

**ВАРИАНТНО РЕШЕНИЕ НА КОНТУР ЗА РЕШАВАНЕ
НА МОДУЛА НА ВЕКТОРА НА ГЛАВНОТО ПОТОКОСЦЕПЛЕНИЕ
НА ТРИФАЗЕН АСИНХРОНЕН ЕЛЕКТРОДВИГАТЕЛ**

инж. маг. Кремена Димитрова
ИПФ-СЛИВЕН, ТУ-СОФИЯ

доц. д-р Камен Сейменлийски
Бургаски свободен университет

**ALTERNATE SOLUTIONS OF A CONTROL LOOP
FOR SOLVING THE MODULE OF THE VECTOR OF THE MAIN
STREAM TRACTION OF THREE-PHASE ASYNCHRONOUS
ELECTRICAL MOTORS**

ing. Kremena Dimitrova
IPF-Sliven, TU-Sofia

Prof. Kamen Seymenliyski, PhD
Burgas Free University

Abstract: *This report presents a new structural design of the control channel for the mainstream traction modulus. The linear part of which determines both the dynamics of the system and the component of the stator current. It is shown the transfer function of the structural scheme as a whole and there are introduced cross-links. It is also shown a structural scheme for direct compensation of the cross-links. It is proposed a structural diagram of the electric drive system while taking into account the angular error of the support coordinate system.*

Key words: *mainstream traction modulus, control channel, transfer function, forced unit, cross-links, direct compensation.*

Резюме: *В доклада се представя нова структурна схема на канала за управление на модула на главното потокосцепление. Линеината част, на който определя както динамиката на системата, така и съставлящата на статорния ток. Представена е предавателната функция на структурната схема като цяло и са въведени кръстосани връзки. Представена е също така структурна схема за пряка компенсация на кръстосаните връзки. Предложена е и структурна схема на система за електродвиждане при отчитане на ъгловата грешка на опорната координатна система.*

Ключови думи: *модул на главното потокосцепление, канал за управление, предавателна функция, форсиращо звено, кръстосани връзки, пряка компенсация.*

Известно е, че за разработване на вариантното решение на такъв контур за регулиране определящо влияние имат съставлящите на статорния ток [1], даващи се със следните сигнали:

$$e_1 = -\frac{k_s \sigma_r}{\sigma} p \cdot \omega \cdot I_{s2} + \omega_{\psi 0} \cdot I_{s2}; \quad (1)$$

$$e_2 = -\frac{\sigma_s \sigma_r}{\sigma} L_m \cdot p \cdot \omega \cdot I_{s2}$$

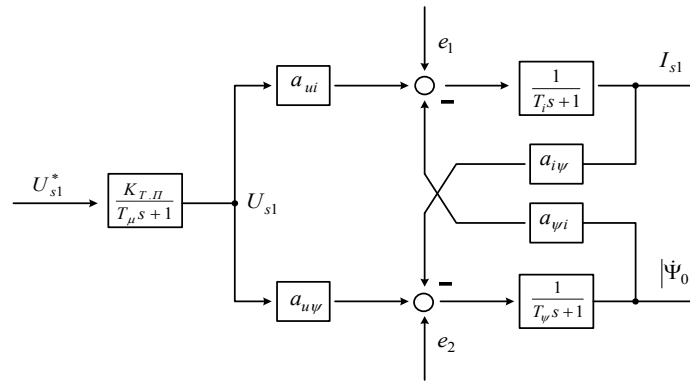
Оценяването на частта на тези сигнали спрямо сигналите на съставлящите на статорното напрежение U_{s1} се осъществява с помощта на израза:

$$\frac{|e_2|}{a_{u\psi} |U_{s1}|} = \frac{L_{\sigma s} p \omega |I_{s2}|}{|U_{s1}|}; \quad (2)$$

$$\frac{|e_1|}{a_{ui} |U_{s1}|} = (L'_s \omega_{\psi 0} - k_r L_{\sigma r} p \omega) \frac{|I_{s2}|}{|U_{s1}|};$$

От него се вижда, че тези съставлящи са пропорционални на разсейванията на статорните и роторни намотки и съставляват около 4% от модула на статорното напрежение [2].

