регулятором

Оцінка степеня затування:

1. $y_{\max 1}=1.71$

$y_{\max 2}=1.37$

$y_{уст}=0,992$

2.
$$\psi = \frac{(y_{\max 1} - y_{уст}) - (y_{\max 2} - y_{уст})}{(y_{\max 1} - y_{уст})} = 0.67$$

Пропорційний закон регулювання є найпростішим законом регулювання. До переваг П-регуляторів належать: простота і надійність, безінерційність, можливість зменшення статичної помилки і тривалості перехідного процесу. Основні недоліки регулятора: принципова неможливість впливу на динамічні похибки і неможливість повної ліквідації статичної помилки.

Настроювальні параметри K_p і K_i ПІ-регулятора визначаються як координати точки екстремума лінії рівної степені затухання (рис.3). Вважають, що оптимальні значення параметрів настройки ПІ-регулятора знаходяться дещо правіше точки екстремума. Вибираємо:

$$K_p = 0,7; \quad K_i = 0,045.$$

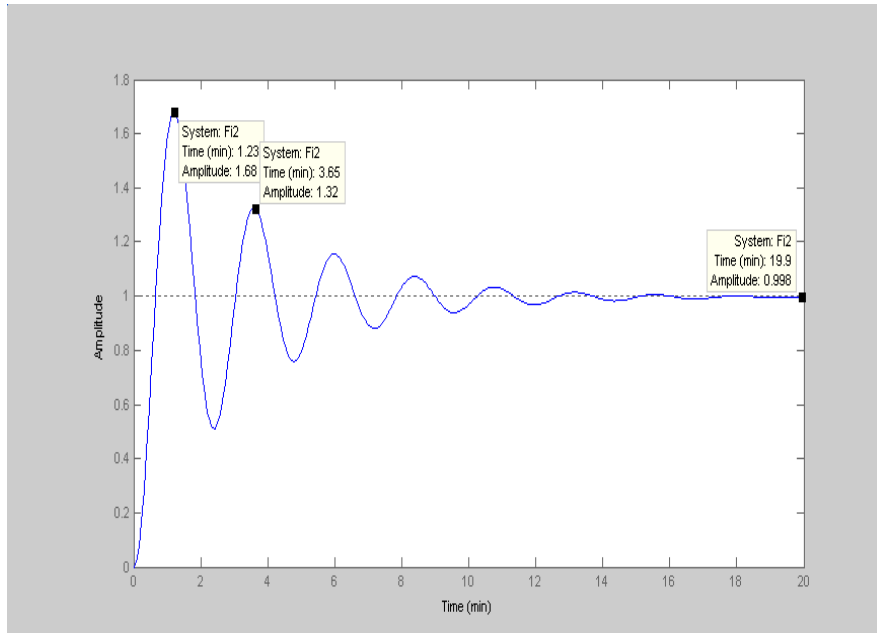


Рис. 4. Перехідна характеристика САР з ПІ-регулятором

Оцінка степеня затухання:

$$1. \quad y_{\max 1} = 1.68$$

$$y_{\max 2} = 1.33$$

$$y_{уст} = 0,998.$$

$$2. \quad \psi = \frac{(y_{\max 1} - y_{уст}) - (y_{\max 2} - y_{уст})}{(y_{\max 1} - y_{уст})} = 0.714.$$

Основні результати:

$$K_p = 0,7; \quad K_i = 0,045 \text{ при } \psi = 0.714;$$

ПІ-регулятор забезпечує швидкість зміни вхідної величини об'єкта, яка пропорційна швидкості зміни величини на виході об'єкта, що веде до поліпшення динамічних властивостей САР. Недолік регуляторів даного типу – неможливість оперативно компенсувати швидкісні помилки.

