

МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ БЕЗДАТЧИКОВОЇ СИСТЕМИ ВЕКТОРНОГО КЕРУВАННЯ АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ЗА ПОТОКОЗЧЕПЛЕННЯМ РОТОРА

Велика різниця між визначеним за допомогою моделі положенням вектора ρ_M фактичним положенням вектора ρ кутів положення векторів призводить до нестійкого стану приводу, виникнення зв'язку між потоко- і моментотворюючими величинами разом з тим обмеженню керованості обертаючим моментом машини. При цьому зростає вплив, викликаний величиною помилки орієнтації. За допомогою досліджень змін у часі помилки орієнтації вектора магнітного потоку асинхронної машини можна сформулювати висновки про власну динаміку моделі визначення потоку і числа обертів і таким способом оцінити стійкість приводу в цілому. Привід буде поводити себе стабільно лише тоді, коли помилка орієнтації моделі потоку при $t \rightarrow \infty$ буде менше нуля або буде конвергувати до невеликого відмінного від нуля значення. У іншому випадку, потік момент обертання машини стають нерегульованими і привід не можна більше контролювати. Для визначення положення вектора магнітного потоку у всіх режимах роботи недостатньо інтегрування кутової швидкості вектора потоку, оціненої за поперечною компонентою напруги і балансом реактивної потужності. Уже незначні, як динамічні, та і статичні неточності при розрахунку кутової швидкості вектора потоку при інтегруванні можуть привести до великої помилки орієнтації моделі потоку [1]. Більш сприятливої якості моделі потоку можна досягнути, якщо різницю кутів δ постійно коректувати до нуля за допомогою регулятора. Регулятор поставляє правильний кут положення вектора потоку для трансформації в координати поля.

На рис.1 показаний принцип розрахунку положення вектора потоку на основі регулятора різниці кутів. Задаваною величиною регулятора є кут разорієнтації $\delta=0$ установлюваною величиною є кут трансформації моделі ρ_M .

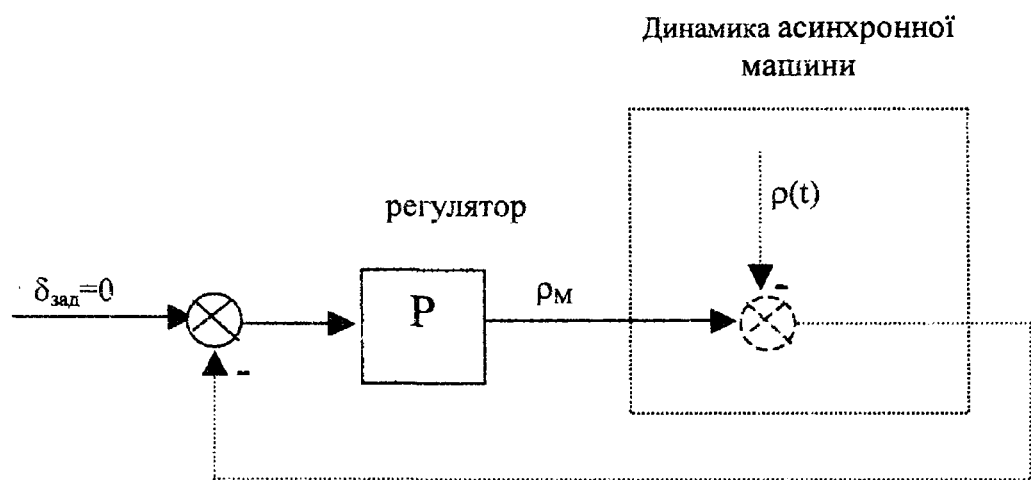


Рис.1. Корекція помилки орієнтації вектора магнітного потоку за допомогою регулятора кута разорієнтації

В цьому випадку динаміка машини представляється через динаміку положення вектора потоку $\rho(t)$. При цьому помилка орієнтації, як величина регулювання, також і на узора обвуватис за допомо ою моделі з вел ч в мі юв х сках м

шини. Змінне положення $\rho(t)$ вектора потоку в машині може розглядатися в контурі регулювання як величина, яка збурює, що є основою регулювання за допомогою оціненого положення вектора потоку. Величина, що збурює, постійна лише для особливого випадку – коли частота статора дорівнює нулю. У стаціонарному випадку, тобто при постійному числі обертів ротора, положення вектора потоку змінюється лінійно і пропорційно частоті статора. У робочому режимі може бути вигідно встановлювати значення заданої помилки не на нуль, а в залежності від моменту навантаження і модельного поперечного струму відповідно невелике позитивне або негативне значення. У такий спосіб можна зменшити проблеми обмеження обертаючого моменту при неточному врахуванні різниці кутів [1].

