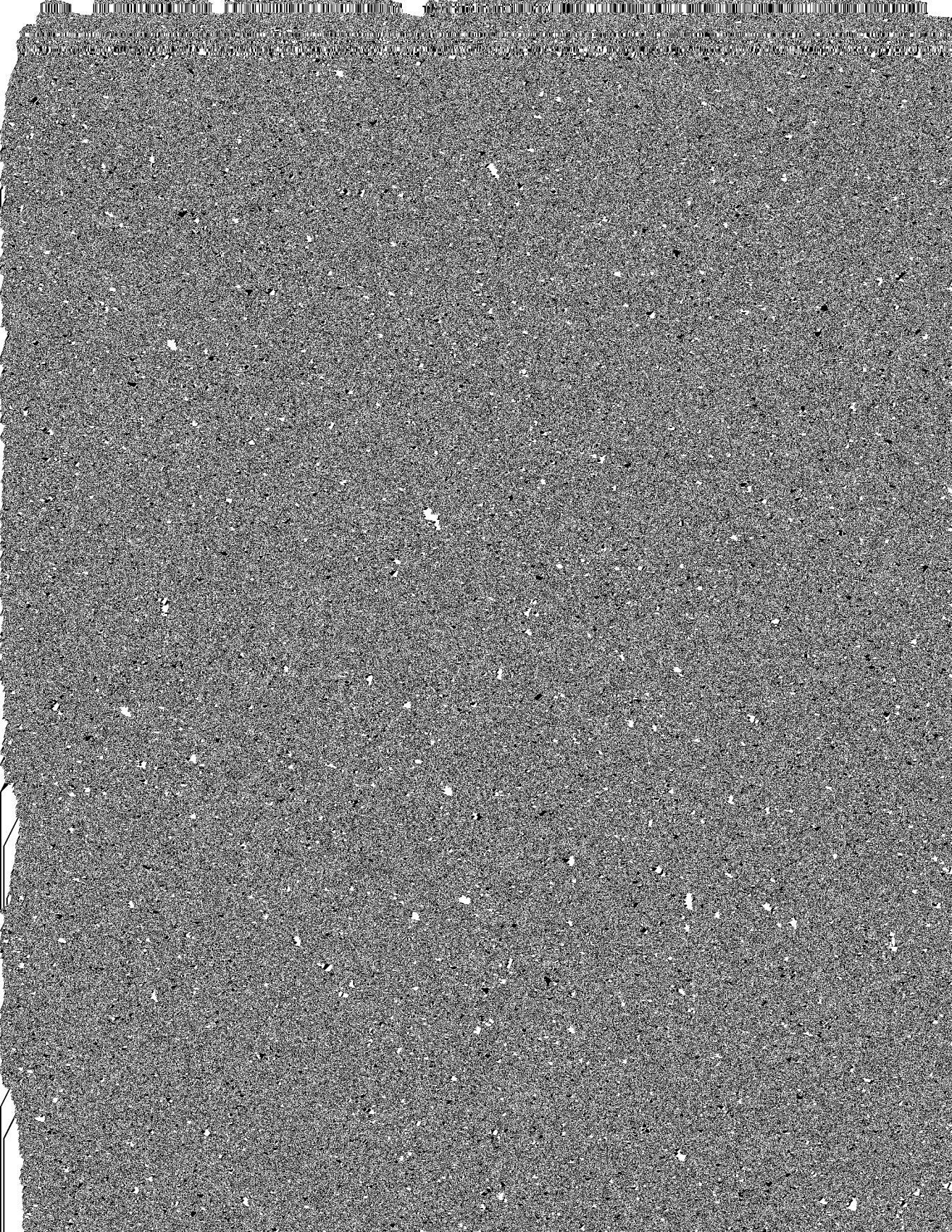


УДК 004.942: 621.313 (045)

Красношапка Н. Д., к.т.н.

ЗМЕНШЕННЯ ПОМИЛКИ РОЗГАУМЦЮВАННЯ ШКОРИХ РЕЖИМІВ
К. Р.



(момент інерції механізму, приведений до валу АД, в 3...5 разів більше моменту інерції двигуна) достатня точність розрахунків може бути забезпечена з використанням методики визначення динамічного моменту по статичній механічній характеристиці. Для малоінерційних асинхронних електроприводів достатня точність розрахунку перехідного процесу пуску може бути забезпечена тільки при врахуванні електромагнітних перехідних процесів в магнітозв'язаних контурах обмо-

ток статора і ротора.

