

**АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД МЕТОДІВ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧІ СИНТЕЗУ
ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ РЕКТИФІКАЦІЙНИМИ
КОЛОНАМИ****А.О. Стопакевич¹, О.А. Стопакевич²**¹Державний університет інтелектуальних технологій та зв'язку,
1, Кузнечна, Одеса, 65029, stopakevich@gmail.com²Національний університет «Одеська політехніка»,
1, пр. Шевченка, Одеса, 65044, stopakevich@op.edu.ua

Проблема синтезу систем керування ректифікаційними колонами є актуальною багато років. Для ректифікаційних колон як об'єктів керування при розв'язанні задачі синтезу систем автоматичного керування завжди актуальною є проблема впливу перехресних впливів. Зі збільшенням складності структури ректифікаційної колони (збільшення компонентів, ускладнення структури апарату з додаванням додаткових теплових зв'язків, використання вбудованого в колону реактора та ін.) ця проблема стає тільки гострішою. Типовим підходом до синтезу систем автоматичного керування ректифікаційними колонами є розробка систем керування децентралізованої структури, яка містить автономні одновимірні регулятори. Це можуть бути як регулятори, які знаходяться в межах класичної теорії керування, так й регулятори інших типів (адаптивні, нечіткі, нелінійні, тощо), при умові що вони одновимірні. В межах децентралізованого підходу важливою є проблема вибору каналів керування (вибору конфігурації). Від розв'язку цієї проблеми залежить стійкість системи керування у цілому, її показники якості й потенційна відповідність технологічному регламенту виробництва. Розглянуті методи вибору конфігурації децентралізованої системи керування на базі моделей статички й динаміки ректифікаційних колон. Розглянуті переваги й недоліки застосування таких методів вибору конфігурації як RGA, RIA, ERGA, RRA. На прикладах моделей ректифікаційних колон показані особливості й обмеження кожного з них. Крім того, увага приділена методам вибору конфігурації, стійкої до відключення окремих регуляторів. Розглянуто метод розрахунку індексу Нідерлінського NI та індексу LII. На прикладі розглянуто застосування для складних об'єктів матриць PRGA й розрахунку на їх базі індексу інтегрованості ICI.

Ключові слова: конфігурація децентралізованої системи керування, ректифікаційна колона, індекс Нідерлінського, матриця Брістоля, RGA, PRGA, NI, RRA, ERGA, ICI, LII, інтегрованість.

Вступ

Найбільш істотна властивість багатовимірних технологічних об'єктів керування (ОК), до яких відносяться ректифікаційні колони (РК) – це наявність перехресних зв'язків в об'єкті керування. Тобто кожна вхідна змінна впливає на всі чи деякі вихідні змінні. Ця властивість, з одного боку, значно ускладнює задачу синтезу систем автоматичного керування (САК), а з іншого – відкриває необмежені можливості до застосування різних підходів до їх синтезу.

Однією з репрезентативних робіт, в якій узагальнено багаторічний досвід дослідження особливостей РК як об'єкту керування й частково досвід розробки систем керування різних авторів є робота [1]. З самого початку досліджень систем керування РК спеціалісти звернули увагу на те, що між контурами керування РК, наприклад контурами керування температурами низу й зверху, чи контуром керування тиском і контуром керування температурою зверху, може виникати суттєвий конфлікт, причина якого полягає в наявності значних перехресних впливів між каналами керування. Такий

конфлікт приводить до занадто коливальних перехідних процесів чи взагалі втрати стійкості системи керування.

Ідеальною конфігурацією на початку промислової експлуатації САК для бінарних РК вважалась так звана LV-конфігурація [1, 2], яка передбачала керування концентрацією дистилляту шляхом зміни витрати флегми й керування концентрацію нижнього продукту шляхом зміни витрати кубового продукту, який повертається на підігрів. Така конфігурація відноситься до двохточкових, тобто ставить за мету як досягнення заданої концентрації дистилляту, так й мінімізації втрати ключового компоненту в кубовому продукті [1]. Але дуже сильний перехресний вплив поставив перед інженерами складний вибір: значно ослабити якість керування, значно зменшивши коефіцієнти передачі регуляторів чи відмовитись від задачі стабілізації концентрації кубового продукту. При проектуванні багатьох, в тому числі й нині діючих, САК РК (наприклад, для суміші спирт-вода) інженери як правило вибирають другий варіант, що призводить до деякої втрати продукту. Однак так можливо поступити не завжди: в бінарних РК може бути важливою чистота двох продуктів (наприклад, задача розділення суміші бензол-толуол), а для багатокомпонентних РК сильно ослаблені регулятори будуть призводити до неможливості роботи в межах регламенту й занадто тривалим (добовим) перехідним процесам.

Технологічно розв'язати таку проблему виявилось неможливим. Більш того, розвиток технологічних агрегатів йде в теорії керування у напрямку підвищення енергоефективності, що ще більш ускладнює проблему й робить її все більш актуальною. Отже залишається її розв'язувати шляхом застосування методів керування.

Основна ідея побудови децентралізованої САК полягає в значному спрощенні задачі синтезу, що має звестись до визначення налаштувань декількох незалежних регуляторів простої структури [3]. В промислових САК це як правило стандартні регулятори [4], налаштування яких можливо визначити без інженерних математичних пакетів й при необхідності підстроїти емпірично під час налагоджувальних робіт.

Фактично єдиним шляхом розв'язку проблеми перехресних зв'язків в межах децентралізованої структури САК є вибір максимально автономної конфігурації. Тобто треба визначити, який з можливих виходів з яким можливим входом ОК слід зв'язати в контур керування, щоб конфлікт між контурами був мінімальним. Множина можливих входів й виходів задається метою керування і визначається вимогами технологічного регламенту та економічними обмеженнями, а також технічними можливостями виміряти концентрацію ключового компоненту (тобто слід оцінити наявність дачача прямого вимірювання концентрації, швидкість й точність вимірювання, тощо).

Найбільш докладною з тематики, яка розглядається, є монографія [5], більшість прикладів в якій приведено при використанні моделей РК. Однак дослідження в цій галузі не припинились, що робить актуальним осучаснення проблеми шляхом переосмислення властивостей відомих методів й врахування особливостей розроблених нових.

