

УДК 62-51 : 621.313.33

КЕРУВАННЯ АСИНХРОННИМИ ДВИГУНАМИ З ПАРАМЕТРИЧНО ІНВАНІАНТНОЮ ОПТИМІЗАЦІЄЮ МОМЕНТА В ЗОНІ ОСЛАБЛЕННЯ ПОЛЯ НА ОСНОВІ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ**Б. І. Приймак**Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»
просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна. E-mail: bp-08@ukr.net

Розглядається тема підвищення показників якості векторно-керованих асинхронних електроприводів, які працюють як на нижчих, так на значно вищих від номінальної швидкостях ротора. Є перспективним розвиток екстремальних систем керування із максимізацією моменту асинхронного двигуна в режимі ослаблення поля. Проте відомі на сьогодні системи цього типу мають такі вади, як низька параметрична чутливість та (або) невисока точність оптимізації, тому потреба їх удосконалення є актуальною. Метою даної роботи є побудова системи автоматичного керування асинхронним двигуном із параметрично інваріантною оптимізацією моменту в режимі ослаблення поля на основі нейронної мережі. За результатами досліджень виявлено можливість значного зменшення моменту двигуна внаслідок коливань напруги ланки постійного струму привода та теплових варіацій активних опорів двигуна. Для зниження негативного впливу змін параметрів запропоновано концепцію побудови екстремальної системи керування асинхронним двигуном на основі параметрично інваріантної нейронної мережі. Синтезована за цією концепцією система максимізує момент двигуна в режимі ослаблення поля при врахуванні коливань напруги живлення інвертора та варіацій опорів двигуна. Порівняння динамічних властивостей відомої системи з оптимізацією моменту та запропонованої системи з нейромережною параметрично інваріантною оптимізацією моменту засвідчило істотно кращу швидкодію другої системи у процесах розгону на високих швидкостях двигуна.

Ключові слова: асинхронний двигун, ослаблення поля, оптимізація, параметрична інваріантність, нейронна мережа.

УПРАВЛЕНИЕ АСИНХРОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ С ПАРАМЕТРИЧЕСКИ ИНВАРИАНТНОЙ ОПТИМИЗАЦИЕЙ МОМЕНТА В ЗОНЕ ОСЛАБЛЕНИЯ ПОЛЯ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ**Б. И. Приймак**Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»
просп. Победы, 37, г. Киев, 03056, Украина. E-mail: bp-08@ukr.net

Рассматривается тема повышения показателей качества векторно-управляемых асинхронных электроприводов, которые работают как на низших, так и на значительно превышающих номинальную скоростях ротора. Является перспективным развитие экстремальных систем управления с максимизацией момента асинхронного двигателя в режиме ослабления поля. Однако известные на сегодня системы этого типа имеют такие недостатки, как низкая параметрическая чувствительность и (или) невысокая точность оптимизации, поэтому необходимость их усовершенствования весьма актуальна. Целью настоящей работы является построение системы автоматического управления асинхронным двигателем с параметрически инвариантной оптимизацией момента в режиме ослабления поля двигателя вследствие колебаний напряжения звена постоянного тока привода и тепловых вариаций активных сопротивлений двигателя. Для снижения отрицательного влияния изменений параметров предложена концепция построения экстремальной системы управления асинхронным двигателем на базе параметрически инвариантной нейронной сети. Синтезированная по этой концепции система максимизирует момент двигателя в режиме ослабления поля при учете колебаний напряжения питания инвертора и вариаций сопротивлений двигателя. Сравнение динамических свойств известной системы с оптимизацией момента и предложенной системы с нейросетевой параметрически инвариантной оптимизацией момента показало лучшее быстродействие второй системы в процессах разгона на высоких скоростях двигателя.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, ослабление поля, оптимизация, параметрическая инвариантность, нейронная сеть.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Зазвичай векторно-керовані асинхронні двигуни (АД) металообробних верстатів, електромобілів, трамваїв, тролейбусів тощо повинні працювати як на нижчих, так на значно вищих від номінальної швидкостях ротора. Забезпечення необхідних динамічних показників АД значною мірою залежить від максимально допустимого короткотривалого струму статора, який визначається можливостями силового перетворювача. Оскільки в області номінальної швидкості АД напруга на виході силового перетворювача сягає напруги мережі живлення, то досягнення вищих шви-

дкостей потребує ослаблення поля двигуна. Класичний алгоритм ослаблення поля полягає у зміні потужності ротора зворотно пропорційно до швидкості двигуна, що дозволяє підтримувати на постійному рівні ЕРС обертанья ротора [1]. Проте цей алгоритм за обмежень струму та напруги статора не дозволяє повною мірою використати енергетичні ресурси привода. Тому для досягнення граничних показників АД перспективно застосовувати принципи екстремального керування [2].

Відомо декілька варіантів систем автоматичного керування (САК) АД з оптимізацією його моменту в

зоні зниження поля [3–5]. Основним недоліком цих систем є те, що в них не передбачено компенсування впливу змін параметрів привода. Проте, як показують дослідження, коливання напруги ланки постійного струму привода та теплові варіації опорів двигуна можуть різко погіршити екстремальні характеристики АД. Для вирішення проблеми параметричної чутливості були запропоновані параметрично робастні САК АД [6, 7]. У них вводиться контур регулювання напруги статора, за допомогою якого підтримується кут між компонентами вектора напруги, що дорівнює 135° для рушійного та 45° для генераторного режимів роботи АД. У таких системах досягається інваріантність до змін напруги живлення інвертора, проте вплив варіацій опорів двигуна не компенсується. Крім цього, задача максимізації моменту двигуна в них розв'язується лише наближено, оскільки умова досягнення максимуму моменту шляхом підтримування зазначених кутів отримана з опису ідеалізованого АД за нехтуванням активним опором статора.

Таким чином, на сьогодні важливим і актуальним є вивчення проблеми параметричної чутливості систем з екстремальним керуванням моментом двигуна, що недостатньо висвітлено у літературних джерелах, та побудова більш якісних від існуючих САК АД із максимізацією моменту в зоні високих швидкостей ротора.

