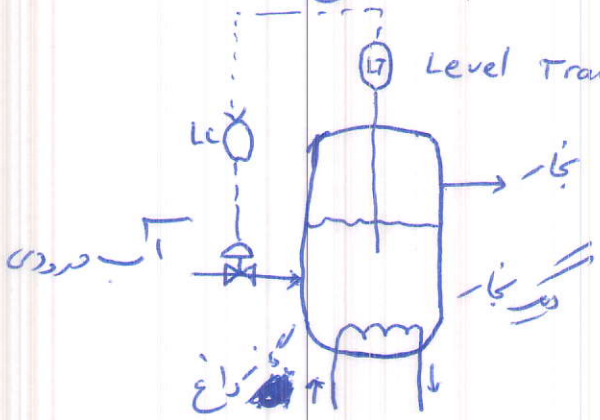
فصل ۱۰ : حلقه‌های کنترل پیشرفته

کنترل کننده‌هایی که تاکنون بررسی کردیم کنترلرهای پایه بودند که فقط از فیدبک استفاده می‌کردند. این کنترلرها برای فرآیندهای پیچیده و متداخل کارآیی خوبی ندارند. حفظ آرایش خروجی - حذف خروجی با به کارگیری کنترلرهای پیشرفته‌ای را بکار برد. در این فصل ۵ کنترلر جدیدتر معرفی می‌کنند: ۱- کنترل پیشرو ۲- کنترل پیشرو - پسرو ۳- کنترل متداخل ۴- جبران کننده تأخیر زمانی ۵- جبران کننده Decoupling

۱- کنترل پیشرو

در کنترل پسرو (فیدبک)، خروجی اندازه‌گیری شده، با مرجع مقایسه می‌شود و سیگنال کنترل ساخته می‌شود. اگر بسیستم یک بزاحم وارد شود که قابل اندازه‌گیری باشد برای حذف آن می‌توانیم از کنترل پیشرو استفاده کنیم.



مثال: دیگ بخار:

هدف: نگهداشتن سطح مایع در یک سطح مطلوب

ورودی: دبی آب ورودی

خروجی: سطح مایع (دقت شود)

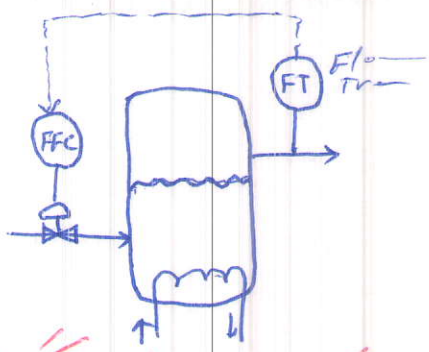
ورودی‌های مزاحم: - بار خروجی

- (آیا دمای آب ورودی نیز ورودی مزاحم است؟)

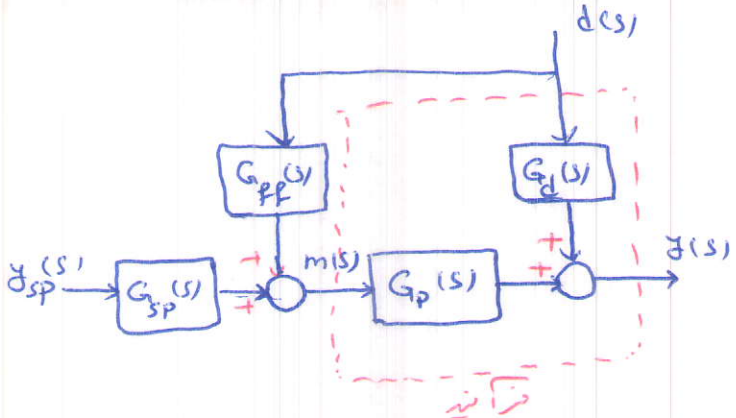
اگر از کنترل ساده، فیدبک استفاده کنیم مشکلات زیر ایجاد می‌شود:

- سطح مایع به دلیل حباب‌های ریز دوغاب و تلاطم نوسانات زیادی دارد لذا کنترلر حتماً باید گشتاور باشد. (اگر دیفرانسیل باشد)
- با افزایش بخار خروجی، فشار گاز (بخار) وارد بر سطح کنترل شده، حباب‌های بزرگتر تشکیل می‌شود لذا ورودی لوله‌ی انتقال آب را کاهش می‌دهد. با کاهش دبی ورودی بسته شود یا حداقل دبی آب ورودی افزایش، کاهش دهد سطح را
- با افزایش بخار خروجی، سطح واقعی مایع کم شده، نوسانات سطح بیشتر می‌شود که باز هم خطای سطح بیشتر می‌شود
- دقیقاً عکس مطالب بالا نیز می‌تواند ایجاد شود

برای رفع مشکل یک راه حل این است که بجای استفاده از سنسور سطح، فلو یا فشار بخار خروجی را اندازه گیری کنیم و براساس آن میزان ورودی را تنظیم کنیم.