С помощта на горното структурната схема на канала за управление на модула на главното потокосцепление има вида, представен на фиг. 1.



Фиг. 1

От нея се вижда, че основните звена имат предавателна функция на а периодично звено от I ред, а линейната част определя неговата динамика. Съставлящата на статорния ток I_{s1} има следния запис:

$$I_{s1}(s) = \frac{R_s^{-1} (T_{iF} s + 1) U_{s1}(s)}{a_2 s^2 + a_1 s + 1}; \quad (3)$$

Записът на предавателната функция спрямо съставящата на статорното напрежение U_{s1} е:

$$|\dot{\psi}_0|(s) = \frac{(L_m / R_s)(T_{\psi F} s + 1) U_{s1}(s)}{a_2 s^2 + a_1 s + 1}, \quad (4)$$

където $T_{iF} = L_r / R_r$;

$$T_{\psi F} = L_{\sigma s} / R_r;$$

$$a_2 = (L'_s L'_r) / (\sigma R_s R_r);$$

$$a_1 = (L_r / R_r + L_s / R_s) / \sigma;$$

$$L_{\sigma s} = \sigma_s L_s;$$

$$L_{\sigma r} = \sigma_r L_r;$$

Корените на характеристичното уравнение са реални:

$$s_{1,2} = -\frac{1}{2} \left(\frac{R_s}{L'_s} + \frac{R_r}{L'_r} \right) \pm \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{R_s}{L'_s} + \frac{R_r}{L'_r} \right)^2 - \sigma \frac{R_s R_r}{L'_s L'_r}}. \quad (5)$$

Единият от корените е твърде малък:

$$s_1 \approx -\sigma \left(\frac{R_s R_r}{L'_s L'_r} \right) / \left(\frac{R_s}{L'_s} + \frac{R_r}{L'_r} \right), \quad (6)$$

А другият е близък до $-(R_s L'_s + R_r L'_r)$:

$$s_2 \approx -\left(\frac{R_s}{L'_s} + \frac{R_r}{L'_r} \right) + \sigma \left(\frac{R_s R_r}{L'_s L'_r} \right) / \left(\frac{R_s}{L'_s} + \frac{R_r}{L'_r} \right). \quad (7)$$

Време-константата, съответстваща на минималния корен, е значително по-голяма от $T_{\psi F}$:

$$\frac{T_1}{T_{\psi F}} \approx \frac{R_r (L'_r / R_r + L'_s / R_s) = L_r + L_s (R_r + R_s)}{\sigma L_{\sigma s}} = \frac{L_r + L_s (R_r + R_s)}{\sigma_s L_s} \approx \frac{2}{\sigma_s}. \quad (8)$$

Изнесеното дотук показва, че е целесъобразно да се използва пропорционален регулатор [3], поради наличието на една време-константа T_1 . Тогава съотношението на време-константата на втория корен T_2 и другата $T_{\psi F}$ се определя с израза:

$$\frac{T_2}{T_{\psi F}} \approx \frac{\sigma R_r}{\sigma_s L_s (R_s / L_s + (R_r / L_r))} \approx 1 \quad (9)$$

Лесно може да се види, че сравнението на време-константите на форсиращото звено и тези на съставящата на тока I_{s1} са съответно