Визначення положення вектора магнітного потоку ротора на основі моделі поперечної напруги

Вектор потоку без виміру числа обертів визначають за допомогою оцінювання поперечної складової рівняння напруги статора і подовжньої складової напруги ротора асинхронної машини (АМ). Через поперечну складову рівнянь напруги статора можна встановити кутову частоту, а відповідно через подовжню складову рівняння напруги ротора встановлюють величину вектора потоку [1], [9], [45]. Інтегрування оцінюваної кутової частоти вектора потоку дозволяє встановити кут трансформації в систему координат моделі

$$T_R di_{mRM}/dt + i_{mRM} = i_{M\delta} \quad (1)$$

$$d\rho_M/dt = \omega_{mRM} = \omega_{mRM.Q} = [u_{Mq} - R_s i_{Mq} - L_\sigma (di_{Mq}/dt) - L_\sigma i_{Mq} \omega_{mRM}] / (L_0 i_{mRM}). \quad (2)$$

Як вхідні величини для моделі використовують фазні напруги і струми машини трансформовані в координати моделі. При утворенні моделі нехтують величинами, як в рівняннях моделі безпосередньо або побічно зв'язані з невідомою разорієнтацією. Механічну кутову швидкість ротора визначають, використовуючи оцінювану кутову частоту вектора потоку та аналізуючи дані про поперечну компоненту напруги ротора

$$z_p \omega_M = \omega_{mRM} i_{Mq} / i_{mRM} T_R \quad (3)$$

На рис.2 показана модель поперечної напруги у вигляді спрощеної блок-схеми. Для розрахунків поряд з постійною часу ротора T_R будуть необхідні також активний опір статора R_s і індуктивності L_σ і L_0 .

Оцінювання динаміки моделі поперечної напруги

Точну кутову частоту вектора струму намагнічування в машині при $|\delta| \ll 1$ запишемо у вигляді

$$\omega_{mR.Q} \approx [u_{Mq} - R_s i_{Mq} - L_\sigma di_{Mq}/dt - L_\sigma i_{Mq} \omega_{mRM} + L_0 \delta (di_{mRM}/dt - \Delta i_{mR})] / L_0 (i_{mRM} - \Delta i_{mR}) \quad (4)$$

З урахуванням

$$d\delta/dt \approx \omega_{mRM.Q} - \omega_{mR.Q}(\delta), \quad (5)$$

при $|\Delta i_{mR}| \ll i_{mRM}$ після декількох перетворень одержують наступні лінеаризовані диференціальні рівняння, які описують власну динаміку моделі приводу поперечної напруги при разорієнтації.

$$d\delta/dt \approx \delta (i_{Mq} i_{mRM} + \Delta i_{mR}) / [T_R (i_{mRM} - \Delta i_{mR})] - \Delta i_{mR}(\delta) \omega_{mRM} / i_{mRM}. \quad (6)$$

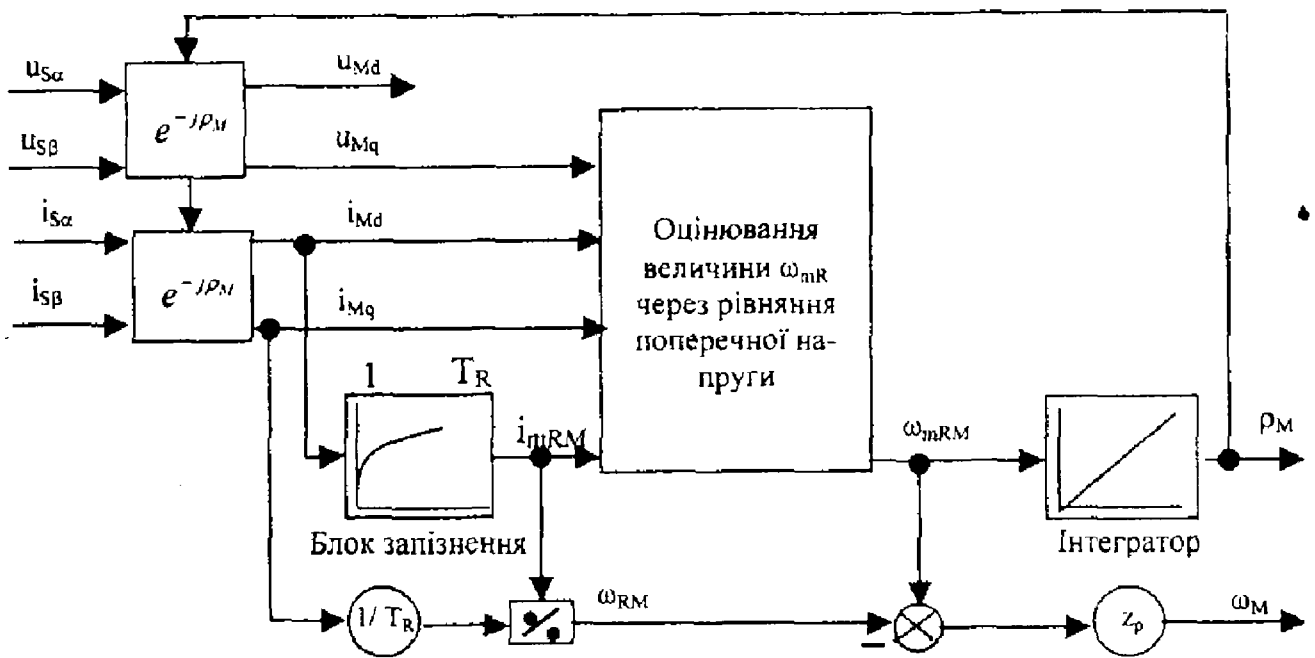


Рис.2. Розрахунок потоку і числа обертів асинхронної машини за допомогою моделі поперечної напруги