کنترل پیش‌خور سطح مایع در مبدل بخار



هدف کنترل: $y(s) = y_{sp}(s)$

$$y(s) = G_p(s)\,m(s) + G_d(s)\,d(s)$$ معادله فرآیند

$$y(s) = y_{sp}(s) = G_p(s)\,m(s) + G_d(s)\,d(s) \rightarrow m(s) = \left[\frac{1}{G_p}y_{sp} - \frac{G_d}{G_p}d\right]$$

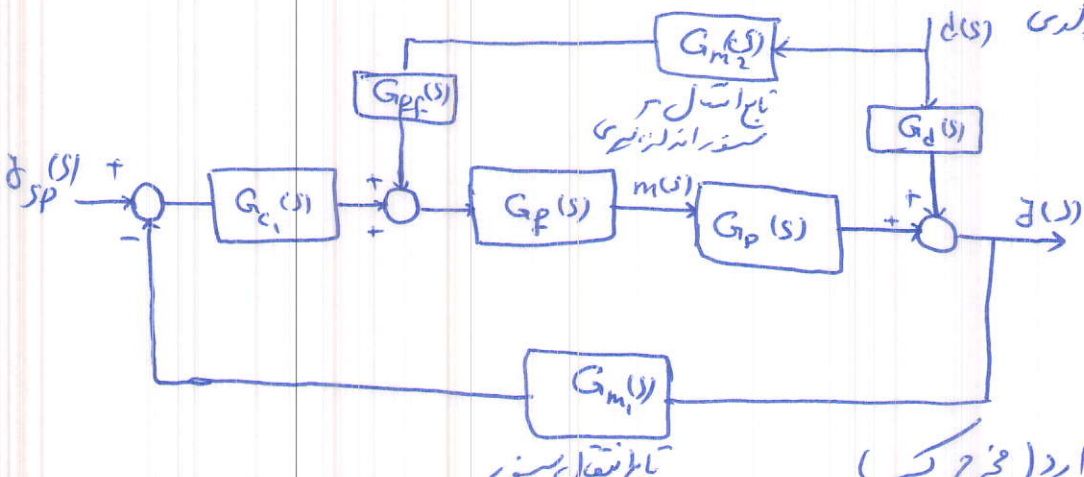
$$G_{ff}(s) = -\frac{G_d}{G_p} \quad , \quad G_{sp}(s) = \frac{1}{G_p(s)}$$

چند نکته اساسی

- در این روش باید مدل فرایند، مدل (تابع انتقال) مزاحم دقیقاً معلوم باشد.
- کنترل کننده بهبود آمده، کنترل کننده ساده نبوده و معمولاً باید توسط کامپیوتر ساخته شود.
- کنترل کننده ممکن است علی نباشد.
- ممکن است چند ورودی مزاحم وجود داشته باشد.

کنترل پیشرو - پسرو

مزایا و معایب کنترل پیشرو در بخش قبل بررسی شد. برای کامل شدن بحث، حلقه‌های اندازه‌گیری، ورودی‌های مزاحم غیرقابل اندازه‌گیری، از ترکیب کنترل پیشرو و پسرو استفاده می‌شود.