Метою роботи є дослідження впливу параметричних збурень на екстремальні характеристики асинхронного двигуна та побудова САК АД з нейромережною параметрично інваріантною оптимізацією моменту в режимі ослаблення поля.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Максимізація моменту АД. Короткозамкнений АД у зорієнтованих за вектором потокозчеплення ротора $\bar{\Psi}_r$ координатах (d, q) при врахуванні втрат у залізі можна описати системою диференціальних рівнянь [8]:

$$dI_{sd}/dt = L_{s\sigma}^{-1} [-(R_s + R_z)I_{sd} - R_z L_{r\sigma}^{-1} \Psi_{rd} + T_z^{-1} L_r L_{r\sigma}^{-1} \Psi_{md} + U_{sd}] + \omega_0 I_{sq};$$

$$dI_{sq}/dt = L_{s\sigma}^{-1} [-(R_s + R_z)I_{sq} + T_z^{-1} L_r L_{r\sigma}^{-1} \Psi_{mq} + U_{sq}] - \omega_0 I_{sd};$$

$$d\Psi_{rd}/dt = T_{r\sigma}^{-1} (-\Psi_{rd} + \Psi_{md}); \quad (1)$$

$$d\Psi_{md}/dt = R_z (I_{sd} + \Psi_{rd}/L_{r\sigma} - L_r L_m^{-1} L_{r\sigma}^{-1} \Psi_{md}) + \omega_0 \Psi_{mq};$$

$$d\Psi_{mq}/dt = R_z (I_{sq} - L_r L_m^{-1} L_{r\sigma}^{-1} \Psi_{mq}) - \omega_0 \Psi_{md};$$

$$d\omega/dt = J^{-1}(M - M_L),$$

де змінними є компоненти узагальнених векторів напруги статора $\bar{U}_s = [U_{sd}, U_{sq}]^T$, струму статора

$$\bar{I}_s = [I_{sd}, I_{sq}]^T, \quad \text{потокозчеплення ротора}$$

$$\bar{\Psi}_r = [\Psi_{rd}, \Psi_{rq}]^T; \quad \text{головного потокозчеплення}$$

$\bar{\Psi}_m = [\Psi_{md}, \Psi_{mq}]^T$; ω_0 – кутова швидкість обертання координат (d, q) ; z_p – кількість пар полюсів двигуна; ω – кутова швидкість обертання ротора; R_s, R_r – відповідно активні опори фаз статора та ротора; $R_z = R_z(\omega_0, \omega)$ – еквівалентний активний опір, що відображає магнітні втрати потужності в залізі двигуна; L_m – індуктивність намагнічування двигуна; $L_s = L_m + L_{s\sigma}$, $L_r = L_m + L_{r\sigma}$ – повні індуктивності фаз, а $L_{s\sigma}, L_{r\sigma}$ – індуктивності від полів розсіювання статора та ротора відповідно; $T_{r\sigma} = L_{r\sigma}/R_r$, $T_z = L_m/R_z$ – сталі часу; M, M_L – моменти двигуна та навантаження відповідно. З урахуванням того, що в зорієнтованих координатах $\Psi_{rd} = |\bar{\Psi}_r| \equiv \Psi_r$, в (1) електромагнітний момент двигуна та швидкість координат обчислюються як $M = 1,5 z_p L_{r\sigma}^{-1} \Psi_{mq} \Psi_r$, $\omega_0 = z_p \omega + \Psi_{mq} / (T_{r\sigma} \Psi_r)$. Для врахування насичення магнітопроводу в (1) використано отриману на основі кривої намагнічування двигуна та апроксимовану поліноміальним виразом нелінійну функцію $L_m = L_m(\Psi_m)$. Систему (1) слід доповнити реально існуючими в АЕП обмеженнями модуля вектора напруги статора $U_s = |\bar{U}_s|$ на рівні U_{max} та модуля вектора струму статора $I_s = |\bar{I}_s|$ на рівні I_{max} у вигляді

$$0 \leq U_s \leq U_{max}; \quad 0 \leq I_s \leq I_{max}. \quad (2)$$

Класичний алгоритм формування модуля вектора потокозчеплення ротора має вигляд

$$\Psi_{rc}(\omega) = \begin{cases} \Psi_m & \text{при } |\omega| \leq \omega_n; \\ \Psi_m \omega_n / |\omega| & \text{при } |\omega| > \omega_n, \end{cases} \quad (3)$$

де ω_n, Ψ_m – відповідно номінальні швидкість обертання ротора та потокозчеплення ротора АД (індексом “ n ” позначатимуться номінальні значення величин).

Задача оптимізації електромагнітного моменту двигуна в зоні ослаблення поля може бути сформульована наступним чином: для АД з описом (1) при врахуванні обмежень (2) за критерієм $M \Rightarrow \max$ для $0 \leq |\omega| \leq \omega_{max}$, де ω_{max} – максимально допустима швидкість двигуна, на інтервалі $0 < \Psi_r \leq \Psi_m$ знайти оптимальне потокозчеплення ротора $\Psi_{ro}(\omega)$ у рушійному та в генераторному режимі (режим рекупративного гальмування).

З урахуванням високого порядку та суттєвої нелінійності опису (1), (2) очевидно, що дану задачу оптимізації можна розв'язати лише чисельно. У числових дослідженнях у роботі використано типовий чотириполюсний АД потужністю 1,5 кВт. Номінальні дані цього двигуна подано у табл. 1, де P – вихідна потужність; U, I – напруга та струм фази статора (діючі значення); f, n – частота живлення та кількість обертів вала двигуна.

Таблиця 1 – Номінальні дані двигуна

$P=1,5$ кВт	$U=220$ В	$I=3,56$ А
$f=50$ Гц	$n=1413$ об/хв	$\cos\varphi=0,83$
$R_s = 6,46$ Ом	$R_r = 3,87$ Ом	$R_z = 1380$ Ом
$L_s = 0,389$ Гн	$L_r = 0,398$ Гн	$L_m = 0,374$ Гн

Для числової оптимізації опису (1), (2) за критерієм $M \Rightarrow \max$ було застосовано генетичний алгоритм, що на сьогодні є одним із найкращих методів параметричної оптимізації. На рис. 1 зображені граничні (екстремальні) характеристики АД при класичному (3), а на рис. 2 – при оптимальному алгоритмах формування потокозчеплення ротора, що отримані при $U_{max} = U_n = 311$ В, $I_{max} = 1,5I_n$ (U_n, I_n – номінальні напруга та струм фази статора).

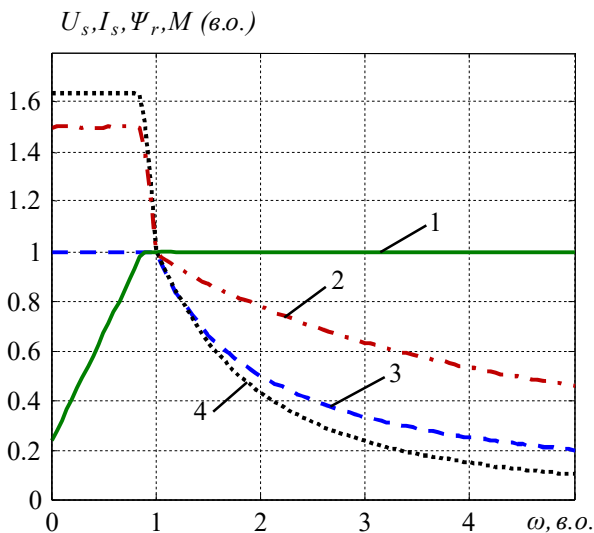


Рисунок 1 – Граничні характеристики АД у рушійному режимі роботи за класичним алгоритмом формування потокозчеплення

Зображені на цих рисунках змінні U_s (крива 1), I_s (крива 2), Ψ_r (крива 3), M (крива 4) та ω нормовані щодо своїх номінальних значень і вимірюються у відносних одиницях (в.о.).