Використовуючи метод аналізу лінеаризованих диференціальних рівнянь [1] отримаємо наступний вираз для визначення короткотермінової динамічної характеристика моделі поперечної напруги ($t \ll T_R$):

$$T_{\Delta Q}(t \ll T_R) \approx T_R(i_{mRM} \Delta i_{mR}) / (i_{Md} i_{mRM} + \Delta i_{mR}). \quad (7)$$

В значній мірі короткотермінова динаміка визначається відхиленням між оціненим і дійсним значенням струму намагнічування $\Delta i_{mR}(\delta) = i_{mRM} - i_{mR}(\delta)$. Через постійну часу ротора T_R зв'язана амплітуда $\Delta i_{mR}(\delta)$ з разорієнтацією і поперечним струмом моделі і тому не може вказуватися точно [2]. Незалежно від знаку разорієнтації стала часу моделі поперечної напруги для короткотермінової динаміки змінюється відносно повільно.

Довготермінова динаміка моделі поперечної напруги навпаки дуже сильно залежить від виду навантаження машини. У залежності від знаку моменту навантаження і частоти статора разорієнтація може зменшуватися або усе далі збільшуватися

$$T_{\Delta Q}(t \gg T_R) \approx i_{Md} / (\omega_{mRM} i_{Mq}). \quad (8)$$

У випадку різних знаків кутової швидкості вектора потоку моделі (відповідно частоти статора) і моделі поперечного струму разорієнтація збільшується безупинно, що спричиняє нестійку характеристику приводу. Розрахунок кута потоку тільки за рівнянням моделі поперечної напруги можливий лише тоді, коли $\omega_{mRM} \cdot i_{Mq}$ - більше нуля.

Якщо модель потоку експлуатується в її надійному робочому діапазоні з підігнаними параметрами моделі $[P_M] = [P]$, усталене стаціонарне значення разорієнтації $\delta_{стат} = 0^\circ$ [1].

Оцінювання чутливості моделі поперечної напруги до зміни параметрів

Для більш простого представлення запишемо відповідно параметри машини і параметри моделі у вигляді векторів $[P]^T = [T_R, R_S, L_\sigma, L_O]$, і $[P_M]^T = [T_{RM}, R_{SM}, L_{\sigma M}, L_{OM}]$. Абсолютні помилки визначення окремих параметрів представлені у векторі $[\Delta P] =$

$= [P_M] - [P] = [\Delta T_R, \Delta R_S, \Delta L_\sigma, \Delta L_0]$. При розстроєних параметрах моделі розраховану кутову частоту вектора потоку можна представити у вигляді двох складових

$$\omega_{M,Q}([P_M]) = \omega_{mRM,Q}([P]) + f_Q([\Delta P]). \quad (9)$$

Складова $\omega_{mRM,Q}([P])$ відповідає кутовій частоті, розрахованій за допомогою моделі поперечної напруги. При застосуванні правильних параметрів машини, згідно рівняння (2), складова функції абсолютних похибок параметрів моделі $f_Q([P])$ має вигляд

$$f_Q([\Delta P]) \approx [\omega_{mRM,Q}([P]) \Delta L_\sigma / L_{OM} + i_{Mq} \Delta R_S / (i_{mRM} L_{OM}) + (di_{Mq}/dt + \omega_{mRM} i_{Md}) \Delta L_\sigma / (i_{mRM} L_{OM})]. \quad (10)$$

Залежна від розладнання параметрів складова $f_Q([\Delta P])$, не залежить від помилки орієнтації і тому виявляється шляхом спеціального розв'язання диференціального рівняння для разорієнтації [3]

$$d\delta/dt = \omega_{mRM,Q}([P]) - \omega_{mR,Q}(\delta[P]) + f_Q([\Delta P]). \quad (11)$$

Через спеціальний розв'язок диференціального рівняння (11) можна вказати очікувану стаціонарну разорієнтацію в залежності від абсолютних похибок параметрів [3]

$$\delta_{stat} \approx 1/L_{OM} [i_{Md} \Delta L_\sigma / i_{Mq} + \Delta R_S / \omega_{mRM} + i_{Md} \Delta L_\sigma / i_{Mq}]. \quad (12)$$

Передумовою є режим приводу в упевненому робочому діапазоні моделі поперечної напруги, тобто при однакових знаках частоти статора і моменту навантаження або відповідно частоти статора і поперечного моделі струму. У випадку малих значень зміни параметрів моделі рівняння (12) можна вилучити. У цьому випадку поперечний струм моделі і разорієнтація мають той самий знак і приводять до обмеження максимального приводного моменту машини [3]. Вплив розстроєного активного опору статора на разорієнтацію зростає із зменшенням частоти статора. У стані спокою машини вже незначний розлад приводить до дуже великої разорієнтації, і тому веде до нестабільності системи.