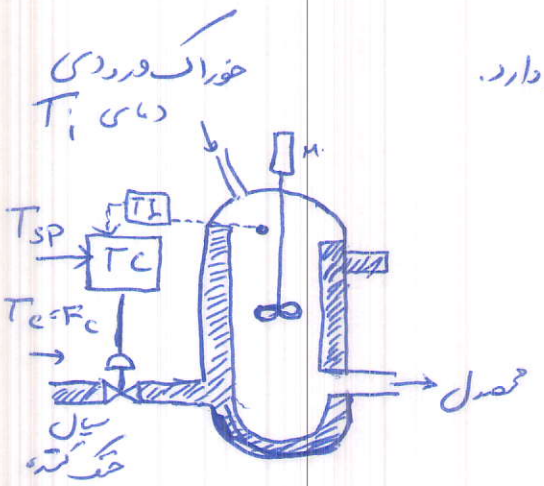
$$y(s) = \frac{G_p G_f G_{c_1}}{1 + G_p G_f G_{c_1} G_{m_1}}\,y_{sp} + \frac{G_d + G_p G_f G_{ff} G_{m_2}}{1 + G_p G_f G_{c_1} G_{m_1}}\,d$$

$$G_{ff} = -\frac{G_d}{G_p}$$

نکته: FF در پایداری نقشی ندارد (مخرج کسر)

کنترل تودرتو (متداخل Nested control)
Cascade کنترل آبشاری ~

در کنترل متداخل، یک متغیر کنترل و چند متغیر اندازه‌گیری وجود دارد.



مثال: مخزن CSTR
(Continuously stirred tank reactor)

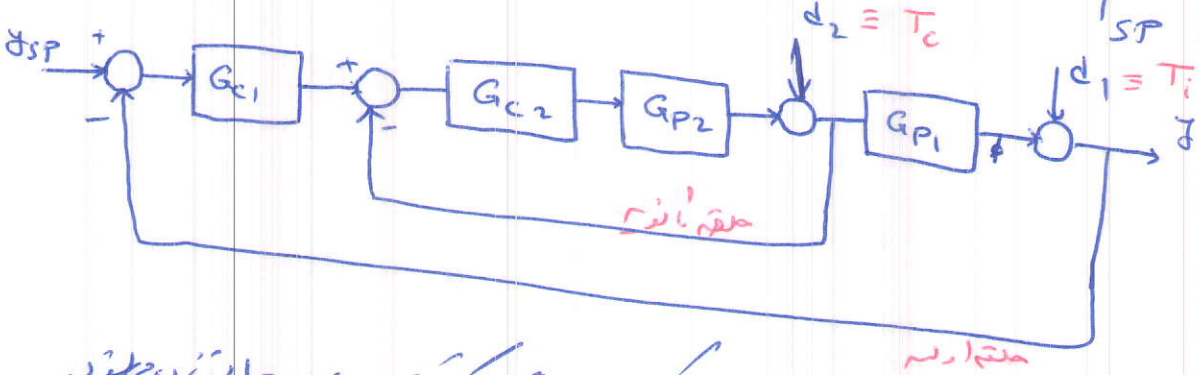
در کنترل واکنش شیمیایی انجام می‌گیرد که گرمازاست.

هدف کنترل تنظیم دمای سیال است. (دمای محصول)

ورودی کنترل: دبی سیال خنک کننده (F_c)
یا متغیر کنترل

ورودی‌های مزاحم: T_i - دمای سیال ورودی (مستقیم بر خروجی تأثیر می‌گذارد ← مزاحم خروجی)
T_c - دمای سیال خنک کننده (بر ورودی تأثیر دارد ← اغتشاش ورودی)

نقاط تنظیم: T_{SP}



حلقه ثانویه دمای جداره خنک کننده را کنترل می‌کند. معمولاً از یک کنترل‌کننده P استفاده می‌شود.

حلقه اولیه دمای محصول را (اصلی) در این حلقه هم بیشتر از یک کنترل‌کننده مهم است.

خطای حالت دائم (افست) در این حلقه مهم نیست. معمولاً از کنترل‌کننده PI استفاده می‌شود.

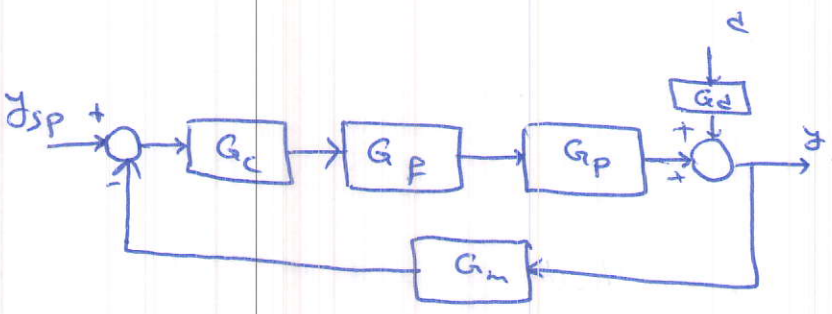
حلقه اولیه مربوط به کنترل دمای سیال داخل است. در این حلقه کنترل‌کننده PI قوی‌تر است.