Крива 3 на рис. 1 – це $\Psi_{rc}(\omega)$, а на рис. 2 – $\Psi_{ro}(\omega)$. Їх порівняння засвідчує істотну відмінність між модулями вектора потокозчеплення ротора, що відповідають класичному та оптимальному алгоритмам. А зіставлення кривих 4 на рис. 1 та рис. 2 підтверджує суттєве зростання електромагнітного моменту АД завдяки оптимізації. Аналізуючи рис. 3, варто відмітити, що за максимізації моменту двигуна в

умовах обмеження напруги та струму статора на площині механічної характеристики привода доцільно розглядати не дві, що є традиційним, а три зони регулювання швидкості, які можна назвати зонами A, B і C .

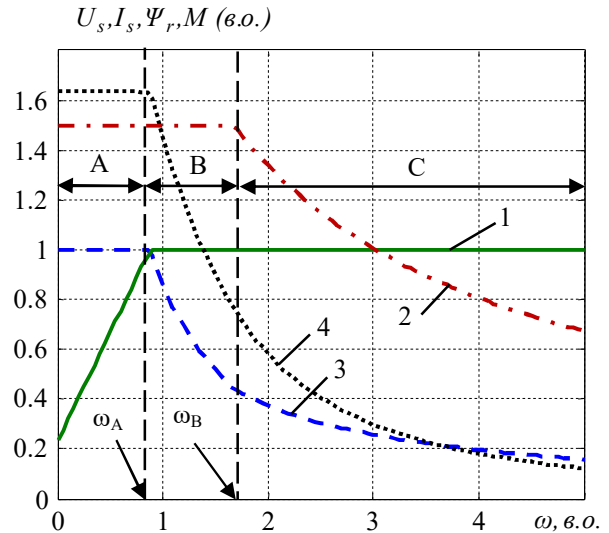


Рисунок 2 – Граничні характеристики АД у рушійному режимі роботи за оптимальним алгоритмом формування потокозчеплення

Межевою швидкістю для зон A та B є швидкість, де починається режим ослаблення поля двигуна. При ній напруга статора сягає свого обмеження за умови обмеження струму. Для зон B та C межевою є швидкість, за якої струм статора стає меншим від свого максимального значення. На рис. 2 ці межові швидкості позначено відповідно як ω_A та ω_B . Важливим є те, що в кожній із вказаних зон швидкості причини обмеження електромагнітного моменту двигуна є різними. Зокрема, в зоні A максимальний момент двигуна визначається обмеженням струму статора, в зоні B – обмеженнями як струму, так і напруги статора, а в зоні C – лише обмеженням напруги статора.

Вплив змін параметрів на екстремальні характеристики АД. У системах векторного керування АД основними параметричними збуреннями є варіації параметрів, що залежать від теплового та магнітного станів двигуна. Застосування опису (1) для числової оптимізації моменту АД дозволяє повною мірою врахувати зміни індуктивних параметрів, пов'язаних з нелінійністю кривої намагнічування двигуна. Проте варіації резистивних параметрів R_s, R_r залежать від нагріву двигуна й при оптимізації не враховуються. Ці варіації визначаються різницею між максимально допустимою температурою обмоток, згідно з класом їх ізоляції, та стартовою температурою двигуна. Для тягових АД в електротранспорті, який працює на відкритому повітрі, стартова температура в холодну пору року сягає від'ємних значень. Тому варіації опорів можуть бути істотни-

ми і їх вплив на екстремальні властивості АД потребує детального вивчення.

Ще однією нестабільною величиною є напруга U_{dc} ланки постійного струму привода, з якою обмеження напруги статора U_{max} пов'язане пропорційною залежністю $U_{max} = U_{dc} / \sqrt{3}$. Перша причина відхилень U_{dc} від номінального значення полягає в коливаннях напруги у промисловій трифазній мережі, яка живить привод. Друга причина варіацій U_{dc} пов'язана з інтенсивним відбором або поверненням енергії у фільтрувальний конденсатор ланки постійного струму в процесі розгону–гальмування АД. Вагомість цієї причини зростає у випадку живлення від спільної ланки постійного струму групи двигунів. Крім цього, значні довготривалі відхилення U_{dc} вниз від номіналу характерні для бортових тягових приводів, де ІН живиться від акумуляторних батарей, для яких зазвичай допускається зниження напруги на 30 % унаслідок розряджання. Таким чином, бачимо, що варіації напруги ланки постійного струму U_{dc} можуть сягати істотних значень, а тому їх вплив на екстремальні властивості АД має бути детально вивченим.

Відносні відхилення (варіації) величин обчислюються як

$$\delta x = (x_{var} - x_n) / x_n, \text{ в.о.}, \quad (4)$$

де x_{var} , x_n – відповідно варійоване та номінальне значення величини. Відрізки відносних варіацій змінюваних величин були наступними: $\delta U_{dc} \in [-0,3, 0,3]$ в.о., $\delta R_r \in [-0,45, 0,45]$ в.о., $\delta R_s \in [-0,3, 0,3]$ в.о. При цьому з метою спрощення в дослідженнях розглядалися квазістаціонарні теплові процеси двигуна, де відхилення опорів статора й ротора відносно своїх середніх значень мають однакові знаки, та була прийнята умова співвідношення варіацій опорів $\delta R_r \approx 1,5 \delta R_s$. За номінальні значення опорів статора й ротора вважались їх середні значення в інтервалах можливих змін.

Змінюючи опори та напругу ланки постійного струму привода у зазначених межах, за отриманим у [8] рівнянням для визначення ω_A були обчислені залежності відносних відхилень $\delta \omega_A$ межевої швидкості від варіацій параметрів. На основі досліджень було встановлено, що домінуючою серед варіацій є δU_{dc} , найгірший вплив на характеристики АД у русійному режимі має поєднання варіацій опорів R_s , R_r та напруги U_{dc} з протилежними знаками, а у генераторному режимі – з однаковими знаками. Графіки залежностей $\delta \omega_A$ від варіацій параметрів наведено на рис. 3, де крива 1 (2) відповідає русійному режиму, а крива 3 (4) – генераторному режиму роботи двигуна при $I_{max} = 1,5 I_n$ ($I_{max} = 2,5 I_n$). Причому на рис. 3 для кривих 1, 2 шкала δU_{dc} є інверсною за знаком.