Вплив розладу від L_0 і L_σ росте із зниженням навантаження і не залежить від частоти статора. У випадку холостого ходу вже незначний розлад цих параметрів може привести до великої разорієнтації.

Оцінювання точності визначення числа обертів за моделлю поперечної напруги

Помилково розрахований кут трансформації або розстроєні параметри моделі також впливають на точність, з якою за допомогою моделі числа обертів можна визначати механічне число обертів. Відхилення між фактичним і розрахованим числом обертів може вказуватися як функція разорієнтації δ і розстроєної сталої часу ротора $T_{RM} = T_R + \Delta T_R$. Згідно рівняння (3) при застосуванні розрахованого числа обертів і фактичного числа обертів при $|\delta| \ll 1$ і $|\Delta i_{mR}(\delta)| \ll |i_{mRM}|$ одержують наступне наближення для абсолютної помилки числа обертів, де Z_p число пар полюсів:

$$\Delta \omega Z_p = \omega_M Z_p - \omega Z_p = d\delta/dt + \delta i_{Md} / T_R [1/i_{mRM} + \Delta i_{mR}(\delta) / i_{mRM}^2] + \Delta i_{mR}(\delta) i_{Mq} / (T_R i_{mRM}^2) + i_{Mq} / i_{mRM} [1/T_R - 1/T_{RM}]. \quad (13)$$

Розлад інших параметрів машини в моделі лише побічно відбивається в моделі потоку при розрахунку числа обертів, включаючи разорієнтацію. Абсолютна помилка $\Delta \omega$ визначення числа обертів за моделлю не залежить від частоти статора і в такий спосіб може виявлятися у вигляді помітних перешкод, особливо в області малих чисел обертів. Установивши блок фільтра нижніх частот у колі зворотного зв'язку регулятора числа оборотів вдається демпфувати динамічний вплив помилки числа обертів на регу-

лювання числа обертів. Постійна часу фільтра повинна вибиратися таким чином, щоб гранична частота мала досить великий інтервал для використаних частот. Експерименти виявили можливість використовувати для фільтрації просту ланку РТі з постійною часу фільтра близько 2-5% від механічного постійної часу навантаження T_m

$$T_m = \theta \omega_N / m_N, \quad (14)$$

де θ - момент інерції ротора разом з механізмом, ω_N - номінальна кутова частота, m_N - номінальний момент АМ.

Особливо просто оцінюється помилка числа обертів у стаціонарному режимі роботи за рівнянням (13):

$$\Delta \omega_{стат} Z_p \approx \delta_{стат} [1/T_R - I_{Mq}^2 / (I_{Md}^2 T_R)] + I_{Mq} / I_{Md} [1/T_R - 1/T_{RM}]. \quad (15)$$

Вплив розстроєної постійної часу ротора проявляється лише при навантаженні машини і лінійно зростає з моментом навантаження і відповідно I_{Mq} .

Наступна частка помилки числа обертів визначається разорієнтацією моделі потоку. Вона виявляється вже під час холостого ходу і при навантаженні машини змінюється квадратично. Для випробуваного приводу це означає, що при номінальному навантаженні і разорієнтації $\delta = 10^\circ$, помилка числа обертів складає приблизно -1% від номінальної частоти обертання. Для моделі поперечної напруги залежність разорієнтації $\delta_{стат}$ від параметрів зазначена в рівнянні (12).

Результати розрахункового моделювання експериментального електропривода

Представлені на рис.3 результати моделювання підтверджують результати оцінювання короткотермінової і довготермінової динаміки. Вона показує динамічну характеристику моделі поперечної напруги при підігнаних параметрах моделі у випадку холостого ходу як при моторному, так і генераторному навантаженні. При $t = 0,5$ сек кут трансформації моделі поперечної напруги розстроюється кутом збурювання $\delta_{збур} = -10^\circ$