Послідовність параметризації ПІД-регулятора з трьома настроювальними параметрами K_D , K_p , K_i , відрізняються від розглянутої операції по визначенню коефіцієнта $K_D = 1.41$. В цьому випадку лінію рівну степеню затухання описують наступними параметричними рівняннями:

$$\left. \begin{aligned} K_i &= \omega(m^2 + 1)[J(m, \omega) + \omega K_D] \\ K_p &= mJ(m, \omega) - R(m, \omega) + 2m\omega K_D \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

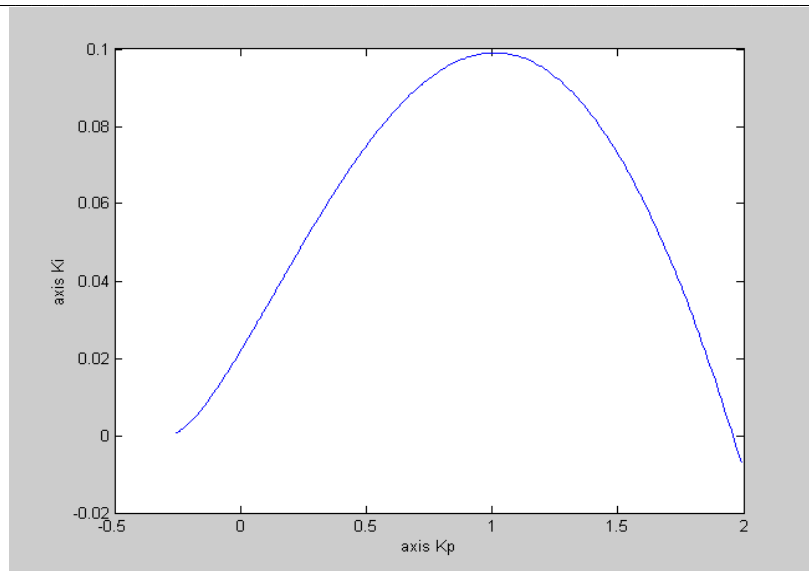


Рис. 5. Лінія рівної степені затухання

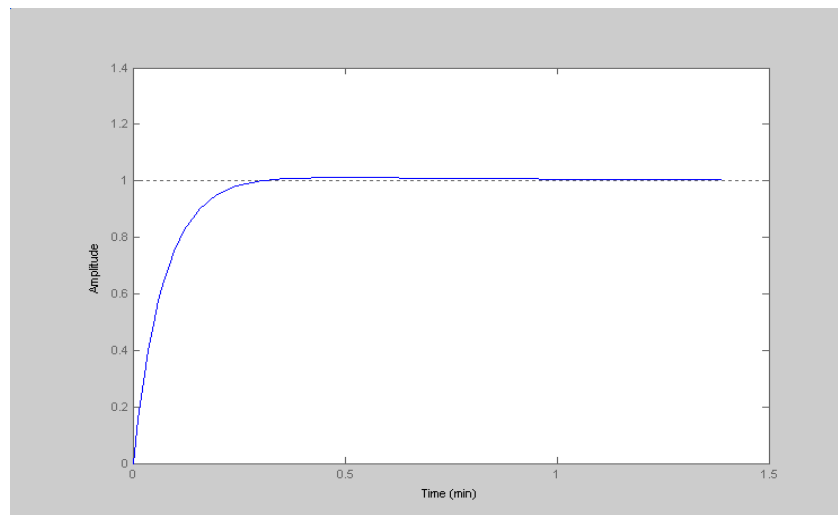


Рис. 6. Перехідна характеристика САР з ПІД-регулятором

ПІД-регулятори найскладніші, проте вони об'єднують в собі переваги всіх трьох простих законів керування, забезпечуючи астатизм системи, оперативне регулювання на появу відхилень на їх похідні.

Висновок. Після проведеного аналізу та розрахунків перехідних характеристик САР з різними регуляторами, можемо зробити висновок, що найкраще для нашого процесу підходить ПІД-регулювання, так як при використанні ПІД-регулятора, процес з коливального став монотонним.

1. Технологія спирта. В.А. Маринченко, В.А. Смирнов, Б.А. Устинников и др. - М.: Лег. и пищ. пром-сть, 1981. - 416 с.
2. Автоматика и автоматизация пищевых производств. М.М. Благовещенская, Н.О. Воронина, А.В. Казаков и др. – М.: Агропроиздат, 1991. – 239 с.
3. Автоматические системы управления технологическим процессом брагоректификации. М.Л. Мандельштейн. – М.: Пищ. пром-сть, 1975. - 231с.
4. Теорія автоматичного керування. М.Г. Попович, О.В. Ковальчук. – К.:Либідь, 1997. – 544с.
5. Теорія автоматичного управління / Під ред. А.А.Воронова. - М. : Вища школа, 1977.-Ч.І.-304с.