Методи вибору конфігурації на основі моделі статички при умові ідеального керування з використанням всіх контурів

Класичним методом аналізу взаємозв'язків в моделі ОК є метод матриць Брістоля (RGA, Relative Gain Array) [6]. Цей метод став популярним й є основним й зараз завдяки його наступним перевагам: вимагається мінімальна інформація про ОК (тільки матриця статичних коефіцієнтів); не залежить від одиниць вимірювання; результат представляється в вигляді матриці, яка легко розраховується й результати якої легко зрозуміти. Розглянемо ОК, який описано матрицею передатних функцій (МПФ) $P(s)$. Введемо матрицю коефіцієнтів $P_0=P(0)$. Правило розрахунку RGA має вигляд

$$RGA(P(s)) = \lambda(P_0),$$

де для довільної числової матриці M , яка має обернену, $\lambda(M) \triangleq M \otimes M^{-T}$, а знак \otimes означає поелементний добуток матриць.

Наприклад, розглянемо розрахунок RGA для моделі невеликої РК розділення суміші ізопропіла з водою, яка описується МПФ [7]

$$P(s) = \begin{bmatrix} \frac{3.74}{(1803 \cdot s + 1) \cdot (78 \cdot s + 1)} & \frac{-3.45 \cdot e^{-53.3 \cdot s}}{(2698 \cdot s + 1) \cdot (72 \cdot s + 1)} \\ \frac{5.21 \cdot e^{-43 \cdot s}}{(2864 \cdot s + 1)} & \frac{-2.36}{(1275 \cdot s + 1) \cdot (525 \cdot s + 1)} \end{bmatrix}$$

Ця модель є не дуже складною, але одночасно репрезентативною для подальшого аналізу методів. Керуючими впливам є потужність ребойлера u_1 (номінал 4100 Вт) й витрата флегми u_2 (номінал 65 г/хв). Керованими змінними є температура зверху y_1 (номінал 59.7 С) й температура знизу y_2 (номінал 78.2 С). Тоді матриця RGA має наступний вигляд:

$$RGA = \begin{bmatrix} -0.9648 & 1.9648 \\ 1.9648 & -0.9648 \end{bmatrix}$$

Для вибору каналів для децентралізованого керування сформульовані наступні правила: 1) бажано обирати канали, у яких $\lambda_{i,j}$ близькі до 1 (ідеальне керування); 2) не бажано обирати канали з $\lambda_{i,j}$ близьких до 0, що означає, що не вдається уникнути взаємозв'язків каналів в системі керування; 3) заборонено використовувати канали з $\lambda_{i,j} < 0$. Теоретичне обґрунтування методу RGA проведено значно пізніше визнання його цінності в роботі [8]. В цій роботі уточнено, що можуть означати негативні значення $\lambda_{i,j}$. Це може означати, що САК буде нестійкою: – за всіма контурами; – тільки за знайденим контуром; – тільки за знайденим контуром, але в повній системі інші контури стабілізують цей контур. Дослідження властивостей матриці RGA й методів розрахунку її на базі матриць з особливою структурою типу проводиться й зараз [9], однак такі дослідження більш цікаві з теоретичної точки зору й для розробки більш досконалих методів в галузі прикладної математики.

Варіантом матриці RGA, є матриця RIA (Relative Interaction Array) [10], яка отримується шляхом ділення одиниці на кожний елемент матриці RGA чи іншої матриці з подібними властивостями з відніманням від результату одиниці:

$$RIA(P_0) = \left\{ \phi_{i,j}(P_0) \triangleq \lambda_{i,j}^{-1}(P_0) - 1 \right\}.$$

Мотивацією для цієї модифікації матриці Брістоля стала складність вибору між альтернативними конфігураціями при застосуванні звичайного RGA. Якщо $\phi_{i,j} = 0$, то перехресний вплив каналів відсутній (тобто це бажане значення для вибору); якщо $1 > \phi_{i,j} > 0$, то напрямком перехідних процесів при замкненому контурі такий же, як й в розімкненому; якщо $\phi_{i,j} < 0$, то напрямком зворотній і буде такий же, як й при відсутності замкнення; якщо $|\phi_{i,j}| > 1$, то перехресний вплив є домінуючим.

Проблема вибору конфігурації за матрицею з властивостями RGA в складних випадках для об'єктів 3x3 та більших, може бути розв'язана й іншими способами. За нашою думкою серед розрахунково складних способів найкращим є Угорський

алгоритм, потенціал застосування якого для матриць RGA-типу продемонстровано в роботі [11].

Модифікації й уточнення методу RGA з метою врахування різних особливостей ОК й зараз представляють інтерес для науковців. Більшість з них нехарактерна для моделей РК й задач керування РК, тому докладний аналіз їх проводити не будемо і лише наведемо перелік основних напрямків досліджень: аналіз неквадратних матриць [9], аналіз матриць нестійких ОК [12, 13], ОК з диференціаторами й інтеграторами [14]. Для задач керування РК, при деяких умовах, може бути цікавим розрахунок матриці RGA при неточній моделі ОК [15–19] і з характерними нелінійностями [20]. Деякі конфігурації приводять до дуже великих значень $\lambda_{i,j}$, що ставить під питання результати аналізу за матрицею, така проблема на прикладі РК розглянута, наприклад, в роботі [21].

Методи вибору конфігурації на основі моделі статички при умові ідеального керування з властивістю інтегрованості

Досвід застосування RGA-аналізу для різних ОК показав, що для конфігурації САК бажано ввести додаткову умову – інтегрованість [22]. Децентралізована САК є інтегрованою, якщо вона залишається стійкою: 1) при зміні всіх коефіцієнтів регуляторів на множник, який змінюється в діапазоні $0 < k \leq 1$; 2) при встановленні коефіцієнтів будь-якої кількості регуляторів рівною 0 (ця умова є також однією з умов живучості промислової САК [23]).