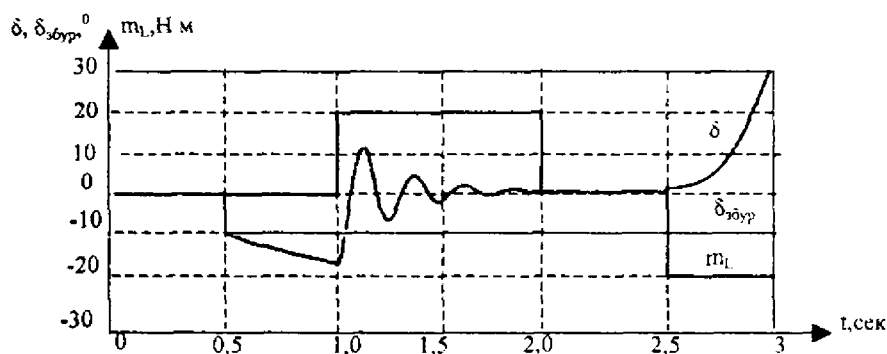


Рис.3. Динаміка моделі поперечної напруги. Зміна кута разорієнтації δ у часі при розладі кута трансформації за допомогою $\delta_{збур}$ у випадку холостого ходу і при навантаженні номінальним моментом $\omega_{зад} = 0,1 \cdot \omega_N$

При $t \ll T_R$ помилка орієнтації внаслідок обмеженої короткотермінової динаміки залишається приблизно незмінною. При $t=1$ сек привід навантажується моторним навантаженням і різниця кутів відхиляється від нуля. Виникаючі при цьому коливання помилки орієнтування є результатом сильного розрегулювання контуру регулювання числа обертів [1]. При генераторному навантаженні привід показує описану раніше нестабільність. Помилка орієнтації збільшується експоненціальна, унаслідок чого потік і

обертаючий момент не можуть більше регулюватися незалежно один від одного. При цьому знак разорієнтації може приймати позитивні або негативні значення. При короткочасному генераторному навантаженні незначна короткотермінова динаміка моделі поперечної напруги навпроти не приводить до нестабільності характеристик приводу. Усупереч генераторному навантаженню, представлений на рис.4 хід разорієнтації змінюється повільно. Більш довготривале генераторне навантаження машини, однак, привело до описаної раніше нестабільності характеристик приводу. Таким чином модель поперечної напруги може правильно описувати вектор потоку лише при моторному навантаженні. Без додаткових стабілізуючих заходів ця модель не може бути використана для розрахунку кута трансформації.

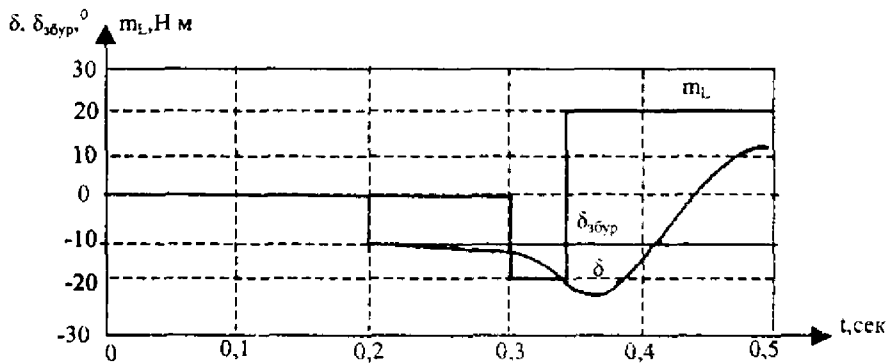


Рис.4. Оцінювання динаміки моделі поперечної напруги.

Зміна кута разорієнтації δ у часі при короткочасному генераторному навантаженні номінальним моментом. $\omega_{\text{квт}} = 0,1 \cdot \omega_N$

Результати моделювання впливу помилки визначення активного опору статора на хід разорієнтації для експериментального електроприводу для різних частот статора при постійному навантаженні номінальним моментом наведені на рис.5. Задане число обертів зменшується від 10% до -3% від номінальної частоти обертання ротора, тобто привід навантажується в генераторному режимі.

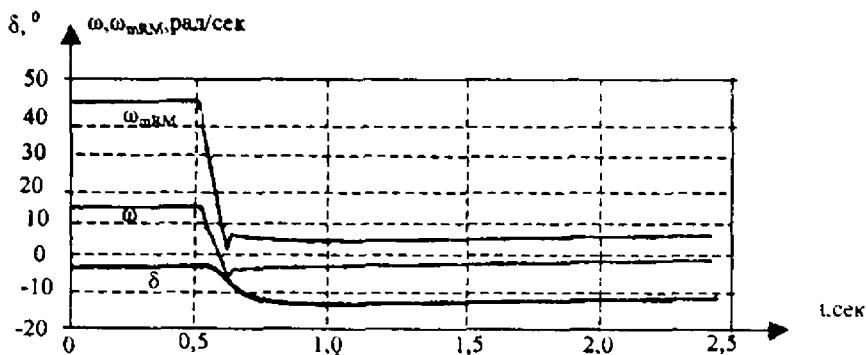


Рис.5. Характеристики моделі поперечної напруги при разорієнтації в результаті розладу активного опору статора. $r_{sm} = 1,1 r_s$, $mL = mN$

На рис.6 і рис.7 показані динамічні характеристики разорієнтації при зменшенні моменту навантаження від номінального значення до 25% і відповідно до 10% від номінального моменту.