$$\frac{T_1}{T_{i\psi}} \approx 2; \tag{10}$$

$$\frac{T_2}{T_{iF}} \approx \frac{\sigma}{2}.$$

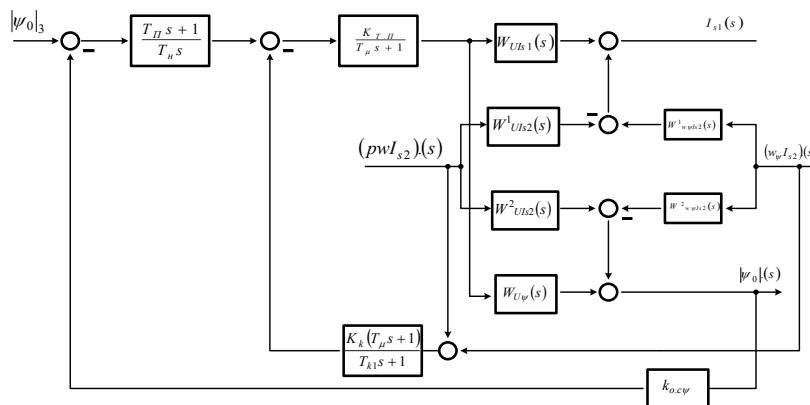
За оценка на влиянието на кръстосаните връзки в канала за управление на ъгловата скорост на ротора входните сигнали e_1 и e_2 трябва да се приведат в съответствие с изходните сигнали на съответните еквивалентни схеми. В резултат на това се получава:

$$\begin{aligned} \delta I_{s1}(s) &= \frac{R_s^{-1}[(\sigma / \sigma_s)(L_r / R_r)s + 1]}{a_2s^2 + a_1s + 1} (L_{\sigma s} \omega_{\psi 0} I_{s2})(s) - \\ &- \frac{R_s^{-1}(L_{\sigma r} / R_r)s}{a_2s^2 + a_1s + 1} (L_m p \omega I_{s2})(s); \end{aligned} \tag{11a}$$

$$\begin{aligned} \delta |\psi_0|(s) &= \frac{(L_{\sigma r} / R_r)[(L_{\sigma s} / R_s)s + 1]}{a_2s^2 + a_1s + 1} (L_m p \omega I_{s2})(s) - \\ &- \frac{(L_{\sigma r} / R_r)[1 - k_r \sigma_s R_r] / (k_s \sigma_r R_s)}{a_2s^2 + a_1s + 1} (L_m \omega_{\psi 0} I_{s2})(s). \end{aligned} \tag{11б}$$

Доказано е, че влиянието на кръстосаните връзки в разглеждания канал се проявява значително за големите стойности на ъгловата скорост. За съставлящата на статорния ток I_{s1} това влияние е еквивалентно на е.д.н. на разсейване на статора, а за модула на главното потокосцепление $|\dot{\psi}_0|$ ще е малко, тъй като коефициентът кло-ни към нула.

В системите за векторно управление [4] има сигнали, които са пропорционални на I_{s2} , $p\omega$ и $\omega_{\psi 0}$ и да се подтисне влиянието на кръстосаните връзки е възможно само ако се приложи пряка компенсация. Блоквата схема на такова решение е показана на фиг. 2.



Фиг. 2

От тази фигура се вижда, че съставлящата на компенсиращото напрежение U_{s1k} се определя от предавателната функция на компенсиращата връзка $W_{k1}(s)$ и предавателната функция на тиристорния преобразовател $W_{т.п.}(s)$

$$W_{m.n.}(s) = \frac{k_{m.n.}}{T_{\mu}s + 1}; \quad (12)$$

$$U_{s1k}(s) = -\frac{k_{m.n.}}{T_{\mu}s + 1} W_{k1}(s) (L_m p \omega I_{s2})(s)$$

Исходният сигнал за регулиране на модула на главното потокосцепление е:

$$\delta |\dot{\psi}_0|(s) = \left[\frac{L_{\sigma} (L_{\sigma} / R_s) s + 1}{R_r a_2 s^2 + a_1 s + 1} - \frac{k_{m.n.}^*}{T_{\mu} s + 1} \right] W_{k1}(s) \times \\ \times \frac{(L_m / R_s) (T_{\mu} s + 1)}{a_2 s^2 + a_1 s + 1} (L_m p \omega I_{s2})(s), \quad (13)$$

където $k_{т.п.}^* = k_{т.п.} k_{o.v.t.} k_{o.v.c.}$

След известни преобразувания се получава:

$$\delta |\dot{\psi}_0|(s) = \frac{b s^2}{a_2 s^2 + a_1 s + 1} (L_m p \omega I_{s2})(s), \quad (14)$$

$$\text{където } b = \left(\frac{\sigma L_r R_s}{\sigma_s R_r L_s} - 1 \right) \frac{L_{\sigma} L_{\sigma} L_s}{R_r R_s R_s}.$$

Именно така, влиянието на кръстосаните връзки може да доведе до минимизиране на стойността при прилагането на филтър. Аналогично могат да се изберат и параметрите на филтъра за компенсация на влиянието на електродвижещото напрежение $L_m \omega \psi_0 I_{s2}$.

