3 Zustandsregler

Ziel dieser Übung ist der Entwurf einer geeigneten Regelung für ein dynamisches System. Im Unterschied zur vorherigen Übung sollen nun Zustandsregler für das im vorigen Kapitel eingeführte Modell einer Gleichstrommaschine entworfen werden.

Die benötigten Grundlagen wurden in der VU Automatisierung vorgestellt. Studieren Sie daher zur Vorbereitung dieser Übung das folgende Skriptum:

- Skriptum zur VU Automatisierung (WS 2015/16) [3.1]
  - Kapitel 1 bis Kapitel 8

Bei Fragen oder Anregungen zu dieser Übung wenden Sie sich bitte an

- Christoph Fröhlich `<froehlich@acin.tuwien.ac.at>` oder
- Paul Zeman `<zeman@acin.tuwien.ac.at>`.

3.1 Zustandsreglerentwurf für die Gleichstrommaschine mit Propeller

Aufgabe 3.1. In dieser Aufgabe soll für die Gleichstrommaschine mit Propeller eine Drehzahlregelung mithilfe eines zeitdiskreten Zustandsreglers entworfen werden. Der Reglerentwurf erfolgt dabei am linearisierten, reduzierten Modell aus Aufgabe 2.3. Als Abtastzeit für den Regler gelte $T_a = 10$ ms. Bearbeiten Sie dazu die nachfolgenden Teilaufgaben:

1. Eine wesentliche Systemanforderung für den Zustandsreglerentwurf ist das Vorhandensein der vollständigen Erreichbarkeit. Berechnen Sie die zeitdiskrete Zustandsraumdarstellung des linearisierten, reduzierten Systemmodells aus Aufgabe 2.3 für die Abtastzeit $T_a = 10\,\mathrm{ms}$ und weisen Sie nach, dass das System vollständig erreichbar bezüglich des Systemeingangs Δu ist [3.1].

   Hinweis: Mithilfe des MATLAB-Befehls `ctrb` können Sie die Erreichbarkeitsmatrix des zeitdiskreten Systems berechnen. Weiters existieren in MATLAB die folgenden nützlichen Befehle `ss` und `c2d`..

2. Entwerfen Sie einen zeitdiskreten Zustandsregler der Form

$$\Delta u_k = \mathbf{k}^{\mathrm{T}} \Delta \mathbf{x}_{red,k} + g \Delta r_k, \tag{3.1}$$

mit dem die Propeller-Drehzahl $\Delta\omega_P$ der Sollgröße Δr folgt. Alle weiteren Anforderungen für den Reglerentwurf sind Aufgabe 2.5 zu entnehmen. Bestimmen Sie den Rückführungsvektor $\mathbf{k}$ und den Parameter g so, dass der geschlossene Kreis die Pole $p_j = \exp(\lambda_0 T_a), j = 1 \ldots 3$ mit einem geeigneten $\lambda_0 \in \mathbb{R}$ besitzt und begründen Sie die Wahl dieser Pole.

Hinweis: Zur Bestimmung des Rückführungsvektors $\mathbf{k}$ kann in MATLAB der Befehl `acker` verwendet werden. Achten Sie bei der Verwendung auf die vom Skriptum abweichende Vorzeichenkonvention.

Aufgabe 3.2. Implementieren Sie den Zustandsregler aus Aufgabe 3.1 in SIMULINK am linearen Entwurfsmodell. Achten Sie darauf, dass die Abtastzeit des Reglers entsprechend gesetzt ist und der Regler tatsächlich zeitdiskret berechnet wird. Betrachten Sie dazu einen Sollgrößensprung und achten Sie insbesondere auf die Einhaltung der Stellgrößenbegrenzung sowie auf das Verschwinden der bleibenden Regelabweichung. Falls Ihr Regler die gestellten Anforderungen nicht erfüllt, führen Sie den Entwurf in Aufgabe 3.1 erneut durch.

Implementieren Sie nun den Zustandsregler am nichtlinearen Modell (2.7) der Gleichstrommaschine und achten Sie auf eine korrekte Aufschaltung der Ruhelagen. Prüfen Sie erneut die Einhaltung der Anforderungen. Überlegen Sie sich, warum der Regler die Anforderung in Bezug auf die bleibende Regelabweichung prinzipiell nicht erfüllen kann.