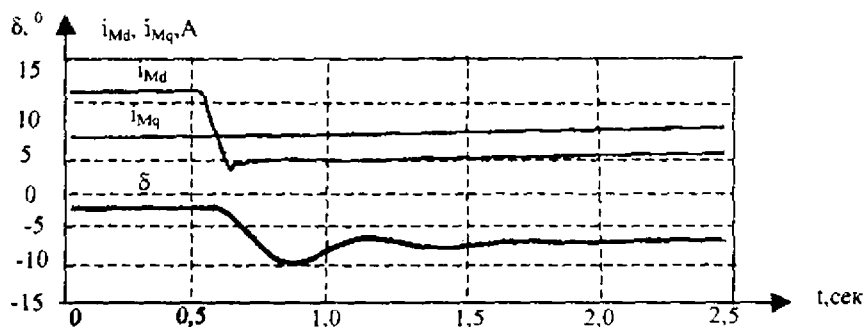


Рис.6. Характеристики моделі поперечної напруги при разорієнтації в результаті розладу $L_{OM} \cdot L_{OM} = 1,05 \cdot L_{ON}$; $\omega_{зад} = 0,1 \cdot \omega_N$; $m_L = m_N \rightarrow 0,25 \cdot m_N$

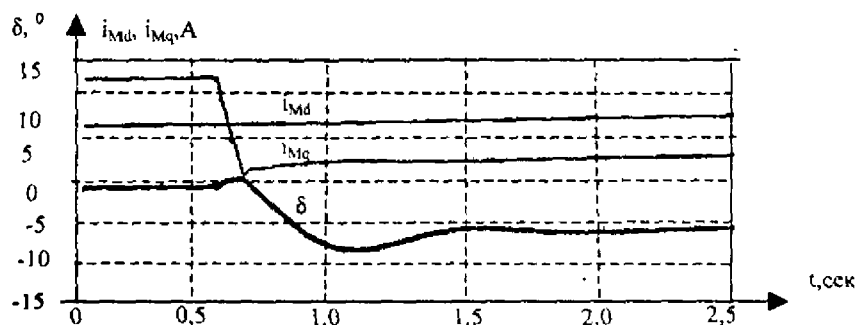


Рис.7. Характеристики моделі поперечної напруги при разорієнтації в результаті розладу $L_{OM} \cdot L_{OM} = 1,25L_N$; $\omega_{зад} = 0,1\omega_N$; $m_L = m_N \rightarrow -0,1m_N$

Особливо критичним виявляється швидке скорочення моменту навантаження при малих числах обертів. При цьому внаслідок однакових знаків моменту навантаження і разорієнтації може доходити до короткочасного обмеження максимального приводного моменту. На рис.8 показана абсолютна помилка визначення числа обертів за допомогою моделі поперечної напруги при різних постійних часу ротора моделі. Моделювання підтверджує висновок про нехтувано малий вплив параметрів моделі числа обертів на динаміку моделі потоку.

Хід разорієнтації визначається винятково власною динамікою моделі потоку і не залежить від зміни параметрів моделі числа обертів. Моделювання підтверджує результати дослідження власної динаміки моделі поперечної напруги. Внаслідок сильної чутливості до параметрів модель поперечної напруги без додаткових стабілізуючих заходів не підходить для визначення вектора потоку в машині. Вона дозволяє одержати правильне положення вектора потоку в машині тільки в особливому випадку підігнаних параметрів моделі і вхідних величин трансформованих у координати поля. На практиці завжди відбуваються відхилення між параметрами моделі і машини, які цією моделлю потоку не допускаються.