Першим з методів цього типу й досі поширеним є індекс Нідерлінського [11]. Він є розрахунково простим для систем 2x2. Припустимо, що є САК з двома незалежними контурами керування, в яких задіяні регулятори з інтегратором. Необхідно проаналізувати чи залишиться працездатною (стійкою в слабкому визначенні) система керування при відключенні одного з регуляторів. Значення індексу, наприклад, для першого ОК, розраховується наступним чином:

$$P_1 = \text{diag}(P_0); \quad P_2 = \text{diag}_2(P_0)$$

$$NI_1 = \det(P_0)/\det(P_1) = -1.0364; \quad NI_2 = \det(P_0)/\det(P_2) = 0.5089$$

де $\text{diag}(\bullet)$ – квадратна матриця, з головною діагоналлю вихідної матриці; $\text{diag}_2(\bullet)$ – квадратна матриця, з побічною діагоналлю вихідної матриці.

Підставивши, одержимо

$$P_0 = \begin{bmatrix} 3.74 & -3.45 \\ 5.21 & -2.36 \end{bmatrix}, P_1 = \begin{bmatrix} 3.74 & 0 \\ 0 & -2.36 \end{bmatrix}, P_2 = \begin{bmatrix} 0 & -3.45 \\ 5.21 & 0 \end{bmatrix}$$

Негативне значення індексу означає, що така конфігурація є нестійкою. Отже, бачимо, що результат змістовно співпадає з RGA, зв'язок за прямою діагоналлю призведе до втрати стійкості системи. Найкращим є значення, яке ближче до 1.

Метод вимагає перевіряти кожну конфігурацію окремо й, як і RGA, обмежений статикою. Його недоліком в класичній постановці є те, що умова стійкості є строгою тільки для систем 2x2, в більших системах стійкість вже буде залежати від налаштувань регулятора.

Для спрощення порівняння декількох конфігурацій використовується індекс інтегрованості (ICI), що використовує матрицю RIA.

Значення цього індексу для системи 2x2 розраховується доволі просто.

Наприклад, для системи першим ОК $P(s)$ 2x2

$$P_0 = \begin{bmatrix} 3.74 & -3.45 \\ 5.21 & -2.36 \end{bmatrix},$$

теоретично можливі лише дві конфігурації $u_1 - y_1, u_2 - y_2$ і $u_2 - y_1, u_1 - y_2$.

$$M_{1-CNF1} = \begin{bmatrix} 3.7400 & -3.4500 \\ 5.2100 & -2.3600 \end{bmatrix}, M_{1-CNF2} = \begin{bmatrix} -3.4500 & 3.7400 \\ -2.3600 & 3.7400 \end{bmatrix}.$$

Як показав RGA аналіз працездатною є тільки остання – CNF_2 , тому розрахуємо RIA тільки для неї

$$RIA(M_{1-CNF2}) = \begin{bmatrix} -0.4911 & -2.0364 \\ -2.0364 & -0.4911 \end{bmatrix}$$

$$ICI_{CNF2} = |-0.4911| + |-0.4911| = 0.9821.$$

Найкращою є конфігурація, у якій ICI найменший при умові стійкості системи за матрицею RGA.

Для того, щоб проводити аналіз систем 3x3 й більше був розроблений апарат матриць часткової керуваності (PRG, Partial Relative Gain) [24]. Візьмемо, наприклад, модель з роботи, яка описує колону для розділення 3-х компонентної суміші [25].

$$P_0 = \begin{bmatrix} 153.45 & -179.34 & 0.23 \\ -157.67 & 184.75 & -0.10 \\ 24.63 & -28.97 & -0.23 \end{bmatrix}, y = \begin{pmatrix} x_{D1} \\ x_{B1} \\ x_{S2} \end{pmatrix}, u = \begin{pmatrix} L \\ V \\ S \end{pmatrix}.$$

В даній моделі вимірюваними змінними є концентрація ключового компоненту в верхній частині РК x_{D1} , в нижній частині РК x_{B1} , в боковому потоці x_{S2} . Керуючими впливами є витрата флегми L , витрата кубового продукту на підігрів V , витрата бокового потоку S . Концентрації вимірюються в мольних долях, одиниці керуючих впливів не вказані.

Розрахуємо матрицю RGA:

$$RGA(P) = \begin{bmatrix} 443.07 & -441.82 & -0.25 \\ -480.55 & 481.37 & 0.18 \\ 38.48 & -38.55 & 1.07 \end{bmatrix}$$

Бачимо, що випадок, навіть в статистиці, доволі складний, оскільки чотири коефіцієнти негативні, два коефіцієнти дуже значно відрізняються від 1, один коефіцієнт значно відрізняється від 1. В цьому випадку єдиною можливою є тільки конфігурація за прямою діагоналлю.

При керуванні за однією конфігурацією з трьома змінними інтегрована система має залишитись працездатною при наступних варіантах (де признак 1 означає відключення контуру керування)

$$V = \{(0, 0, 0), (1, 0, 0), (0, 1, 0), (1, 1, 0), (0, 0, 1), (1, 0, 1), (0, 1, 1), (1, 1, 1)\}$$

При умові, що ми не працюємо з ОК з каналами, які описуються інтегральними ланками, будемо вважати що дослідження працездатності конфігурації (1,1,1) не має сенсу. Крім того, спростимо задачу, відмовившись від дослідження ситуацій з відімкненням двох регуляторів. Тоді залишиться чотири конфігурації для дослідження: $\{(1,0,0), (0,1,0), (0,0,1), (0,0,0)\}$.