За получаване на а статизъм в контура на главното потокосцепление ще приложим ПИ-регулатор с предавателна функция:

$$W_{p\psi}(s) = \frac{T_n s + 1}{T_u s}; \quad (15)$$

Където $T_{п} = T_1$ – голямата време – константа на канала за модула на потокосцеплението;

$$T_n = 2T_{\mu} \cdot k_{т.п.} k_{o.v.t.} (L_m / R_s).$$

Настройката обезпечава получаването на технически оптимум при условие, че втората времеконстанта $T_2 \approx T_{\psi F}$. Точната предавателна функция има следния вид:

$$W_{\psi}(s) = \frac{k_{o.v.t.}^{-1} (T_{\psi F} s + 1)}{(2T_{\mu}^2 s^2 + 2T_{\mu} s)(T_2 s + 1) + (T_{\psi F} s + 1)}, \quad (16)$$

при $T_2 \approx T_{\text{ФФ}}$ се получава технически оптимум. Прилагането на ПИ-регулатор води до допълнително потискане на смущенията.

Стойността на смущението, отнесена към сигнала на изхода на контура за регулиране, при наличие на пряка компенсация и ПИ-регулатор е:

$$\delta \cdot |\dot{\psi}_0|(s) = \frac{2T_\mu b(T_\mu s + 1)s^3}{(2T_\mu^2 s^2 + 2T_\mu s + 1)(a_2 s^2 + a_1 s + 1)} (L_m p \omega I_{s2})(s) \quad (17)$$

Отношението на предавателните функции (17) и (14):

$$\frac{\delta \cdot |\dot{\psi}_0|(s)}{|\dot{\psi}_0|(s)} = \frac{2T_\mu s(T_\mu s + 1)}{2T_\mu^2 s^2 + 2T_\mu s + 1}$$

показва, че едновременното прилагане на пряка компенсация и ПИ-регулатор в канала за управление на модула на главното потокосцепление позволява да се направи този канал независим от претоварвания и от стойността на ъгловата скорост на ротора. За тази цел приемаме, че влиянието на кръстосаните връзки се разглежда като смущение, за това прилагането на линейната теория дава свършено точни резултати.

Решаващо значение се явява изискването за точното фазиране на сигналите [5,6,7] с реалното положение на вълните на магнитното поле във въздушната междина.

Грешка в определянето на реалното положение на вълните на магнитното поле, равна на $5 - 10^\circ$, води до рязко влошаване на качеството на регулиране и появата на автоколебания.

Същността на проблема се състои в това, че при наличие на разсъгласуване между координатната система и реалната, се появява силна връзка между каналите за управление и допълнителните връзки вътре в тях.

На фиг. 3а е показана векторната диаграма, поясняваща влиянието на неточността при определяне на опорната координатна система ($1'$, $2'$). Ъгълът на грешката в определената за истинска координатна система (1, 2) е обозначен с $\delta\eta$, тогава векторите \dot{U}_s и \dot{I}_s в тези координатни системи ще се представят във вида:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{s(1,2)} &= |\dot{U}_s| \exp(j\eta_{U\psi}); \\ \dot{U}'_{s(1,2)} &= |\dot{U}_s| \exp[j(\eta_{U\psi} + \delta\eta)]; \\ \dot{I}_{s(1,2)} &= |\dot{I}_s| \exp(j\eta_{I\psi}) \\ \dot{I}'_{s(1,2)} &= |\dot{I}_s| \exp[j(\eta_{I\psi} + \delta\eta)]; \end{aligned} \quad (18)$$

(символите с щрихи обозначават сигналите, постъпващи в системата за управление).