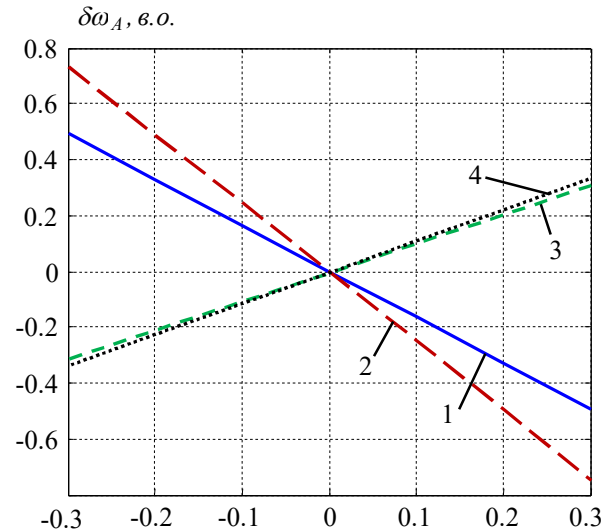


Рисунок 3 – Вплив на межу швидкості ω_A варіацій R_s , R_r та U_{dc}

Зображені на рис. 3 графіки засвідчують, що сукупний вплив варіацій опорів R_s , R_r та напруги U_{dc} на ω_A може бути дуже значним – $\delta \omega_A$ сягає 50 % у русійному режимі та 30 % у генераторному режимі роботи АД при $I_{max} = 1,5 I_n$.

Виконаємо числову оптимізацію опису АД (1), (2) з варійованими параметрами. Отримані результати для русійного режиму роботи двигуна зображено на рис. 4, 5. На рис. 4 надано графіки оптимального потокозчеплення, а на рис. 5 – відповідні їм графіки максимального моменту АД, де криві 1 отримано для номінальних значень параметрів, криві 2 – для варіацій параметрів $\delta R_r = 0,45$ в.о., $\delta R_s = 0,3$ в.о., $\delta U_{dc} = -0,3$ в.о., криві 3 – для варіацій параметрів $\delta R_r = -0,45$ в.о., $\delta R_s = -0,3$ в.о., $\delta U_{dc} = 0,3$ в.о.

Аналізуючи ці рисунки, бачимо, що внаслідок варіацій параметрів криві оптимального потокозчеплення зазнають значних змін у вигляді зсуву по горизонталі, що підтверджує проведені вище дослідження для відхилень ω_A , та деформації їх форми.

Результати дослідів для генераторного режиму роботи двигуна наведено на рис. 6, 7. На рис. 6 надано графіки оптимального потокозчеплення, а на рис. 7 – відповідні їм графіки максимального моменту АД. Тут криві 1 отримані для номінальних значень параметрів, криві 2 – для варіацій параметрів $\delta R_r = -0,45$ в.о., $\delta R_s = -0,3$ в.о., $\delta U_{dc} = -0,3$ в.о., криві 3 – для варіацій параметрів $\delta R_r = 0,45$ в.о., $\delta R_s = 0,3$ в.о., $\delta U_{dc} = 0,3$ в.о.

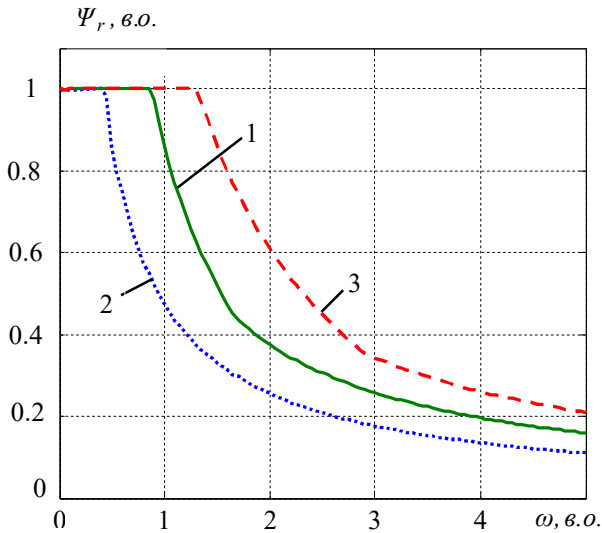


Рисунок 4 – Оптимальне потокозчеплення АД у рушійному режимі при варіаціях R_s , R_r та U_{dc}

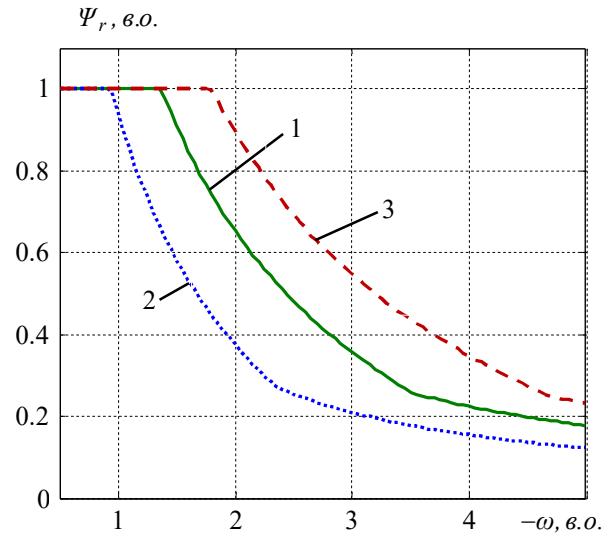


Рисунок 6 – Оптимальне потокозчеплення АД у генераторному режимі при варіаціях R_s , R_r та U_{dc}

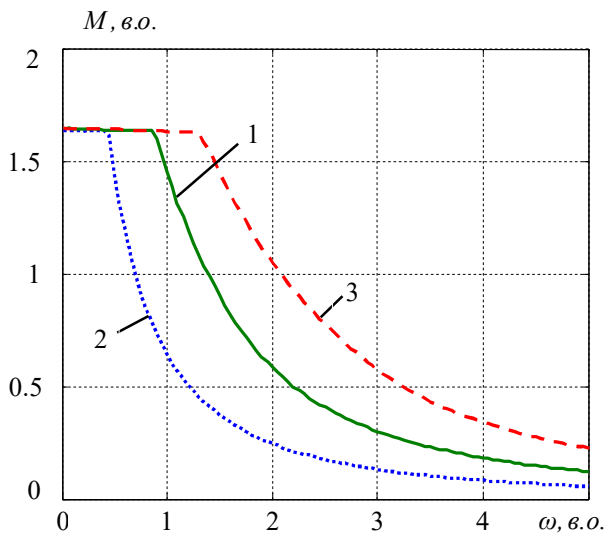


Рисунок 5 – Максимальний момент АД у рушійному режимі при варіаціях R_s , R_r та U_{dc}