$$RIA(CL_{000}) = RIA(P_0) = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -4.95 \\ -1 & -1 & 4.55 \\ -0.97 & 1.03 & -0.07 \end{bmatrix}$$

$$P_{100} = \begin{bmatrix} 184.75 & -0.10 & -157.67 \\ -28.97 & -0.23 & 24.63 \\ -179.34 & 0.23 & 153.45 \end{bmatrix}$$

$$P_{100(11)} = \begin{bmatrix} 184.75 & -0.10 \\ -28.97 & -0.23 \end{bmatrix}, P_{100(22)} = 153.45, P_{100(12)} = -157.67, P_{100(21)} = [-179.34 \quad 0.23]$$

$$CL_{100} = P_{100(11)} - P_{100(12)} \cdot (P_{100(22)}^{-1} \cdot P_{100(21)}) = \begin{bmatrix} 0.48 & 0.14 \\ -0.18 & -0.27 \end{bmatrix}, RIA(CL_{100}) = \begin{bmatrix} -0.20 & -5.07 \\ -5.07 & -0.20 \end{bmatrix}$$

$$P_{010} = \begin{bmatrix} 153.45 & 0.23 & -179.34 \\ 24.63 & -0.23 & -28.97 \\ -157.67 & -0.10 & 184.75 \end{bmatrix}$$

$$P_{010(11)} = \begin{bmatrix} 153.45 & 0.23 \\ 24.63 & -0.23 \end{bmatrix}, P_{010(22)} = 184.75, P_{010(12)} = \begin{bmatrix} -179.34 \\ -28.97 \end{bmatrix}, P_{010(21)} = [-157.67 \quad -0.10]$$

$$CL_{010} = P_{010(11)} - P_{010(12)} \cdot (P_{010(22)}^{-1} \cdot P_{010(21)}) = \begin{bmatrix} 0.40 & 0.13 \\ -0.09 & -0.25 \end{bmatrix}, RIA(CL_{010}) = \begin{bmatrix} -0.13 & -7.83 \\ -7.83 & -0.13 \end{bmatrix}$$

$$P_{001} = \begin{bmatrix} 153.45 & 0.23 & -179.34 \\ -157.67 & -0.10 & 184.75 \\ 24.63 & -0.23 & -28.97 \end{bmatrix}$$

$$P_{001(11)} = \begin{bmatrix} 153.45 & 0.23 \\ -157.67 & 184.75 \end{bmatrix}, P_{001(22)} = -0.23, P_{001(12)} = \begin{bmatrix} 0.23 \\ -0.10 \end{bmatrix}, P_{001(21)} = [24.63 \quad -28.97]$$

$$CL_{001} = P_{001(11)} - P_{001(12)} \cdot (P_{001(22)}^{-1} \cdot P_{001(21)}) = \begin{bmatrix} 178.08 & -208.31 \\ -168.38 & 197.35 \end{bmatrix}, RIA(CL_{001}) = \begin{bmatrix} -1 & -1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix}$$

За матрицями RIA для кожного відімкненого керування можливо перевірити умову інтегрованості. Критерій перевірки має вигляд

$$\sum \text{diag}(RIA) \leq -1.$$

Цьому критерію відповідають всі досліджені випадки.

Критерій ICI за матрицями в даному випадку розраховується наступним чином:

$$ICI = \sum |\text{diag}(\text{RIA}(\text{CL}_{000}))| + \sum |\text{diag}(\text{RIA}(\text{CL}_{100}))| + \sum |\text{diag}(\text{RIA}(\text{CL}_{010}))| + \sum |\text{diag}(\text{RIA}(\text{CL}_{001}))| = 2.07 + 0.40 + 0.26 + 2 = 4.73$$

Якщо можливо декілька конфігурацій, то найкращою вважаємо конфігурацію, що має найменше ненульове значення.

Обмеження методів аналізу на основі моделей статички

Простота методу RGA й індексу Нідерлінського, особливо при застосуванні для моделей 2x2, має й обернену сторону, яка виходить зі спрощення задачі аналізу ОК до аналізу його статички. Найбільш яким прикладом обмеження методу RGA є факт невизнання відомими науковцями галузі керування ректифікацією, які орієнтувались на моделі статички, працездатності технологічної ДВ-конфігурації [1] (стабілізації концентрацій продуктів за допомогою зміни їх витрат [26]). На практиці, виявилось що така конфігурація працездатна, хоча й не відповідає умові інтегрованості.

Показовою є математична модель ОК, яка приведена в роботі [27]

$$P(s) = \begin{bmatrix} \frac{5}{4 \cdot s + 1} & \frac{2.5 \cdot e^{-5 \cdot s}}{(2 \cdot s + 1)(15 \cdot s + 1)} \\ \frac{-4 \cdot e^{-6 \cdot s}}{20 \cdot s + 1} & \frac{1}{3 \cdot s + 1} \end{bmatrix}$$

Матриця Брістоля для цієї моделі має вигляд

$$RGA = \begin{bmatrix} 0.(3) & 0.(6) \\ 0.(6) & 0.(3) \end{bmatrix}.$$

Таким чином, метод пропонує застосування непрямої діагоналі, тобто конфігурації зі значними перехресними впливами. Для цього, щоб це перевірити проведемо математичне моделювання перехідних процесів з САК з ПІ-регуляторами, які налаштовані Matlab-програмою pidtune (відмітимо, що результати аналогічні й при застосуванні будь-якого з універсальних методів налаштування регуляторів ПІД-типу [4]). В якості еталону для порівняння будемо використовувати САК, яка керує тим самим ОК з нульовими перехресними впливами. Результати моделювання представлені на рис. 1.

Хоча вказана в цьому розділі модель є показовою теоретичною конструкцією, РК з подібними до неї динамічними властивостями – явище доволі типове. Така динаміка характерна для перехресних впливів багатоконпонентних колон [28]. В деяких випадках вона можлива й в двокомпонентних РК – як правило це колони з невеликою кількістю тарілок, які застосовуються в періодичних процесах чи для отримання специфічних компонентів в умовах лабораторії. Таким чином, для вибору конфігурації децентралізованої САК РК метод RGA й подібні методи в парадигмі статички не можуть вважатись універсальними. Більш докладний аналіз обмежень методу RGA для різних задач керування РК в різних технологічних конфігураціях наведено в роботі [1].