Математичний опис асинхронного електропривода при переході до зображуваних векторів напруг, струмів і поточкозчеплень на комплексній площині в координатній системі +1, +j, 0, що обертається з довільною швидкістю ω_k , за умови, що параметри роторного контуру АД приведені до числа фаз, кількості витків і частоти струмів статора, запишеться у вигляді [1]:

$$\left. \begin{aligned} \bar{u}_1 &= r_1 \bar{i}_1 + L_1 \frac{d\bar{i}_1}{dt} + L_0 \frac{d\bar{i}'_2}{dt} + j\omega_k (L_1 \bar{i}_1 + L_0 \bar{i}'_2); \\ 0 &= r_2 \bar{i}'_2 + L_2 \frac{d\bar{i}'_2}{dt} + L_0 \frac{d\bar{i}_1}{dt} + j(\omega_k - \omega_{dc}) (L_0 \bar{i}_1 + L_2 \bar{i}'_2); \\ M &= pL_0 I_0 (\bar{i}_1 \times \bar{i}'_2^*); \\ M - M_c &= J_\Sigma \frac{d\omega_d}{dt}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де: \bar{u}_1, \bar{i}_1 – зображуючі вектори напруги і струму статорного контуру; \bar{i}'_2 – зображуючий вектор струму роторного контуру, приведеного до статора АД; L_1, L_2 – повні індуктивності статорного і приведенного роторного контурів; L_0 – результуюча індуктивність взаємодукції статорних і роторних контурів АД; \bar{i}'_2^* – спряжена комплексна величина зображуючого вектора струму ротора, приведеного до статорного контуру АД; J_Σ – сумарний момент інерції на валу двигуна.

В статорних і роторних контурах з'являються комплексні ЕРС обертання, обумовлені обертанням координатних осей (ω_k) і еквівалентною швидкістю обертання ротора ($\omega_{dc} = p\omega_d$).

Розв'язання системи диференціальних рівнянь (1), не дивлячись на її відносну простоту, надзвичайно ускладнене суттєвою нелінійністю зміни параметрів, які входять в рівняння, і складністю функціональних зв'язків між параметрами, струмами і швидкістю ротора АД.

Постановка завдання

Метою статті є розробка заходів, що

дозволять знизити похибку при проведенні розрахунків пускових процесів асинхронних електроприводів за статичними характеристиками у випадках, коли момент інерції навантаження наближений за величиною до моменту інерції електродвигуна.

Наявність значних знакозмінних складових електромагнітного моменту АД в процесі його пуску вимагає необхідності їх врахування, що приводить до поняття динамічної механічної характеристики. Кожна точка на динамічній характеристиці АД визначає величину електромагнітного моменту в функції швидкості і часу, що перетворює її на фазову траєкторію перехідного процесу пуску. Оскільки характер перехідного процесу пуску асинхронного електроприводу залежить не тільки від параметрів АД, але і від параметрів приводу, то будь-який АД матиме безліч динамічних механічних характеристик в системі асинхронного електропривода. Дослідження перехідних процесів в пускових режимах АД свідчить, що коливання величини електромагнітного моменту АД щодо його значення по

статичній механічній характеристиці навіть при малому моменті інерції привода практично припиняється при розгоні ротора АД до швидкості, відповідній величині критичного ковзання.

Результати аналізу перехідного електромеханічного процесу пуску асинхронного електропривода з урахуванням електромагнітних процесів, обумовлених електромагнітною інерцією магнітозв'язаних статорних і роторних контурів АД з використанням математичного опису (1) за умови корекції параметрів роторного контуру АД у функції поточного значення ковзання, добре узгоджуються з результатами експериментальних досліджень пускових характеристик реальних електроприводів [3].

Це дозволяє результати розрахунку пускових характеристик асинхронного електропривода, що базуються на математичному описі електромагнітних і електромеханічних перехідних процесів в АД використовувати як еталонні при оцінці результатів розрахунку пускових режимів асинхронного електропривода різної потужності з різними значеннями приведенного до валу АД моменту інерції механізму.

Для асинхронних двигунів середньої потужності (від 1,5 до 20 кВт) і сумарному моменті інерції електропривода $J_{\Sigma} \leq 4J_{\text{дв}}$ ($J_{\text{дв}}$ – момент інерції ротора двигуна) ударні і знакозмінні моменти не роблять істотного впливу на час перехідного процесу і при розрахунках обов'язково потрібно враховувати коефіцієнт динамічності для поточного значення швидкості:

$$k_d = M_{\text{дин}}(\omega) / M_{\text{ст}}(\omega),$$

де: $M_{\text{дин}}(\omega)$ і $M_{\text{ст}}(\omega)$ – величини моменту АД при швидкості ω по динамічній і статичній механічних характеристиках.

При $J_{\Sigma} > 4J_{\text{дв}}$ тривалість впливу ударних і знакозмінних моментів багато менше тривалості процесу розгону електроприводу і розрахунок перехідних процесів пуску електроприводів з такими параметрами можна проводити по статичних механічних характеристиках АД.