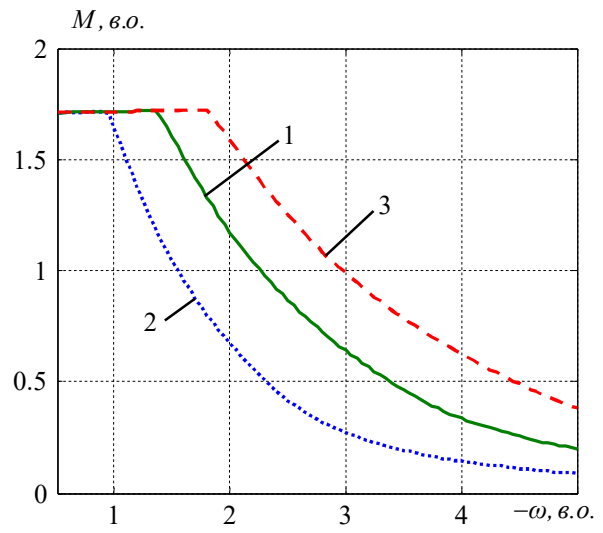


Рисунок 7 – Максимальний момент АД у генераторному режимі при варіаціях R_s , R_r та U_{dc}

У цілому, на основі наданих на рис. 3–7 результатів, можна зазначити, що на екстремальні характеристики АД – залежності оптимального потокозчеплення ротора та максимального моменту двигуна від швидкості – значно впливають варіації активних опорів двигуна й зміни напруги ланки постійного струму при домінуючому впливі останньої. При цьому можливе істотне зменшення моменту двигуна, якщо оптимізація здійснюється без урахування змін параметрів. Унаслідок зниження моменту стає проблематичним виконання приводом заданих умов технологічного процесу.

Отже виникає потреба в побудові екстремальної робастної САК АД, що дозволить отримувати максимальний момент двигуна при забезпеченні параметричної інваріантності.

Екстремальна параметрично інваріантна система керування АД. Для побудови екстремальної параметрично інваріантної САК АД було взято за основу класичну систему прямого векторного керування АД [1], удосконалену за рахунок нейронного оптимізатора моменту двигуна. На рис. 8 зображено функціональну схему запропонованої САК АД. Призначенням цієї системи є регулювання швидкості ротора АД із приєднаним до нього виробничим механізмом згідно із завданням ω^* у широкому діапазоні як вниз, так і вгору від номінальної швидкості із забезпеченням у зоні ослаблення поля максимального електромагнітного моменту за умов суттєвих параметричних збурень. У системі можна умовно виокремити силовий перетворювач, частину векторних перетворень, оцінювач потокозчеплення ротора ОПР, підсистему регулювання та підсистему оптимізації моменту.

feedforward networks), які називають також багатошаровими перцептронами. Концепція та спосіб надання таким мережам властивості параметричної інваріантності вперше запропонована в [9] і практично реалізована в [10] для задачі енергоефективного керування АД.

Згідно із цим способом побудова параметрично інваріантної НМ полягає у виконанні трьох умов: 1) розширення простору входів НМ за рахунок нестабільних параметрів, до яких потрібна інваріантність; 2) урахування в навчальній множині нестабільних параметрів у можливих діапазонах їх змін; 3) отримання поточних значень змінних параметрів шляхом вимірювання або оцінювання за допомогою спостерігачів та подання цієї інформації на відповідні входи НМ у процесі її роботи.

Отже нам потрібно синтезувати НМ, яка з достатньо високою точністю відтворюватиме нелінійну векторну функцію

$$\Psi_{ro}(|\omega|, R_r, U_{dc}, mg) = \arg \max_{\Psi_r} M(\Psi_r, \omega, R_r, R_s, U_{max}, I_{max}) \quad (6)$$

з урахуванням (2), (5) та обмеження $0 < \Psi_r \leq \Psi_{rn}$, (7)

а також рівнянь зв'язку

$$U_{dc} = \sqrt{3}U_{max}; \quad R_s = K_R R_r R_{sn} / R_{rn}, \quad (8)$$

де $K_R < 1$ – коефіцієнт пропорційності між квазістационарними варіаціями опорів ротора та статора.

На рис. 9 надана архітектура НМ, яку ми застосуватимемо, де кружками умовно зображено нейрони, а стрілками – зв'язки між нейронами та зміщення, що на них подаються. Мережа має чотири входи, один захований шар нейронів і один вихідний нейрон. Вихід i -го нейрона мережі y_i визначається як

$$y_i = \lambda_i \left(\sum x_j w_{ij} + b_i \right), \quad (9)$$

де x_1, x_2, \dots, x_n – входи нейрона; $w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{in}$ – вагові коефіцієнти зв'язків (синаптичні зв'язки); b_i – зміщення нейрона; $\lambda_i(\bullet)$ – активаційна функція. У мережі нейрони прихованого шару мали функції активації типу гіперболічний тангенс, а вихідний нейрон мав лінійну функцію активації. На входи мережі подаються сигнали, пропорційні величинам $|\omega|$, U_{dc} , R_r , та релейний сигнал mg , а на виході НМ формується оптимальне потокозчеплення Ψ_{ro} .

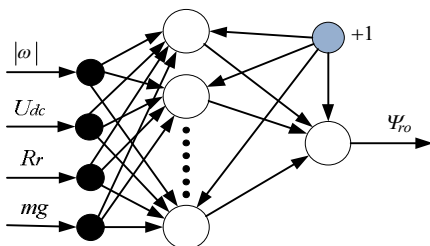


Рисунок 9 – Архітектура нейронної мережі для визначення оптимального потокозчеплення

Для навчання мережі треба сформулювати навчальну множину даних, яка складається з масивів векторів входу X_k , $k = \overline{1, N}$ та виходу Y_k , $k = \overline{1, N}$ мережі, де N – вимірність масиву. У процесі навчання при подаванні на вхід НМ вектора X_k на виході мережі формується вектор оцінки \hat{Y}_k і визначається похибка мережі $e_k = \hat{Y}_k - Y_k$. Після досягнення $k = N$ закінчується цикл (епоха) навчання й обчислюється деякий функціонал якості, наприклад, середня квадратична похибка мережі E_{net} . Залежно від значення E_{net} програма навчання змінює коефіцієнти синаптичних зв'язків між нейронами та зміщення нейронів. Навчання триває доти, поки E_{net} не стане менше заданої або коли буде досягнута задана кількість епох навчання.