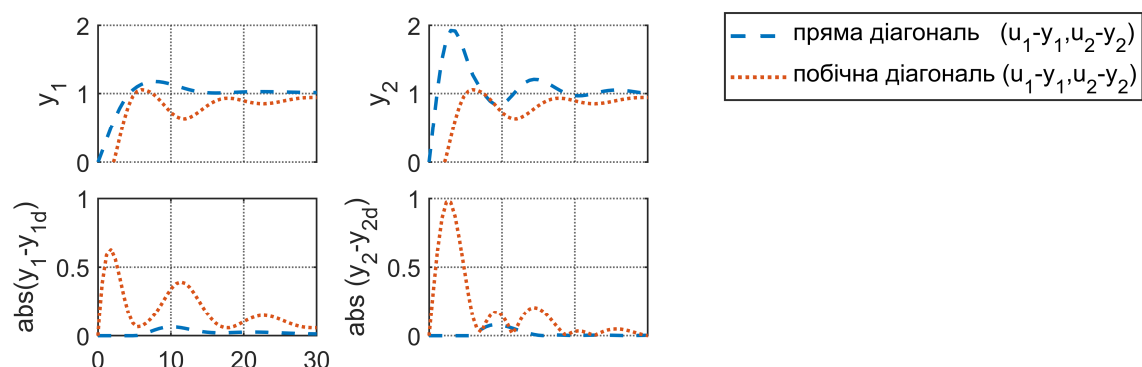


Рис. 1. Перехідні процеси в САК з ОК $P(s)$ при ПІ-регулюванні за прямою й побічною діагоналлю ОК (верхній рядок) й їх порівняння з керування ОК без перехресних впливів (нижній рядок, де y_{1d} , y_{2d} – виходи системи з тими ж регуляторами, що використані в прямий діагоналі, але включеними на ОК перехресними зв’язками, встановленим рівними нулю.)

В простих випадках за структурою динамічної моделі, підмоделі каналів якої описуються типовими ланками, можливо встановити непридатність методу RGA аналітично. Однак в загальному випадку простого методу, що не вимагає частотного аналізу чи імітаційного математичного моделювання, не запропоновано.

Частотні методи аналізу конфігурації на основі моделі динаміки

Обмеження підходу в рамках статички, призвели до розвитку методів, що враховують динамічні властивості ОК. Природньо, що для розв’язку задачі врахування динамічних властивостей ОК спершу робився акцент на методах малої розрахункової складності в частотній площині. З частотної точки зору метод RGA досліджує систему на нульовій частоті. Якщо розрахувати регулятори, то можливо досліджувати систему вже в області частот біля полоси пропускання замкненої САК – ця процедура узагальнена в роботі [29].

Недоліком деяких методів першого покоління було те, що вони орієнтувались на вибір однієї чи деяких критичних частот, на яких проводився аналіз динамічної системи. Однак, наприклад, усереднена частота зрізу САК РК, яка використовується в деяких частотних методах аналізу, може бути доволі ефемерною величиною, якщо розглядається задача керування ОК одночасно з швидкими (наприклад, тиск) й інерційними (наприклад, концентрація) параметрами. Це може робити результати такого аналізу недостовірними.

З розвитком комп’ютерних технології розрахунок амплітудно-частотних характеристик для передатної функції будь-якої структури (в т. ч. з декількома частотами зрізу) в довільному діапазоні перестав бути проблемою. Це призвело, наприклад, до появи методу ERGA, в основу якого покладено метод вибору робочої області без регулятора, орієнтуючись на критичні частоти передатних функцій моделі ОК [30].

Задача методу ERGA, як й RGA – оцінити принципово оптимальну конфігурацію для децентралізованої САК з будь-яким раціональним SISO регулятором зі зворотним зв’язком.

Для частотного аналізу важливий такий параметр як пропускна здатність. Пропуска здатність є непрямым показником часу перехідних процесів й робастності системи. Система з великою пропускною здатністю як правило має швидкі перехідні процеси. Однак, у той же час для таких систем характерна низька робастність й нестійкість до шумів. Відповідно, висока робастність, стійкість до шумів і повільні перехідні процеси характерні для систем з малою пропускною здатністю.

Для того, щоб визначити компромісний варіант між цими полюсами можливо ввести термін ефективної пропускної здатності. Ефективною пропускною здатністю можливо вважати таку, в якій відношення похибки керування до величини завдання є порівняно малою.

Алгоритм розрахунку матриці ERGA наступний.

Для кожного каналу: задатись інтервалом частот для дослідження в передатній функції; побудувати амплітудно-частотну характеристику в заданому інтервалі; за модулем амплітуди визначити початкову максимальну точку й знайти частоту, яка відповідає 0.7 цієї точки, записавши її значення в матрицю $M_{i,j}$.

Матриця критерію має наступний вигляд:

$$ERGA(P_0) = E \otimes E^{-T}, \text{ де } E(P_0) = P_0 \otimes M(P_0).$$

Для ОК (3)

$$ERGA = \begin{bmatrix} 0.93 & 0.07 \\ 0.07 & 0.93 \end{bmatrix}, \text{ де } E = \begin{bmatrix} 1.46 & 0.18 \\ -0.23 & 0.39 \end{bmatrix}.$$

Бачимо, що ERGA дає оптимальний з точки зору властивості системи подолати збурення й вийти на завдання варіант – пряму діагональ. Пряму діагональ для цього випадку, скоріш за все, запропонують й всі інші методи аналізу зв'язності каналів ОК, які враховують динаміку. Особливістю ERGA в порівнянні з іншими подібними методами є те, що вага коефіцієнтів передачі й критичних частот в цьому методі однакова.

Недоліком ERGA, як й інших методів частотного аналізу моделей каналів, є те, що для моделей високого порядку відсутній простий зв'язок між частотними й часовими властивостями ОК. Тому для ОК, який описано моделями високого порядку зі складною динамікою, метод може давати некоректні результати.

Методи аналізу конфігурації на основі моделі динаміки з використанням досягнень сучасної теорії керування й оптимізаційних алгоритмів

З розвитком інженерних математичних пакетів та можливостей комп'ютерної техніки з'явився ряд методів аналізу конфігурації, які використовують методи оптимальної й субоптимальної теорії керування [31], а також методи оптимізації.

Наприклад, можливо синтезувати багатовимірний оптимальний пропорційний регулятор для ОК й на основі аналізу отриманих матриць регулятора зробити вибір [32]. Можливо також використовувати методи визначення контрольованості й спостережності, аналізувати власні значення замкнених систем зі зворотною моделлю ОК в якості регулятора та ін. Але всі методи, які базуються на положеннях оптимальної й субоптимальної теорії керування, стикаються з проблемами формування простору станів, в якому неможливо точно представити запізнення. Треба бути уважним до представлення часових констант, щоб не отримати неспостережну чи некеровану систему і т. п. Ще одним недоліком, що витікає від структури методів, які базуються на матричних рівняннях Ляпунова й Ріккати, є залежність результатів, від масштабу вагових коефіцієнтів, що частіше за все приводе до їх емпіричного вибору.