Сигналите на обратната връзка по истинската стойност на вектора се определят по равенствата:

$$\begin{aligned} I'_{s(1,2)} &= I_{s(1,2)} \exp(j\delta\eta) \\ I'_{s1} &= I_{s1} \cos \delta\eta - I_{s2} \sin \delta\eta \approx I_{s1} - I_{s2} \delta\eta \end{aligned} \quad (19)$$

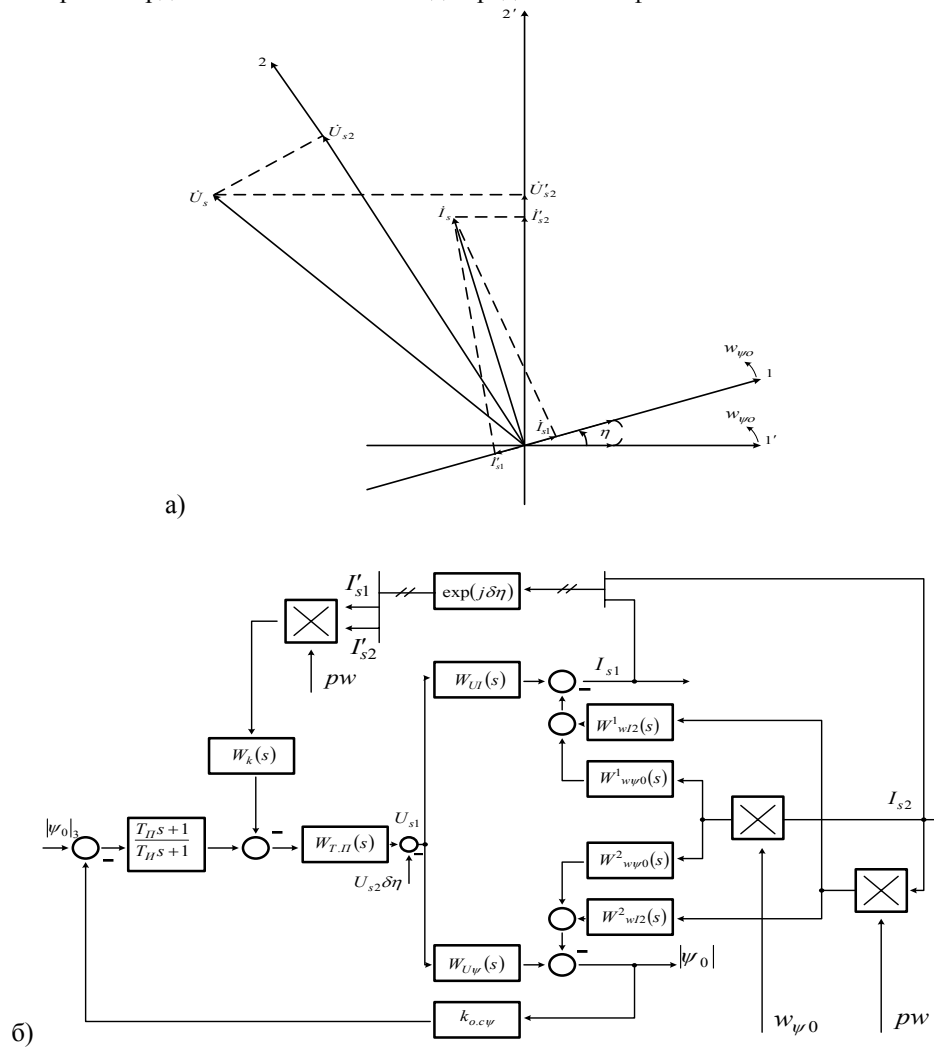
$$I'_{s2} = I_{s1} \sin \delta\eta + I_{s2} \cos \delta\eta \approx I_{s1} \delta\eta + I_{s2}$$