Для навчання НМ було вибрано 91 градацію $|\omega|$, по сім градацій U_{dc} і R_r та дві градації mg . Утворивши із цих величин усі можливі комбінації, був отриманий масив векторів входу $X_k = (|\omega|_k mg_k / \omega_n, U_{dc,k} / U_{dcn}, R_{r,k} / R_{rn}, mg_k)^T$, і, шляхом розв'язання (6), з урахуванням (1), (2), (5), (7), (8), був визначений масив виходів мережі $Y_k = \Psi_{ro,k}$, $k = \overline{1, N}$, де $N = 8918$.

На сформованій таким чином навчальній множині було здійснено навчання НМ за допомогою модифікації Левенберга–Марквардта методу зворотного поширення похибки [11].

Результати моделювання. Дослідження динамічних властивостей САК АД з максимізацією моменту в зоні ослаблення поля було здійснено за допомогою математичного моделювання у програмному середовищі MatLab/Simulink. При моделюванні двигун описувався за (1) і (2), де було задано обмеження струму статора $I_{max} = 1,5 I_{sn}$. Динаміка ІН з ШІМ була апроксимована аперіодичною ланкою 1-го порядку. Модель керуючої частини ґрунтувалась на принципах прямого векторного керування АД відповідно до функціональної схеми, що зображена на рис. 8. При цьому з метою порівняння було побудовано моделі двох екстремальних САК АД, що відрізнялися в частині підсистеми оптимізації моменту двигуна.

У першій системі (САК1) оптимальне потокозчеплення Ψ_{ro} було визначене для номінальних значень параметрів (криві 1 на рис. 4, 6) і формувалося в табличному вигляді з інтерполяцією даних без будь-якого компенсування впливу варіацій параметрів. У другій системі (САК2) здійснювалась параметрично інваріантна оптимізація моменту двигуна на основі НМ згідно зі схемами на рис. 8, 9.

Сценарій моделювання був таким. Спочатку АД працював в усталеному режимі з номінальною швидкістю та моментом навантаження $M_L = 0,1 M_n$ при номінальній напрузі ланки постійного струму й попередньо встановлених певних варіаціях опорів статора та ротора, що відображали «холодний» або «гарячий»

стан двигуна. У момент часу $t = 1,3 \text{ c}$ варіювалась напруга U_{dc} таким чином, що вона експоненціально сягала нового усталеного значення за $0,03 \text{ c}$. Далі, починаючи з $t = 1,4 \text{ c}$, завдання швидкості ω^* змінювалося за лінійною залежністю від ω_n до $3\omega_n$.

Результати моделювання зображено на рис. 10–13, де на рисунках а) надано графіки завдання швидкості ω^* (криві 1) та швидкості ротора ω (криві 2), на рисунках б) зображено графіки модулів векторів струму I_s (криві 1) та напруги U_s (криві 2) статора, а на рисунках в) зображено графіки компоненти $\Psi_{r\alpha}$ вектора потокозчеплення ротора $\bar{\Psi}_r$ у нерухомих відносно статора координатах (α, β) .

Порівняємо рис. 10 і рис. 11, перехідні процеси на яких отримані при вищій за номінальну напрузі ланки постійного струму привода за «холодного» стану двигуна. Згідно з графіками на рис. 10,с і рис. 11,в, на початковій стадії моделювання Ψ_r у САК2 більше, ніж у САК1, що є наслідком реакції НМ на від'ємні варіації опорів. На інтервалі розгону на рис. 10,б наявна ділянка обмеження струму, а на рис. 11,б існують ділянки обмеження як струму, так і напруги. Порівняння кривих 3 на рис. 10,а та рис. 11,а показує, що динамічний момент двигуна в САК2 більший, ніж у САК1.

Зіставлення кривих 2 на рис. 10,а та рис. 11,а показує, що час розгону привода в першому випадку дорівнює $0,17 \text{ c}$, а в другому – $0,14 \text{ c}$. Отже, з результатів моделювання випливає, що відсутність параметричної інваріантності призвело до погіршення швидкодії системи на $(0,17 - 0,14) \times 100\% / 0,14 = 21\%$.

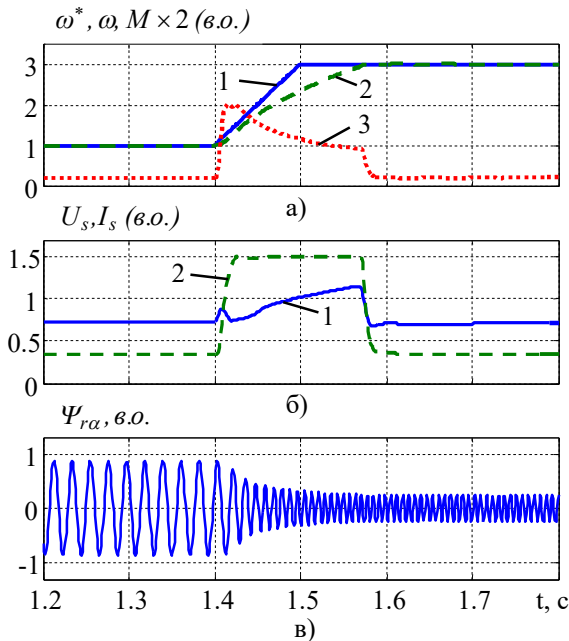


Рисунок 10 – Перехідні процеси в САК АД з оптимізацією моменту без компенсування впливу змін параметрів за $\delta R_r = -0,45 \text{ в.о.}$, $\delta R_s = -0,3 \text{ в.о.}$, $\delta U_{dc} = 0,15 \text{ в.о.}$

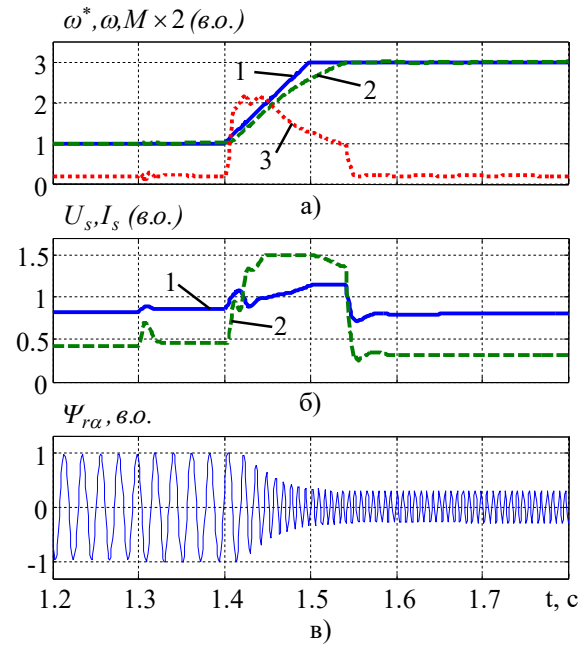


Рисунок 11 – Перехідні процеси в САК АД з параметрично інваріантною оптимізацією моменту за $\delta R_r = -0,45 \text{ в.о.}$, $\delta R_s = -0,3 \text{ в.о.}$, $\delta U_{dc} = 0,15 \text{ в.о.}$

Виконаємо порівняння рис. 12 та рис. 13, перехідні процеси на яких отримані при нижчій за номінальну напрузі ланки постійного струму привода за «гарячого» стану двигуна.