اگر حلقه ثانویه وجود نداشته باشد اثر T_c ابتدا در خروجی دیده می‌شود تا خنثی شود درحالیکه در اینجا حلقه ثانویه که سرعت بالایی دارد اثر تغییرات T_c را قبل از آنکه به خروجی برسد خنثی می‌کند.

اغتشاش d_1 که مستقیماً بر خروجی تأثیر می‌گذارد توسط حلقه اولیه خنثی می‌شود

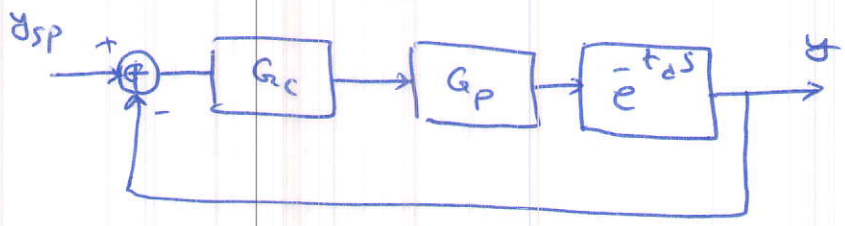
مزیت این روش بر کنترل پیشرو - پسرو عدم حساسیت بالای مدل فرایند می‌باشد.

جبران کننده تأخیر زمانی (پیش بین اسمیت)

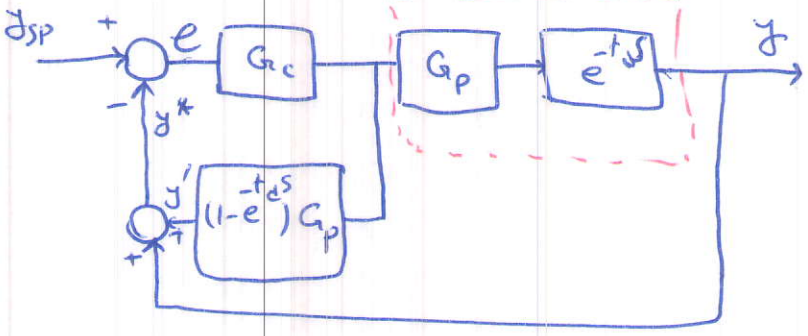


در سیستم تأخیر G_m و G_p (measure و actuator) تأثیر بازخوردی و عکس‌العمل تأخیر در سنسور اندازه‌گیری تأخیر در اندازه‌گیری تأخیر در اعمال

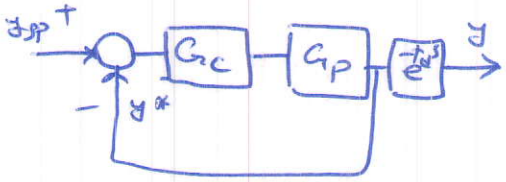
III



فرایند



≡

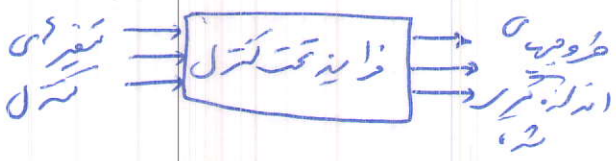


$$y = (G_c G_p e^{-t_d s})\, e \qquad y^* = y + y' = G_p G_c e$$

$$y' = (1 - e^{-t_d s})\, G_p G_c e$$

- مدل فرایند دقیق نمی‌باشد بنابراین تأخیر هیچ وقت کامل جبران نخواهد شد ولی باز هم این روش مؤثر است.
- تقریب تأخیر بهتر است به پایین انجام شود (کرانه پایین)

کنترل کننده مجزا ساز (Decoupling) برای سیستم‌های چند متغیره



مشخصه سیستم‌های چند متغیره

- اثر متقابل ← پایداری و عملکرد
- همه حلقه‌های کنترل باید در حال عمل کنند (واشنبی کنترل به کل فرآیند)
- بررسی تزویج ورودی، خروجی و تشکیل حلقه
- حساسیت برخی از سیستم‌ها به خطا در مدل و سختی کنترل بیت به تک متغیره