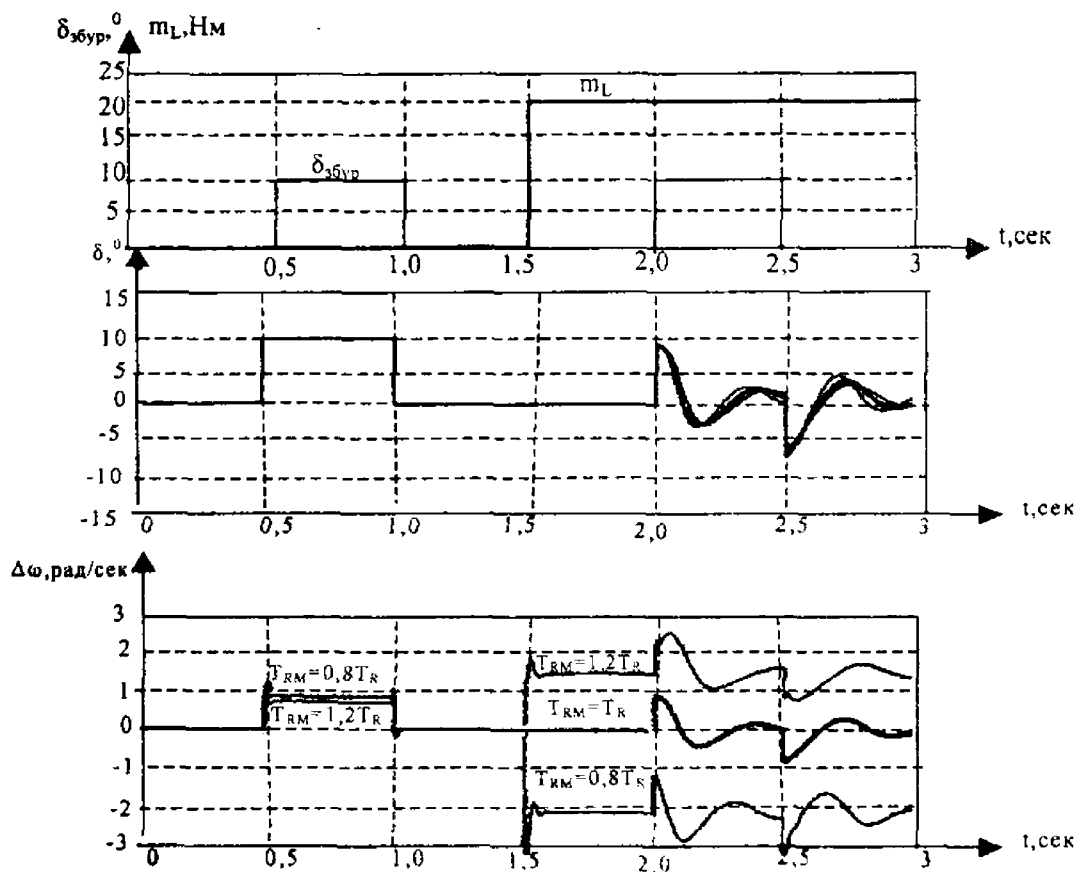


Рис.8. Помилка числа обертів $\Delta\omega$ при розладі кута трансформації $\delta_{збур}$ у випадку холостого ходу і при навантаженні з номінальним моментом. $\omega_{зад} = 0$

Методи забезпечення надійності визначення положення вектора потоку ротора

Якщо відома різниця кутів, то в такий спосіб можна досягти точної трансформації вхідних величин на правильне положення вектора потоку в машині. Розрахунок кута трансформації шляхом інтегрування оціненої кутової швидкості вектора потоку потім більше не є необхідним. Однак при цьому висуваються високі вимоги до регулятора розорієнтації. У стаціонарному режимі відхилення кута і відповідно помилка орієнтації повинні бути нуль і залишатися, по можливості, малим у динамічному режимі. Тільки в цьому випадку потік і обертаючий момент машини в координатах моделі залишаться завжди керованими. При практичних дослідженнях у стаціонарному режимі δ має значення $|\delta| < 10^\circ$ і у динамічному режимі допускається $|\delta| < 20^\circ$. Внаслідок коливального характеру, а також сильної зміни збурюючих величин, визначення уставок такого регулятора є проблематичним. Вимоги до динаміки регулятора можна знизити додатковим введенням в контур регулювання збурюючої величини [31]. На рис.9. показаний контур регулювання розорієнтації із включенням кута положення вектора потоку. Оцінене значення кута вектора потоку може бути отримано без датчика за допомогою моделі поперечної напруги. Величину положення вектора потоку в машині, розглянуту як величину, що збурює, можна компенсувати наближено. Регулятор розорієнтації повинен впливати лише при помилковому куті трансформації, викликаною оцінкою за моделлю поперечної напруги.

При включенні збурюючих величин регулятор може використовуватися як простий І - регулятор або як регулятор ПІ. Додатковий ПІ-компонент сприяє швидкому корегуванню помилки орієнтації і підвищує динаміку контуру регулювання.

При порушенні величин зворотного зв'язку більш висока динаміка може негативно відбиватися на контурі регулювання. З цієї причини необхідно обмежувати П- складову регулятора або проводити відфільтрування величин зворотного зв'язку. На рис.10. показаний реалізований ПІ-регулятор з обмеженням П- складової на $+10^\circ$. У якості зворотної величини регулятора тут використовується оцінене значення різниці кутів $\delta_M(\delta, t)$. При застосуванні моделі поперечної напруги для оцінки збурюючої величини додаткова участь П- компоненти регулятора виявилася не потрібною. Достатньо застосування одного І - регулятора.