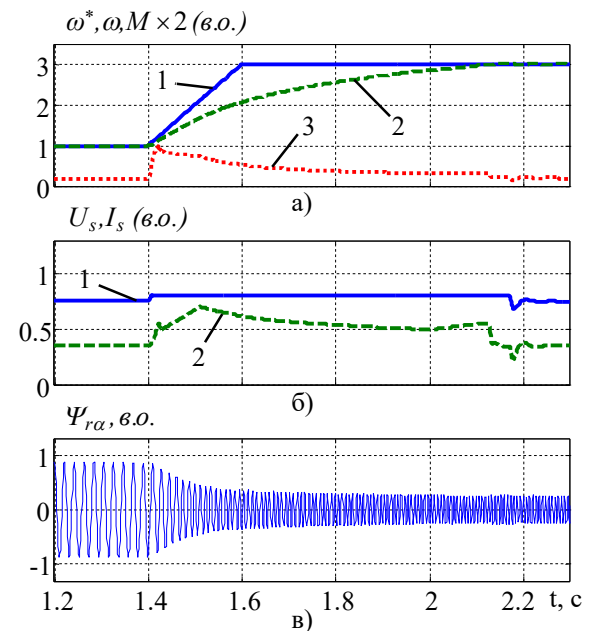


Рисунок 12 – Перехідні процеси в САК АД з оптимізацією моменту без компенсування впливу змін параметрів за $\delta R_r = 0,45 \text{ в.о.}$, $\delta R_s = 0,3 \text{ в.о.}$, $\delta U_{dc} = -0,2 \text{ в.о.}$

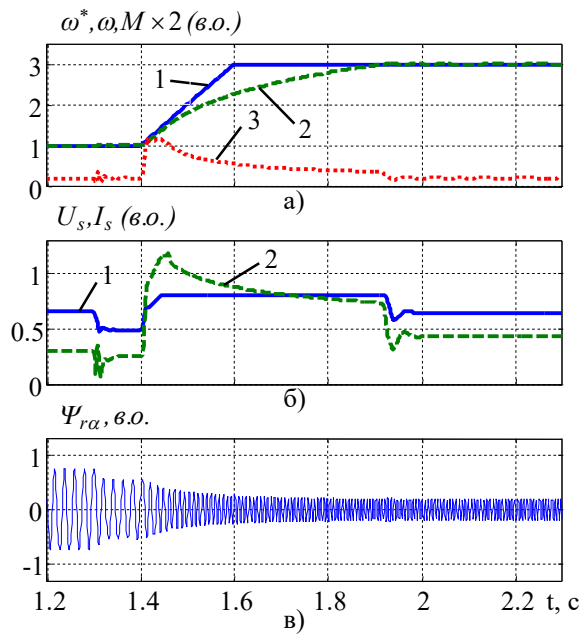


Рисунок 13 – Перехідні процеси в САК АД з параметрично інваріантною оптимізацією моменту за $\delta R_r = 0,45$ в.о., $\delta R_s = 0,3$ в.о., $\delta U_{dc} = -0,2$ в.о.

Згідно з графіками на рис. 12,в і рис. 13,в, на вихідній стадії моделювання Ψ_r у САК2 менше, ніж у САК1, що є наслідком реакції НМ на додатні варіації опорів. Після появи від'ємної варіації δU_{dc} поточозчеплення у САК2 зменшується ще більше. На інтервалі розгону видно, що U_s обмежується в обох системах, але I_s сягає значно більших значень у САК2. Зіставлення кривих 3 на рис. 12,а та рис. 13,а показує, що динамічний момент двигуна в САК2 більший, ніж в САК1.

Порівняння кривих 2 на рис. 12,а та рис. 13,а показує, що час розгону привода в першому випадку дорівнює $0,69$ с, а в другому – $0,49$ с. Отже, результати моделювання свідчать про те, що відсутність властивості параметричної інваріантності спричинило зниження швидкодії системи на $(0,69 - 0,49) \times 100 \% / 0,49 = 41$ %.

Таким чином, отримані результати дослідження перехідних процесів, що наведені на рис. 10–13, показали наявність високих показників якості в запропонованій САК АД із нейромережною параметрично інваріантною максимізацією моменту в режимі ослаблення поля. У разі відсутності в системі параметричної інваріантності істотно погіршується швидкодія при змінах параметрів.

ВИСНОВКИ. На основі досліджень встановлено, що на оптимальне поточозчеплення та максимальний момент АД значно впливають теплові варіації активних опорів двигуна та, більшою мірою, коливання напруги ланки постійного струму силового перетворювача привода. Суттєве зменшення моменту двигуна внаслідок змін параметрів може призвес-

ти до неможливості виконання приводом вимог технологічного процесу.

Для поліпшення характеристик АД в умовах значних параметричних збурень запропонована принципово нова концепція побудови екстремальної САК АД, що ґрунтується на застосуванні параметрично інваріантної нейронної мережі. Синтезована за цією концепцією система максимізує момент АД у режимі ослаблення поля при врахуванні варіацій опорів двигуна та коливань напруги ланки постійного струму.

Порівняння динамічних властивостей САК АД з оптимізацією моменту але без компенсування впливу змін параметрів та запропонованої у даній роботі САК АД з нейромережною параметрично інваріантною оптимізацією моменту засвідчило істотно кращу швидкодію останньої у процесах розгону на високих швидкостях двигуна.