Изходните сигнали на системата за управление U'_{s1} и U'_{s2} в истинската координатна система определят съставящите на вектора на статорното напрежение:

$$U_{s1} = U'_{s1} \cos \delta\eta + U'_{s2} \sin \delta\eta \approx U'_{s1} + U'_{s2} \delta\eta \quad (20)$$

$$U_{s2} = -U'_{s1} \sin \delta\eta + U'_{s2} \cos \delta\eta \approx -U'_{s1} \delta\eta + U'_{s2}$$

Именно по такъв начин те въздействат върху влиянието на кръстосаните връзки. Структурната схема на системата при наличие на ъглова грешка в определената за опорна координатна система има вида представен на фиг. 3б.



Фиг. 3. Векторна диаграма (а) и структурна схема на задвижване с ТПЧ-АД при отчитане ъгловата грешка на опорната координатна система (б)

От фигурата се вижда, че в канала за регулиране на модула на главното потокосцепление [1] във веригата за компенсация възниква сигнал от обратната връзка по съставящата на тока I_{s1} . Той зависи от ъгловата скорост на ротора и преминава в колекторния филтър $W_{ki}(s)$ с коефициент на усилване, пропорционален на фазовата грешка $\delta\eta$. Съставящата на статорното напрежение U_{s1} съдържа сигнал, пропорционален на управляващото напрежение $-U_{s2}$, с коефициент на усилване $\delta\eta$. Тъй като за машините с нормално изпълнение $U_{s1}/U_{s2}=0,06\div 0,1$, то при $\delta\eta\approx 0,1$ сигналите U_{s1} и $U_{s2}\delta\eta$ практически са равни по стойност и системата за управление напълно се разстройва. За отстраняване на това явление се препоръчва използване на датчици на Хол. Те обезпечават пряко измерване на съставящите на вектора на главното потокосцепление и тригонометрични анализатори, нормиращи тези сигнали по амплитуда и обезпечавачи синусоидалния характер на сигналите, направляващи конусите с фазова разлика не по-голяма от $1[8,9]^\circ$.

Литература:

- [1.] Рудаков В.В., И.М.Столяров, В.А. Датрау, „Асинхронные электроприводы с векторным управлением” – л.: Энергоатомиздат, 1987.
- [2.] Blaschke F., „Das Prinzip der Feldorientierung, die Grundlage für die Transvektor – Regelung von Drehfeldmaschinen”, Siemens Zeitschrift, 1971, N^o 45, H.10.
- [3.] Алексиев В.В., В.А.Дартрау, В.В.Рудаков, Т.О.Роосо, В.М.Черкасов, „Электропривод с векторным управлением” Авторские свидетельства СССР №1443112, Н 02Р 5/408, 1988.
- [4.] [Meyer M., „Elektrische Antreiwstechnik”, Springer – Verlag Berlin, Haidelberg, New York, Tokio 1987
- [5.] Leonard W. „Control of Electrical Drives” Springer – Verlag Berlin, New York, Tokio 1985.
- [6.] P. Georgiev, S. Neykov, P. Rahnev, S. Letskovska, K. Seymenliyski, M. Uscheva, ***Current State Regulator of Asynchronous Motor Commanded by Field Orientation***, XXXIX International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies, 16–19 june, 2004, Bitola, Makedonia.
- [7.] K. Seimenliyski, T. Zanev, P.Rahnev, S. Letskovska, M. Uscheva, ***The influence of power converters built with power semiconductor devices on the quality of the electrical energy***, XXXIX International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies, 16–19 june, 2004, Bitola, Makedonia.
- [8.] К. Сейменлийски, П. Георгиев, С. Лецковска, П. Рахнев, ***Вариантно решение на крайно стъпало за широчинно-импулсно регулиране на скоростта на постояннотоков двигател***, БСУ, годишник, 2006, стр. 195-200.
- [9.] С. Лецковска, П. Рахнев, Ст. Моллова, Специфични особености при тарифиране на електрическата енергия, Годишник БСУ, 2011.