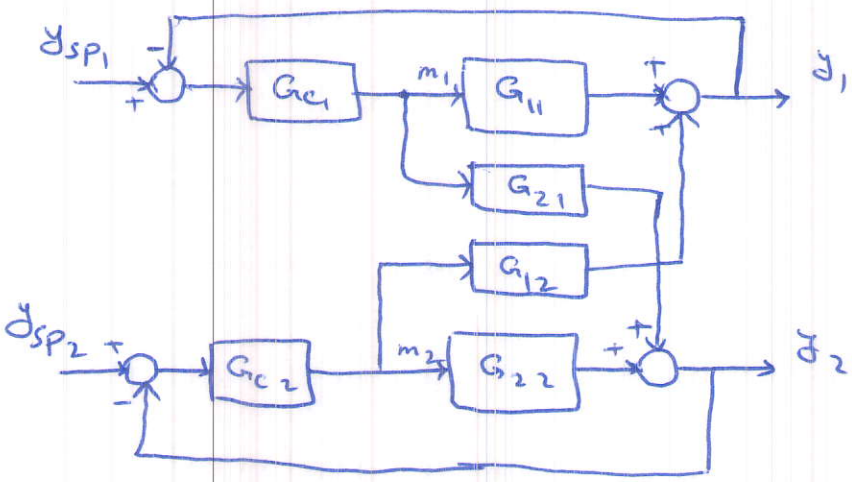
فرآیند تقطیر برج تقطیر مثال کتاب

$$\begin{bmatrix} x_D \\ x_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{360\,e^{-0.3s}}{1+3s} & \frac{130\,e^{-0.4s}}{1+2.5s} \\ \frac{130}{1+1.5s} & \frac{-16}{1+s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ Q_{reb} \end{bmatrix}$$

ورودی خروجی

با بازگرد

تأثیر متقابل ورودی‌ها بر خروجی‌ها کاملا مشهود است.



توضیح چرخه اثر متقابل

- تغییر m_1 برای اصلاح y_1
- تأثیر بر y_2
- تغییر m_2 برای اصلاح y_2
- تأثیر بر y_1
- تغییر m_1 برای اصلاح y_1
- ⋮

برای سیستم‌های MIMO موارد زیر را باید در نظر گرفت:

- یافتن روشی برای اندازه‌گیری اثر متقابل (روش آرایه‌های بهره نسبی RGA)
- یافتن روشی برای حذف اثر متقابل (Decoupling)

اندازه‌گیری اثر متقابل

۱ در شکل قبل، همهٔ حلقه‌ها را باز کنید. یک واحد به m_1 اعمال کنید. y_1 را طریق G_{11} تغییر می‌کند. در حالت ما مقدار بهره را k_{11} بنامید.

$$\Delta y_{1m_1} = k_{11}$$

۲ حلقهٔ اول باز و حلقهٔ دوم بسته و اعمال یک واحد به m_1

- تغییر در y_1 از طریق G_{11} و G_{12} (تغییر m_2 چون حلقهٔ دوم بسته است)
- تغییر y_1 از طریق G_{21} و اصلاح آن توسط m_2

$$\Delta y_1^* = \Delta y_{1m_1} + \Delta y_{1r}$$

Δy_{1m_1} قبلاً بدست آمده است پس Δy_1^* قابل محاسبه است. (Δy_1^* قابل اندازه‌گیری است)

$$\lambda_{11} = \frac{\Delta y_{1m_1}}{\Delta y_{1m_1} + \Delta y_{1r}}$$

← معیاری برای کنترل بودن y_1 توسط m_1

همین آزمایشات را می‌توان برای بررسی تأثیر تغییر m_2 انجام داد

چگونگی (روش) تشکیل زوج مناسب حلقه‌ها براساس تحلیل اثر متقابل

حذف λ_{11} سهم تغییر (تأثیر) متغیر m_1 روی y_1 از مجموع تغییر ناشی از عامل سیگنال روی y_1

۱- اگر $\lambda_{11} = 1$

یعنی m_1 روی y_2 تأثیر ندارد در نتیجه m_2 نیز روی y_1 تأثیر نخواهد داشت

بهترین انتخاب آن است که m_1 برای کنترل y_1 بکار رود.

۲- $\lambda_{11} = 0$

m_1 روی y_1 تأثیر ندارد.