ЛІТЕРАТУРА

1. Novotny D.W., Lipo T.A.. Vector control and dynamics of AC drives. – Oxford: Clarendon Press, 1996. – 430 p.
2. Шрейнер Р.Т., Дмитриенко Ю.А. Оптимальное частотное управление асинхронными электроприводами. – Кишинев: Штиинца, 1982. – 224 с.
3. Bodson M., Chiasson J.N., Novotnak R.T. A systematic approach to selecting flux references for torque maximization in induction motors // IEEE Trans. on Control Sys. Technol. – 1995. – Iss. 3 (4). – PP. 388–397.
4. Wieser R.S. Optimal rotor flux regulation for fast accelerating induction machines in the field weakening region // Proc. IEEE Ind. Applicat. Soc. Annu. Meeting IAS. – 1997. – Iss. 1. – PP. 401–409.
5. Harnefors L., Pietilainen K., Gertmar L. Torque-maximizing field-weakening control: design, analysis, and parameter selection // IEEE Trans. Ind. Electron. – 2001. – Iss. 48 (1). – PP. 161–168.
6. Mengoni M., Zarri L., Tani A. et al. Stator flux vector control of induction motor drive in the field weakening region // IEEE Trans. Power Elec. – 2008. – Iss. 23 (2). – PP. 941–949.
7. Mengoni M., Zarri L., Tani A. et al. A comparison of four robust control schemes for field-weakening operation of induction motors // IEEE Trans. Power Elec. – 2012. – Iss. 27 (1). – PP. 307–320.
8. Приймак Б.І. Властивості асинхронного електроприводу з максимізацією моменту у зоні високих швидкостей ротора // Вісник Нац. техн. унту “Харківський політехн. ін-тут”. Темат. вип. «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика. Силова електроніка та енергоефективність». – 2015. – С. 142–146.
9. Приймак Б.І. Синтез параметрично інваріантної нейронної мережі для оптимізації втрат в асинхронному електроприводі // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2005. – Вип. 1 (16). – С. 3–7.
10. Pryumak B., Moreno-Eguilaz J.M., Peracaula J. Neural network flux optimization using a model of losses in induction motor drives // Mathematics and

Computers in Simulation. – 2006. – Iss. 71 (4). – PP. 290–298.

11. Hagan M.T., Menhaj M.B. Training Feed-

forward Networks with the Marquardt Algorithm // IEEE Trans. Neural Net. – 1994. – Iss. 5 (6). – PP. 989–993.

CONTROL OF INDUCTION MOTORS WITH PARAMETRIC INVARIANT TORQUE OPTIMIZATION IN THE FIELD WEAKENING AREA BASED ON NEURAL NETWORK

B. Pryymak

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»

prosp. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine. E-mail: bp-08@ukr.net

In the article the theme of improving the quality of vector-controlled induction motor electric drives that operate at speeds rotor, much higher from the nominal value. In this area, is a promising development of control systems with extreme maximization torque of induction motor in field weakening mode. However, presently known systems of this type have drawbacks such as low parametric sensitivity and (or) low optimization precision. Therefore, the need for improvement of these systems is actual. **Purpose.** Study of the effect of parametric perturbation on extreme characteristics induction motor and building automatic control system of induction motor with parametric invariant optimization of torque in field weakening mode based on neural network. **Methodology.** We used advanced model of induction motor, which takes into account the main magnetic flux saturation and iron loss of power in the motor. To determine the optimal rotor flux linkage was applied numerical optimization genetic algorithm. Simulation of dynamic processes was implemented software environment MatLab/Simulink. **Results.** According to the research found a significant decrease in the torque of the induction motor due to voltage fluctuations DC link of drive and thermal variations of motor resistances. To reduce the negative impact of the changes in the parameters was proposed concept of building extreme control systems of induction motor based on parametrically invariant neural network. **Originality.** For the first time we determined depending boundary (base) speed of the rotor resistances motor variations and fluctuations of supply voltage inverter. Was found, that the worst impact on the optimal rotor flux linkage and optimal motor torque in the driving mode have the combination of resistance and voltage variations of different signs, but in generator mode - the same signs. **Practical value.** Simulation showed that the synthesized system has significantly better performance in the process of acceleration with high motor speed than its prototype. References 11, tables 1, figures 13.

Key words: induction motor, field weakening, optimization, parametric invariance, neural network.

REFERENCES

1. Novotny, D.W. and Lipo, T.A. (1996), *Vector control and dynamics of AC drives*, Oxford: Clarendon Press.

2. Shreyner, R.T. and Dmitrienko, Yu.A. (1982), *Optimalnoe chastotnoe upravlenie asinhronnyimi elektropriwodami* [The optimum frequency control of asynchronous electric drives], Shtiintsa, Kishinev. (in Russian)

3. Bodson, M., Chiasson, J.N. and Novotnak, R.T. (1995), “A systematic approach to selecting flux references for torque maximization in induction motors”, *IEEE Trans. on Control Sys. Technol.*, Vol. 3, no. 4, pp. 388–397.

4. Wieser, R.S. (1997), “Optimal rotor flux regulation for fast accelerating induction machines in the field weakening region”, *Proc. IEEE Ind. Applicat. Soc. Annu. Meeting IAS*, Vol. 1, pp. 401–409.

5. Harnefors, L., Pietilainen, K. and Gertmar, L. (2001), “Torque-maximizing field-weakening control: design, analysis, and parameter selection”, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 48, no. 1, pp. 161–168.

6. Mengoni, M., Zarri, L., Tani, A., Serra, G. and Casadei, D. (2008), “Stator flux vector control of induction motor drive in the field weakening region”, *IEEE Trans. Power Elec.*, Vol. 23, no. 2, pp. 941–949.

7. Mengoni, M., Zarri, L., Tani, A., Serra, G. and Casadei, D. (2012), “A comparison of four robust control schemes for field-weakening operation of induction motors”, *IEEE Trans. Power Elec.*, Vol. 27, no. 1, pp. 307–320.

8. Pryymak, B.I. (2015), “Properties induction motor electric drive with maximizing the torque in the area of high-speed rotor”, *Visnyk NTU “KhPI”, Temat. vyp. «Problemy avtomatyzovanoho elektropriyvoda. Teoriya i praktyka. Sylova elektronika ta enerhoefektyvnist»*, pp. 142–146. (in Ukrainian)

9. Pryymak, B.I. (2005), “Synthesis a parametrically invariant neural network to optimize the loss of the induction motor electric drive”, *Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia*, Vol. 1, no. 16, pp. 3–7. (in Ukrainian)

10. Pryymak, B., Moreno-Eguilaz, J.M. and Peracaula, J. (2006), “Neural network flux optimization using a model of losses in induction motor drives”, *Mathematics and Computers in Simulation*, Vol. 71, no. 4, pp. 290–298.

11. Hagan, M.T. and Menhaj, M.B. (1994), “Training Feedforward Networks with the Marquardt Algorithm”, *IEEE Trans. Neural Net.*, Vol. 5, no. 6, pp. 989–993.

Стаття надійшла 08.02.2016.