Характерною роботою, яка формулює оптимізаційну задачу з обмеженнями, об'єктом дослідження якої є РК, є робота [33]. В цій роботі задача вибору конфігурації ускладнюється введенням вимог до робастності конфігурації і застосування для аналізу моделі збурень за складом живлення. Для розв'язку задачі застосовується пошуковий алгоритм з Matlab optimization toolbox. Ще більш складна задача ставиться в роботі [34], в якій проблема вибору конфігурації об'єднується з проблемою оптимального

налаштування децентралізованих регуляторів і розглядається як багатокритеріальна з побудовою множини Парето і вибору найкращого розв'язку з урахуванням пріоритетності критеріїв. Час оптимізації для систем 2x2 і 3x3 на сучасному ПК вимірюється в годинах, що в принципі припустимо для розв'язку задачі синтезу децентралізованих САК нескладними РК. Недоліками запропонованого методу є те, що він не враховує задачу інтегрованості й не враховує обмеження керуючих впливів. Крім того, обрані критерії оптимізації сформульовані не зовсім коректно.

Хоча цей напрямок досліджень часто дозволяє досягнути ефективних рішень й давати більш точні чи навіть оригінальні результати, однак в цілому методи цього класу виявляються занадто складними до застосування й втрачають свій універсалізм.

Методи аналізу конфігурації на основі моделі динаміки з використанням поканальної оцінки значення інтегрального критерію

Ідея цього класу методів подібна до частотних: залишаючись в межах загальної формули розрахунку RGA, змінити коефіцієнти вихідної матриці таким чином, щоб вони враховували деякий інтегральний критерій перехідного процесу. Це вимагає відповіді на два питання: який критерій доцільний і який час моделювання досліджувати. Порівняно нещодавно був запропонований комплекс методів RRA [35]. Комплекс методів перевірявся на декількох моделях РК й, на нашу думку, метод CI-TA-RRA серед 4 запропонованих одночасно простий й показовий для застосування щодо моделей ОК, які мають в своєму складі запізнення. Майже всі моделі РК описуються чи можуть бути зведені до моделей з запізненням. Формула для розрахунку елементів матриці з подібними до RGA властивостями має наступний вигляд

$$\phi_{i,j} = \frac{1}{(T_D + \tau_{\max}) - \tau_{i,j}} \cdot \int_{\tau_{i,j}}^{T_D + \tau_{\max}} y_{i,j}(t) dt,$$

де $\tau_{i,j}$ – час запізнення в каналі ОК, T_D – максимальна постійна часу в багатовимірній моделі, τ_{\max} – максимальний час запізнення в моделі.

Однак, наш досвід показав, що дещо покращує аналіз моделей РК модифікація формули

$$\phi_{i,j} = \frac{1}{(T_{i,j}^{DC} + \tau_{\max}) - \tau_{i,j}} \cdot \int_{\tau_{i,j}}^{T_{i,j}^{DC} + \tau_{\max}} y_{i,j}(t) dt$$

де $T_{i,j}^{DC}$ – постійна часу в (i,j) каналі моделі ОК.

Критерій $RRA(\Phi) = \Phi \otimes \Phi^{-T}$, де $\Phi = \{\phi_{i,j}\}$ і. Найкращою є конфігурація, в якій елементи матриці критерію обов'язково позитивні і бажано ближчі до одиниці.

Методи оцінки важливості регуляторів контурів децентралізованої САК з використанням поканальної оцінки значення інтегрального критерію

Зміна одного з завдань децентралізованого регулятора у зв'язаній САК обов'язково призведе до виникнення перехрестних впливів, які мають компенсувати інші регулятори. Таким чином по величині впливу на інші регулятори, ми можемо встановити наскільки важливим є якісне налаштування регулятора для якого була проведена зміна завдання. Оскільки, важливість контуру оцінюється в межах регулятора з працездатними налаштуваннями, аналіз впливу може допомогти інженеру

знайти тонкий баланс регуляторів, коректуючи параметри методу налаштування (час регулювання, припустиму величину перерегулювання, тощо).

Критерій розраховується наступним чином [36]

$$V_i = \frac{\sum_{j=1}^n LI_{i,j}}{\max_i \sum_{j=1}^n LI_{i,j}} \cdot 100\%,$$

де $LI_{i,j} = ISE_j / ISE_i$; ISE_i – величина суми інтегралів від квадратів всіх виходів за виключення i -го та відхилення i виходу від завдання (1% номінального значення).

Наприклад, дослідимо перехідний процес за завданням для моделі ОК (1) по двом контурам керування.

При подачі завдання двом регуляторам $r = \{(59.7 \cdot 0.01, 0.78.2 \cdot 0.01)\}$ маємо $ISE = [16.09 \ 29.55]$

$$\text{Тоді } LI = \begin{bmatrix} 1 & 1.84 \\ 0.54 & 1 \end{bmatrix}.$$

Звідки отримуємо що важливість регулятора контуру u_2 - y_1 $V_1=100\%$, а регулятора контуру u_1 - y_2 $V_2=54.43\%$.

Відмітимо, в інтегралах замість квадратів виходів можна взяти й модулі виходів (модуль похибки керування, ІАЕ). Але при цьому в розглянутому випадку важливість контурів буде майже однакова.

Висновки

1. При розв'язанні задачі синтезу систем автоматичного керування для ректифікаційних колон як об'єктів керування завжди актуальною є проблема урахування впливу перехресних впливів.

2. Зі збільшенням складності структури ректифікаційної колони (збільшення компонентів, ускладнення структури апарату з додаванням додаткових теплових зв'язків, використання вбудованого в колону реактора та ін.) ця проблема стає гострішою.

3. Типовим підходом до синтезу систем автоматичного керування ректифікаційними колонами, є розробка систем керування децентралізованої структури з автономними одновимірними регуляторами. Це можуть бути як регулятори, які знаходяться в межах класичної теорії керування, так й регулятори інших типів (адаптивні, нечіткі, нелінійні, тощо), при умові, що вони одновимірні.