Aufgabe 3.3. Um auch im Falle von Abweichungen der Strecke vom nominellen System sowie von auftretenden Störungen die bleibende Regelabweichung zu unterdrücken, ist in dieser Aufgabe ein zeitdiskreter PI-Zustandsregler der Form

$$x_{I,k+1} = x_{I,k} + (\underbrace{\Delta r_k - \mathbf{c}^{\mathrm{T}}\Delta\mathbf{x}_{red,k}}_{\Delta y_k}) \tag{3.2a}$$

$$\Delta u_k = \begin{bmatrix} \mathbf{k}_x^{\mathrm{T}} & k_I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{x}_{red,k} \\ x_{I,k} \end{bmatrix} + k_P(\underbrace{\Delta r_k - \mathbf{c}^{\mathrm{T}}\Delta\mathbf{x}_{red,k}}_{\Delta y_k}) \tag{3.2b}$$

zu entwerfen. Für den Reglerentwurf gelten die gleichen Anforderungen wie in Aufgabe 3.1. Welche Anforderungen hinsichtlich Erreichbarkeit werden an das System gestellt und sind diese erfüllt? Orientieren Sie sich bei der Bestimmung der Reglerparameter $\mathbf{k}_x$, k_P und k_I an der Vorgehensweise im Skriptum [3.1].

Prinzipiell könnte der PI-Zustandsregler der Form (3.2) in SIMULINK als zeitdiskretes Blockdiagramm aufgebaut werden. Eine übersichtlichere Darstellung des Regelalgorithmus erhält man durch eine Realisierung in Form eines MATLAB Function Blocks. Um einen reibungslosen Ablauf der Reglerimplementierung am zugehörigen Laboraufbau zu ermöglichen, realisieren Sie Ihren Regler in Form eines MATLAB

Function Blocks, bei dem Sie die folgende Schnittstelle vorsehen:

```
function du = fcn(dx, dr, sw, parReg)
```

Die Blockeingänge `dx` und `dr` bezeichnen den Zustand $\Delta \mathbf{x}_{red}$ und die Sollgröße Δr und der Blockausgang `du` die berechnete Stellgröße Δu. Der Blockeingang `sw` dient zum Deaktivieren des Reglers: Gilt `sw=0`, soll die Integration angehalten werden und der Reglerausgang auf `du=0` gesetzt werden. Achten Sie auf eine korrekte Aufschaltung der Ruhelagen außerhalb des Blocks. Die Reglerparameter $\mathbf{k}_x$ k_I und k_P werden als Parameter in der Struktur `parReg` an den Block übergeben. Dazu muss diese im „Ports and Data Manager" (Menüeintrag „Edit Data") des MATLAB Function Blocks als „Parameter" gekennzeichnet werden, womit sie direkt aus dem MATLAB-Workspace entnommen wird. Berücksichtigen Sie weiters die zeitdiskrete Form des Zustandsreglers, indem Sie die Abtastzeit für den MATLAB Function Block vorgeben. Verifizieren Sie den Reglerentwurf anschließend am nichtlinearen Modell (2.7) der Gleichstrommaschine.

Hinweis: Für die Verwendung von Matlab Function Blöcken steht Ihnen auf der Homepage in der Datei `uebung3.zip` das SIMULINK Modell `matlabfunction.slx` zur Verfügung. Dort ist gezeigt, wie ein zeitdiskretes LTI-System mit einem MATLAB Function Block und unter Verwendung von `persistent`-Variablen simuliert werden kann.

Aufgabe 3.4 (Störverhalten). Vergleichen Sie den Kompensationsregler aus Aufgabe 2.5 mit dem PI-Zustandsregler von Aufgabe 3.3 am nichtlinearen Modell (2.7).

1. Bewerten Sie das Führungsverhalten der verschiedenen Regelungsstrategien für einen Sollgrößensprung $\Delta r = 20\,\mathrm{rad\,s^{-1}}\sigma(t-1)$.

2. Untersuchen Sie das Verhalten der Regler für eine Störung der Form $M_{ext} = -0.5\,\mathrm{N\,m}\sigma(t-5)$.

3.2 Literatur

[3.1] A. Kugi, *Skriptum zur VU Automatisierung (WS 2015/2016)*, <http://www.acin.tuwien.ac.at/?id=42>, Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik, TU Wien, 2015.