۳- $0 < \lambda_{11} < 1$

اثر متقابل

افزایش m_1 ← y_1 ↑

$\lambda > 0.5$ زوج (m_1, y_1) خوب است

$\lambda < 0.5$ ~ (m_1, y_2) خوب است.

۴- $\lambda_{11} > 1$

یعنی Δy_{12} تغییرات اگر λ_{11} نزدیک $\frac{1}{2}$ باشد زوج (m_1, y_1) از هم جدا است و برای y_1 کنترل m_1 بسیار سخت است.

۵- $\lambda_{11} < 0$

در این حالت جهت اثر متقابل و مستقیم خلاف یکدیگر است. کنترل بسیار مشکل است.

۲- ماتریس بهره نسبی (RGA)

در حالت کلی

$$\lambda_{ij} = \frac{\left.\frac{\partial y_i}{\partial m_j}\right|_{\text{وقتی همه حلقه‌ها باز هستند}}}{\left.\frac{\partial y_i}{\partial m_j}\right|_{\text{وقتی همه حلقه‌ها بجز حلقه } j \text{ ام هستند}}}$$

$$\Lambda = [\lambda_{ij}] \qquad \lim_{s \to 0} G(s) = k = [k_{ij}] \quad \begin{matrix} i = 1 \dots n \\ j = 1, \dots, m \end{matrix}$$

$$\Lambda = k \times (k^{-1})^T$$

ضرب مولفه به مولفه

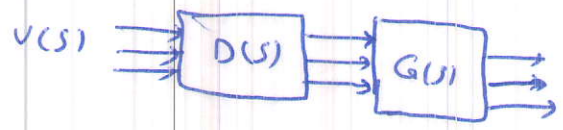
مثال: $G(0) = k = \begin{bmatrix} 12.8 & -18.9 \\ 6.6 & -19.4 \end{bmatrix}$ $\qquad (k^{-1})^T = \begin{bmatrix} 0.157 & 0.053 \\ -0.153 & -0.104 \end{bmatrix}$

$$\Lambda = \begin{bmatrix} 2 & -1 \\ -1 & 2 \end{bmatrix}$$

نکته: حلقه‌های کنترلی را باید باهم جفت کرد که عنصر λ_{ij} ورودی m_j به خروجی y_i مربوط باشد که λ_{ij} مثبت و تا جایی که ممکن است نزدیک به $\frac{1}{2}$ باشد.

طراحی حلقه‌های کنترل بدون اثر متقابل

پس از انتخاب حلقه‌های کنترل باید از جبران‌کننده (Decoupler) برای حذف اثر متقابل استفاده کرد.



$$Q(s) = G(s)\, D(s)$$

$D(s)$ را باید به گونه‌ای یافت که $Q(s)$ ماتریس قطری شود

مثلاً برای سیستم 2×2 می‌توان نوشت:

$$m_1 = v_1 + d_{12}(s)\, v_2 \qquad y_1(s) = G_{11}(s) m_1 + G_{12}(s) m_2$$

$$m_2 = v_2 + d_{21}(s)\, v_1 \qquad y_2(s) = G_{21}(s) m_1 + G_{22}(s) m_2$$

$$\Rightarrow \quad y_1 = (G_{11} + G_{12} d_{21})\, v_1 + [G_{11} d_{12} + G_{12}] v_2$$

$$y_2 = [G_{21} + G_{22} d_{21}]\, v_1 + [G_{21} d_{12} + G_{22}]\, v_2$$

حال باید d_{12} و d_{21} طوری انتخاب شوند که اثر تغییر v_2 روی y_1 و v_1 روی y_2 حذف شود.

$$\Rightarrow \begin{cases} G_{11} d_{12} + G_{12} = 0 \rightarrow d_{12} = -\dfrac{G_{12}}{G_{11}} \\ G_{21} + G_{22} d_{21} = 0 \rightarrow d_{21} = -\dfrac{G_{21}}{G_{22}} \end{cases}$$

چند نکته

- برخلاف RGA که براساس حالت ماندگار است، دکوپلینگ براساس تابع انتقال بوده و این مشکل را بنابراین نمی‌توان اثر تغییر را حذف می‌کند.
- ساختار روش دکوپلینگ شبیه آنالیز به مدل فرآیند است.
- ممکن است d_{12} و d_{21} بدست آمده علّی باشند