

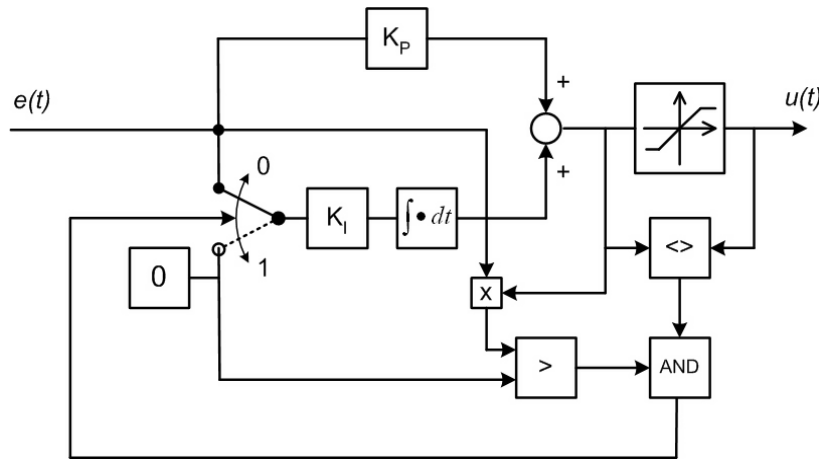
Tab. 6.1. Parametry silnika

Lp.	Parametr	Symbol	Jednostka	Wartość
1	Moc znamionowa	P_N	kW	1.5
2	Napięcie znamionowe Δ/Y	U_{Δ}/U_Y	V	127/220
3	Prąd znamionowy Δ/Y	I_{Δ}/I_Y	A	12.0/6.9
4	Prędkość znamionowa	n_N	obr / min	930
5	Rezystancja stojana (dla 25 °C)	R_s	Ω	1.540
6	Rezystancja wirnika	R_r	Ω	1.294
7	Indukcyjność stojana	L_s	mH	100.4
8	Indukcyjność wirnika	L_r	mH	96.9
9	Indukcyjność wzajemna	L_m	mH	91.5
10	Liczba par biegunów	p_b	–	3
11	Moment bezwładności	J	kg m ²	0.15

Wykorzystany układ regulacji zawiera cztery regulatory typu PI. Liniowy regulator PI realizuje zależność

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt, \quad (6.21)$$

gdzie: u - sygnał sterujący, e - uchyb regulacji, K_P , K_I - wzmacnienia odpowiednio w torze proporcjonalnym i całkującym. Praktyczna realizacja struktury (6.21) wymaga wprowadzenia ograniczenia na sygnał wyjściowy regulatora, z jednoczesnym modyfikowaniem działania części całkującej. Związane jest to z tzw. efektem *windup'u* [170]. Zagadnienie *anti-windup'u* jest szeroko omawiane w literaturze (np. [171, 172, 173, 174]). Proponowane coraz to nowsze rozwiązania wskazują na brak algorytmu “idealnego”. Autorzy podkreślają konieczność projektowania sposobu ograniczania części całkującej w zależności od obiektu regulacji. Najpopularniejsze schematy *anti-windup'u* można podzielić na dwie grupy. Pierwsza z nich zawiera algorytmy wprowadzające ujemne sprzężenie zwrotne obejmujące część całkującą (ang. *tracking anti-windup, back-calculation*), natomiast druga - algorytmy realizujące odcinanie całkowania (ang. *conditional integration, clamping*). W układzie regulacji z rysunku 6.1 wykorzystano regulatory nieliniowe z warunkowym całkowaniem jak na rysunku 6.2. Decyzję o zastosowaniu takiego, a nie innego algorytmu *anti-windup'u*, podjęto po porównawczych badaniach kilkunastu rozwiązań znanych autorowi z literatury. Wybrana struktura regulatorów zapewnia dobre właściwości dynamiczne układu przy jednocześnie małych przeregulowaniach. Nastawy regulatorów dobrano wstępnie przy pomocy Matlab[®] NCD Blockset oraz dostrojono metodą prób i błędów. Przechodząc do realizacji dyskretnej nieliniowego regulatora PI z *anti-windup'em*, należy wybrać pomiędzy algorytmem pozycyjnym (bezwzględny) i prędkościowym (przyrostowym). Jedne strategie



Rys. 6.2. Nieliniowy regulator typu PI z anti-windup'em zrealizowanym poprzez warunkowe całkowanie [172, 174]