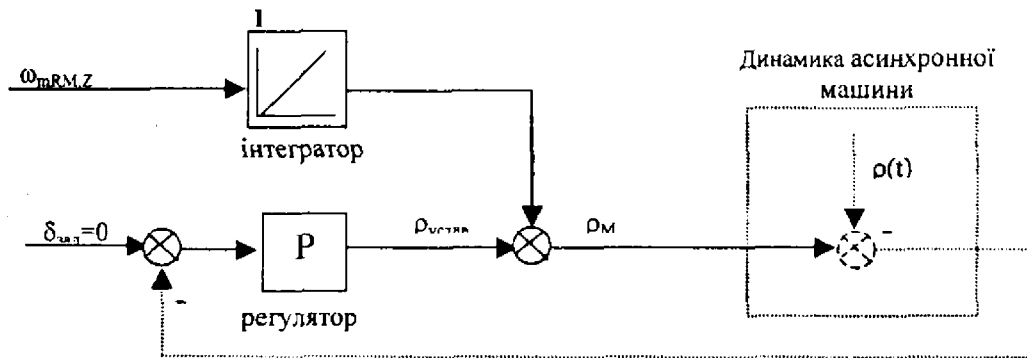


Рис.9. Зниження необхідної динаміки регулятора при включенні збурюючих величини

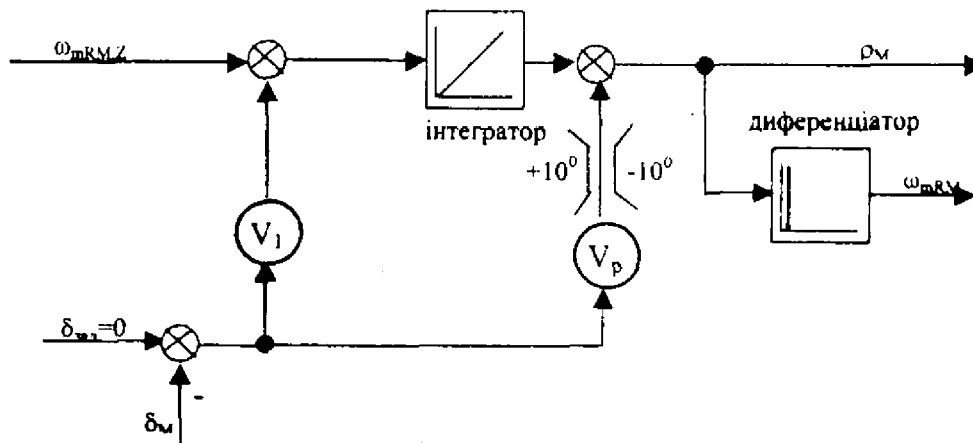


Рис.10. Блок- схема ПІ регулятора різниці кутів, включаючи сигнал збурювання: V_I - коефіцієнт підсилення І- регулятора; V_P - коефіцієнт підсилення П- регулятора

Оцінка власної динаміки моделі положення потоку за допомогою регулятора різниці кутів може відбуватися на основі дослідження зміни помилки орієнтації в часі. У загальному випадку для застосування ПІ регулятора, як регулятора різниці кута, використовують диференціальні рівняння [1]

$$d\delta/dt = \omega_{mRM} - \omega_{mR}(\delta) = \omega_{mRMZ} - \omega_{mRZ}(\delta) - V_I \delta - V_P d\delta/dt. \quad (16)$$

Висновок

Враховуючи нелінійність диференціальних рівнянь асинхронної машини та особливості динамічних характеристик моделей визначення магнітного потоку та числа обертів, методи визначення і корекції разорієнтації доцільно розробляти окремо для різних частот статора.

Література: 1. Leonahrd W. Control of Electrical Drives. Springer, 1998. -560p
2. Holtz J. Methods for Speed Sensorless Control of AC Drives. IEEE, Press Book, 1996
-275p. 3. Rajashekara K., Kawamura A., Matsuse K. Sensorless Control of AC Motor Drives
IEEE Press, 1996. -328p.

И.Н.Богаенко, С.Н.Балюта

**МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ БЕЗДАТЧИКОВОЙ СИСТЕМЫ
ВЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ
ПО ПОТОКОСЦЕПЛЕНИЮ РОТОРА**

Рассмотрены основные методы повышения надежности бездатчиковой системы векторного управления путем коррекции ошибки определения вектора магнитного потока ротора и частоты вращения. Определены динамические характеристики модели ошибки определения вектора магнитного потока ротора и частоты вращения, которая базируется на анализе уравнения поперечной составляющей индуцированного напряжения.

I.N.Bogaenko, S.N.Baljuta

**METHODS OF A RELIABILITY AUGMENTATION OF A SYSTEM WITHOUT
SENSORS OF VECTORIAL CONTROL OF THE ASYNCHRONOUS ELECTRICAL
ACTUATION ON A MAGNETIC LINKAGE OF A CURL**

The basic methods of a reliability augmentation of a system without sensors of vectorial control surveyed by compensation of an error of definition of vector of a magnetic flux of a curl and rotational speed. Dynamical characteristics of a model of an error of definition of vector of a magnetic flux of a curl and rotational speed which is founded on the analysis of an equation cross-sectional component induced voltage are determined.