4. В межах децентралізованого підходу важливою є проблема вибору каналів керування (вибору конфігурації). Від розв'язку цієї проблеми залежить стійкість систем керування у цілому, її показники якості й потенційна відповідність технологічному регламенту виробництва.

5. Методи вибору конфігурації розділяються на такі, які враховують лише коефіцієнти передачі в багатовимірній моделі об'єкту керування, й такі, які враховують також й його динамічні властивості.

6. Наразі, відсутній метод, який дає гарантований результат в усіх випадках, оскільки такий метод скоріше за все буде розрахунково більш складним, ніж просте імітаційне моделювання всіх можливих варіантів конфігурацій. Однак, відомі методи, особливо якщо використовувати не один, а декілька, можуть допомогти відмести

апріорно непрацездатні конфігурації й значно спростити процедуру синтезу децентралізованої системи керування. Аналіз стійкості конфігурацій, що залишились, в випадках складної динаміки також дозволяє вилучити без дослідження непрацюючі конфігурації. Надалі, маючи орієнтовний перелік робочих конфігурацій, при умові що їх більше одної, розробник системи керування має зробити вибір орієнтуючись на інші невраховані в методах аналізу фактори, наприклад поведінку системи керування при різних видах збурень.

7. Задача вибору конфігурації, як правило, ставиться без врахування критерію робастності й без застосування моделі збурень. Прийнято, що ці питання відносяться до задачі вибору параметрів регуляторів, а не до конфігурації.

8. Крім працездатності конфігурації при роботі всіх регуляторів бажаною для виробничих умов є властивість інтегрованості децентралізованої системи керування.

9. Першою властивістю інтегрованості є гарантія того, що система керування при вимкненні одного чи більше регуляторів, залишиться стійкою. Для оцінки такої властивості рекомендується використовувати критерій ІСІ. Другою властивістю інтегрованості є можливість послаблення регуляторів в контурах керування в сторону зменшення без втрати стійкості системи керування. В межах інтегрованої системи керування доцільно досліджувати важливість регуляторів з точки зору їх впливу на інші важливі змінні. Це дозволяє інженеру більш усвідомлено вибрати метод налаштування децентралізованого регулятора для кожного контуру керування, який дозволяє визначити не просто налаштування регулятора, а, наприклад швидкість чи відповідність деякому інтегральному критерію.

10. Більшість працюючих промислових технологій й обладнання були розроблені у 20 столітті і, частіше за все, не наприкінці його. Якість створеними за цими технологіями продукції, як правило, не може бути покращена. Тому адекватними до цих технологій були децентралізовані системи керування, які і є зараз найбільш розповсюдженими. Відмітимо, що розробка систем керування технологічним обладнанням є системною задачею. Використання децентралізованих систем керування потребувало наявності в організаційній структурі підприємства операторів, кожний з яких відслідковує функціонування окремого агрегату. Процес проектування систем керування є спрощеним і в ньому мало місця займає створення та використання сучасних багатовимірних моделей об'єктів керування, а всі неузгодженості покладено на етап налагодження системи керування в процесі пуску.

11. При переході до сучасних технологічних процесів, кіберфізичних систем, які, в випадку ректифікаційних колон, мають характеризуватися високою якістю розділення і енергоефективністю, повинні використовувати сучасні системи керування. Одночасно, перехід на цей рівень управління має змінити всю технологію розробки і впровадження таких систем, тобто вони повинні постачатися, як прийнято в комп'ютерній техніці, as is, plug and play. Основний вектор розвитку технологій розробки кіберфізичних систем в промисловості направлений на впровадження автоматично працюючих виробництв, можливо, невисокої потужності, але працюючих з високою ефективністю.

12. В наступному аналітичному огляді планується розглянути потенціал сучасних багатовимірних систем керування. Оскільки, в будь-якій багатовимірній системі можливо виділити більш важливі й менш важливі канали керування, то методи вибору конфігурації залишаються актуальними й в задачах розробки таких систем.

Список літератури

1. Skogestad S. The Dos and Don'ts of Distillation Column Control. *Chemical Engineering Research and Design*. 2007. V. 85, No 1. P. 13–23.
2. Thone M., Potters M., Baldi S. Control configurations in distillation columns: A comparative study. *European Control Conference, Aalborg*. 2016. P. 37-42.
3. Shen Y., Cai W.-J., Li S. Multivariable Process Control: Decentralized, Decoupling, or Sparse? *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2010. V. 49, No 2. P. 761–771.
4. Стопакевич А. А., Стопакевич А. А. Проектирование робастных регуляторов объектами с большим запаздыванием. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2016. Т.1, № 79. С. 48–56.
5. Sedigh A. K., Moaveni B. Control Configuration Selection for Multivariable Plants. Berlin/Heidelberg : Springer-Verlag, 2009.
6. Bristol E. On a new measure of interaction for multivariable process control. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 1966. No 11(1). P. 133–134.
7. Huyck B., Brabanter J., Moor B., Impe J., Logist F. Online model predictive control of industrial processes using low level control hardware: A pilot-scale distillation column case study. *Control Engineering Practice*. 2014. V. 28. P. 34–48.
8. Grosdidier P., Morari M., Holt B. R. Closedloop properties from steady-state gain information. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*. 1985. V. 24 (2). P. 221–235.
9. Uhlmann J. On the Relative Gain Array RGA with singular and rectangular matrices. *Applied Mathematics Letters*. 2019. V. 93. P. 52–57.
10. Zhu Z.-X. Variable Pairing Selection Based on Individual and Overall Interaction Measures. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 1996. V. 35, No 11. P. 4091–4099.
11. Fatehi A., Shariati A. Automatic pairing of MIMO plants using normalized RGA. *Mediterranean Conference on Control & Automation, Athens*. 2007. P. 1-6.
12. Hovd M., Skogestad S. Pairing Criteria for Decentralized Control of Unstable Plants. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 1994. V. 33, No. 9. P. 2134–2139.
13. Baban P. Q., Rahimabadi I. N. Input-output pairing criterion applied in the genetic algorithm for unstable linear systems. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*. 2016. V. 64, No. 4. P. 873–876.
14. Hu W., Cai W.J., Xiao G. Decentralized Control System Design for MIMO Processes with Integrators/Differentiators. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2010. V. 49, No. 24. P. 12521–12528.
15. Kadhim A. M. H., Birk W., Gustafsson T. Relative gain array estimation based on non-parametric frequency domain system identification. *IEEE Conference on Control Applications (CCA), Juan Les Antibes (France)*. 2014. P. 110-115.
16. Liao Q., Cai W., Lin C., Wang Y. Control structure selection based on Type-1 and Type-2 T-S fuzzy models for MIMO processes. *IEEE 10th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), Auckland, New Zealand*, 2015. P. 1602-1607
17. Moaveni B., Sedigh A. K. Further Theoretical Results on “Relative Gain Array for Norm-Bounded Uncertain Systems”. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2007. V. 46, No 24. P. 8288–8289.
18. Kariwala V., Skogestad S., Forbes J. F. Relative Gain Array for Norm-Bounded Uncertain Systems. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2006. V. 45, No 5. P. 1751–1757.