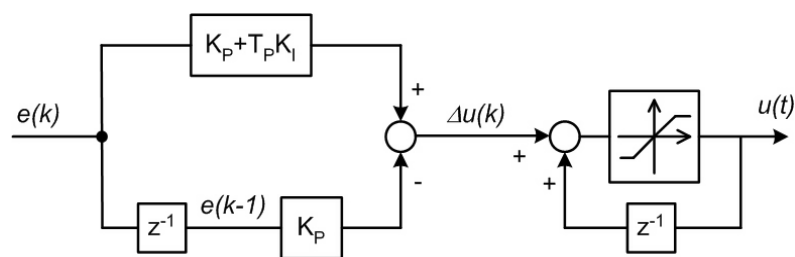
anti-windup'u są wygodniejsze w realizacji przy wykorzystaniu algorytmu prędkościowego (np. tracking anti-windup), inne zaś dedykowane są realizacji prędkościowej. Dyskretyzacja zależności (6.21), przy założeniu $\dot{u}(t = kT_P) \approx \frac{u(k) - u(k-1)}{T_P}$ oraz $\dot{e}(t = kT_P) \approx \frac{e(k) - e(k-1)}{T_P}$, prowadzi do równania

$$u(k) = u(k-1) + K_P e(k) + T_P K_I e(k) - K_P e(k-1), \quad (6.22)$$

gdzie T_P oznacza okres próbkowania. Oznaczając $\Delta u(k) = u(k) - u(k-1)$, otrzymujemy

$$\Delta u(k) = K_P e(k) + T_P K_I e(k) - K_P e(k-1). \quad (6.23)$$

Zależność (6.23) opisuje postać prędkościową algorytmu PI. Szeregowe rozbudowanie tej struktury o sumator z nasyceniem (rys. 6.3), prowadzi do uzyskania ograniczonych bezwzględnych wartości sygnału sterującego, bez konieczności implementowania dodatkowej logiki właściwej realizacji ciągłej z rysunku 6.2. Zaletą algorytmu prędkościowego jest brak zjawiska windup'u integratora. Odpowiednie rozbudowanie algorytmu prędkościowego do pozycyjnego pozwala na skuteczną realizację nieliniowego regulatora typu PI, generującego bezwzględne wartości sterowania. Strukturę z rysunku 6.3 wykorzystano przy realizacji układu eksperymentalnego.



Rys. 6.3. Dyskretna realizacja nieliniowego regulatora PI

- [160] A. Hyvärinen. Survey on independent component analysis. *Neural Computing Surveys*, 2:94–128, 1999.
- [161] L. Parra and P. Sajda. Blind source separation via generalized eigenvalue decomposition. *Journal of Machine Learning Research*, 4:1261–1269, 2003.
- [162] A. Hyvärinen and E. Oja. Independent component analysis by general non-linear hebbian-like learning rules. *Signal Processing*, 64(3):301–313, February 1998.
- [163] A. Hyvärinen. One-unit contrast functions for independent component analysis: a statistical analysis. *IEEE Neural Networks for Signal Processing VII Workshop*, pages 388–397, 1997.
- [164] The FastICA Package for Matlab. <http://www.cis.hut.fi/projects/ica/fastica/>, January 2001. Helsinki University of Technology, Laboratory of Computer and Information Science.
- [165] J. Holtz and J. Quan. Drift- and parameter-compensated flux estimator for persistent zero-stator-frequency operation of sensorless-controlled induction motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 39(4):1052–1060, July/August 2003.
- [166] B. Karanayil, M. F. Rahman, and C. Grantham. On-line stator and rotor resistance estimation scheme for vector-controlled induction motor drive using artificial neural networks. *IEEE Industry Applications Conference IAS*, 1:132–139, October 2003.
- [167] L.M. Grzesiak and B. Ufnalski. Neural stator flux estimator with dynamical signal preprocessing. *IEEE Conference AFRICON*, 2004.
- [168] L. M. Grzesiak, B. Ufnalski, A. Kaszewski, and P. Roszczyk. Sterowanie falownika bazujące na modulacji metodą wektora przestrzennego - realizacja w mikrokontrolerze TMS320LF2406. *Przegląd Elektrotechniczny*, 3:207–212, March 2003.
- [169] M. Malinowski. *Sensorless control strategies for three-phase PWM rectifiers*. PhD thesis, Warsaw University of Technology, Faculty of Electrical Engineering, 2001.
- [170] D. Vrančić. *Design of anti-windup and bumpless transfer protection*. PhD thesis, University of Ljubljana, Slovenia, 1997.
- [171] M. Hamdan and Zhiqiang Gao. A novel PID controller for pneumatic proportional valves with hysteresis. *IEEE Industry Applications Conference*, 2:1198–1201, October 2000.
- [172] A. Scottedward Hodel and C. E. Hall. Variable-structure PID control to prevent integrator windup. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 48(2):442–451, April 2001.
- [173] M. Tharayil and A. Alleyne. A generalized PID error governing scheme for SMART/SBLI control. *IEEE American Control Conference*, 1:346–351, May 2002.
- [174] A. Visioli. Modified anti-windup scheme for PID controllers. *IEE Control Theory and Applications*, 150(1):49–54, January 2003.
- [175] dSPACE GmbH, Germany. *DS1103 PPC Controller Board - Installation and Configuration Guide for release 3.4*, May 2002.
- [176] dSPACE GmbH, Germany. *MLIB/MTRACE - MATLAB-dSPACE Interface and Trace Libraries for release 3.4*, May 2002.
- [177] dSPACE GmbH, Germany. *ControlDesk - Experiment Guide for release 3.4*, May 2002.
- [178] dSPACE GmbH, Germany. *ControlDesk - Automation Guide for release 3.4*, May 2002.