19. Jain A., Babu B. V. RGA Analysis of Dynamic Process Models Under Uncertainty. New Delhi: Springer India, 2014. ISBN 978-81-322-1602-5.
20. Glad T. Extensions of the RGA concept to nonlinear systems. *European Control Conference, ECC*. 1999. P.1-6.
21. Skogestad S., Morari M. Implications of large RGA elements on control performance. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 1987. V. 26. P. 2323–2330.
22. Arranz M. C., Birk W., Kadhim A. On guided and automatic control configuration selection. *22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*. 2017. P.1-6.
23. Стопакевич А. А., Стопакевич А. А. Разработка живучих систем управления технологическими установками. *Проблемы региональной энергетики*. 2021. Т. 50, № 2. С. 114–126.
24. Häggblom K. Partial Relative Gain: A New Tool for Control Structure Selection. *AIChE Annual Meeting*, Los Angeles, CA. 1997. Paper 193h.
25. Wolff E.A., Skogestad S. Operation of Integrated Three-Product (Petlyuk) Distillation Columns. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 1995. V. 34. P. 2094–2103.
26. Skogestad S. Dynamics and Control of Distillation Columns - A Critical Survey. Modeling, Identification and Control: A Norwegian Research Bulletin. 1997. V. 18, No 3. P. 177–217.
27. Grosdidier P., Morari M. Interaction measures for systems under decentralized controll. *Automatica*. 1986. № 22 (3). P. 309–319.
28. Стопакевич А. А. Спектр многомерных моделей колонны ректификации нефти для синтеза робастных систем управления. *Холодильна техніка та технологія*. 2015. Т. 51. № 6. С. 94-99.
29. Wolff E.A., Skogestad S., Hovd M., Mathisen K.W. A Procedure for Controllability Analysis. Interactions Between Process Design and Process Control. Oxford: Pergamon Press, 1992. P. 127–132.
30. Xiong Q., Cai W.J., He M.J. A Practical Loop Pairing Criterion for Multivariable Processes. *Journal of Process Control*. 2005. No 15 (7). P. 741–747.
31. Стопакевич А.А. Системный анализ и теория сложных систем. Одесса: Астропринт, 2013. 350 с. ISBN 978-966-190-760-6.
32. Halvarsson B., Carlsson B., Wik T. A New Input/Output Pairing Strategy based on Linear Quadratic Gaussian Control. *IEEE International Conference on Control and Automation* 2009. P.978–982.
33. Agustriyanto R., Zhang J. Worst case of relative disturbance gain array for uncertain distillation system. *Journal of Technology Series*. 2013. V. 16, No 2. P.135-143.
34. Huilcapi V., Blasco X., Herrero J., Reynoso-Meza G. A Loop Pairing Method for Multivariable Control Systems Under a Multi-Objective Optimization Approach. *IEEE Access*. 2019. V. 7. P. 1.
35. Jain A., and B. V. Babu. Relative Response Array: A New Tool for Control Configuration Selection. *International Journal of Chemical Engineering and Applications*. 2015. V. 6, No 5. P. 356–362.
36. Rahman A. Detection of Control Loop Interaction and Prioritization of Loop Maintenance. *Dhaka: Bangladesh university of engineering and technology*, 2011. 83p.

ANALYTICAL REVIEW OF DISTILLATION COLUMNS DECENTRALIZED CONTROL SYSTEMS DESIGN METHODSA.O. Stopakevych¹, O.A. Stopakevych²¹National University of Intellectual Technologies and Communications,
1, Kuznechna street, Odessa, 65029, Ukraine, stopakevich@gmail.com²National Odessa Polytechnic University,
1, Shevchenko Ave., Odessa, 65044, Ukraine, stopakevich@op.edu.ua

The problem of distillation columns control systems design is actual for many years. When solving the problem of automatic control systems design for distillation columns, the problem of cross-coupling is always relevant. This problem becomes only more severe with increasing the distillation column structure complexity. The column complexity is connected, for example, with number of components, number of additional thermal flows, usage of the built-in column reactor, etc. Standard approach for design of distillation columns automatic control systems is to develop control systems of decentralized structure. Such systems contain autonomous SISO controllers. These can be both controllers, developed within the framework of classical control theory and controllers of other types (adaptive, fuzzy, nonlinear, etc.), assuming that they are SISO. The problem of selecting control pairings (configuration selection) is important within the framework of the decentralized approach for control system design. From the solution of this problem depends the stability of the control system as a whole, its quality indicators and potential compliance with the technological production operating protocol. Methods of choosing the decentralized control system configuration on the basis of distillation columns steady state and dynamics models are considered. Advantages and disadvantages of configuration choosing methods such as RGA, RIA, ERGA, RRA are considered. The features and limitations of each method is shown on the examples of distillation columns models. Additionally, attention is drawn to the methods of selecting a configuration that is resistant to disconnection of individual controllers. The method of calculation of the Niederlinski NI index and the LII index is considered. The application of PRGA matrices for complex plants and the calculation of the ICI integration on PRGA basis are presented on an example.

Keywords: decentralized control system configuration, distillation column, Niederlinski index, Bristol matrix, RGA, PRGA, NI, RRA, ERGA, ICI, LII, integrability.