Шляхи зменшення похибки розрахунку пускових процесів в асинхронному електроприводі за статичними механічними характеристиками

З метою уточнення усередненої величини k_d і оцінки можливості розрахунку втрат АД в пусковому режимі по статичній механічній характеристиці була проведена серія розрахунків процесу пуску асинхронного електроприводу з короткозамкненим асинхронним двигуном 4A160S2Y3 потужністю 15 кВт з постійним (номінальним) і вентиляторним моментом опору на валу у складі електроприводу з різними величинами приведених до валу АД моментів інерції механізму. Розрахунки часу пуску і втрат в двигуні електроприводу проводилися як по статичній механічній характеристиці АД, визначеній за паспортними даними двигуна з корекцією параметрів роторного контуру в функції поточного значення ковзання по законах:

$$r'_2 = r'_{2n} (1 + 0,25s^2) \text{ і } x'_2 = x'_{2n} (1 - 0,75\sqrt{s}),$$

так і з використанням його математичного опису (2) [1] при скорегованих параметрах роторного контуру.

$$\left. \begin{aligned} u_{1\alpha} &= r_1 i_{1\alpha} + L_1 \frac{di_{1\alpha}}{dt} + L_0 \frac{di'_{2\alpha}}{dt}; \\ u_{1\beta} &= r_1 i_{1\beta} + L_1 \frac{di_{1\beta}}{dt} + L_0 \frac{di'_{2\beta}}{dt}; \\ 0 &= r'_2 i'_{2\alpha} + \frac{d}{dt} (L'_2 i'_{2\alpha}) + p\omega L'_2 i'_{2\beta} + L_0 \frac{di_{1\alpha}}{dt} + \\ &+ p\omega L_0 i_{1\beta}; \\ 0 &= r'_2 i'_{2\beta} + \frac{d}{dt} (L'_2 i'_{2\beta}) - p\omega L'_2 i'_{2\alpha} + L_0 \frac{di_{1\beta}}{dt} - \\ &- p\omega L_0 i_{1\alpha}; \\ M &= pL_0 (i_{1\beta} i'_{2\alpha} - i_{1\alpha} i'_{2\beta}); \\ M - M_c &= J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt}, \end{aligned} \right\} (2)$$

$$\text{де: } \frac{d}{dt} (L'_2 i'_2) = \frac{dL'_2}{dt} i'_2 + L'_2 \frac{di'_2}{dt},$$

L_1 , L_2 і L_0 – власні і взаємна індуктивності статорного і приведенного роторного контурів відповідно.

Закон зміни параметрів роторного контуру в «Г»-видовій схемі заміщення підбирався за умовами збігу розрахункових струмів і моментів номінального і пускового режимів з даними каталогу двигунів серії 4А [4] стосовно двигуна 4А160S2У3 і перевіркою величини кратності максимального моменту.

У таблицях 1 і 2 наведені результати розрахунків пуску електроприводу з АД 4А160S2У3 з різними значеннями сумарного приведенного моменту інерції на його валу $J_{\Sigma} = K_J J_{дв}$ ($J_{дв} = 0,048 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$).

Дані в табл. 1 відносяться до випадку постійного, рівного номінальному, моменту навантаження на валу двигуна в процесі пуску, а в табл. 2 – при вентиляторному характері моменту навантаження:

$$M_c / M_{ном} = (\omega / \omega_{ном})^2.$$

Розрахункові значення часу пуску $t_{п}$, втрат енергії під час пуску $W_{п}$, середнього моменту під час пуску $M_{сєр}$ (по відношенню до номінальної величини) приведені в чисельнику дроби значень параметрів, визначені по математичній моделі АД з урахуванням електромагнітних перехідних процесів в двигуні, а в знаменнику – по статичній механічній характеристиці без урахування перехідних електромагнітних взаємодій статорних і роторних контурів двигуна.

Коефіцієнт K_M визначає величину відношення відповідних електромагнітних моментів, розрахованих по математичній моделі на основі диференційних рівнянь рівноваги напруг статорних і роторних контурів і на основі статичної механічної характеристики. Час пуску, втрати енергії, середні значення моменту розраховані за умов розгону ротора АД від нерухомого стану до швидкості, відповідної значенню ковзання 5%.

Як показано в табл. 1 та табл. 2, результати розрахунків часу пуску, втрат енергії і середнього значення електромагнітного моменту за час пуску по моделях, що враховують і не враховують перехідні електромагнітні процеси в двигуні при його пуску, мають істотні розбіжності.

Розбіжність цих результатів зростає із зменшенням моменту інерції електроприводу і особливо велике при розрахунку режиму пуску з постійним (номінальним) моментом опору на валу електродвигуна.

Таблиця 1. Пуск електропривода при $M_c = M_{ном} = \text{const}$

K_J , в.о.	$t_{п}$, с	$W_{п}$, кДж	$M_{сєр}$, в.о.	K_M , в.о.	$\Delta t_{п}$, в.о.	$\Delta W_{п}$, в.о.
1,0	0,862	42,73	1,342	0,875	0,384	0,425
	—	—	—			
2,0	0,531	24,57	1,553	0,884	0,361	0,398
	1,646	81,63	1,355			
3,0	1,062	49,15	1,553	0,889	0,244	0,387
	2,427	120,3	1,363			
4,0	1,593	73,72	1,553	0,892	0,337	0,381
	3,203	158,8	1,367			
	2,123	98,29	1,553			

Таблиця 2. Пуск електропривода при $M_c/M_{ном} = (\omega / \omega_{ном})^2$.

K_J , в.о.	$t_{п}$, с	$W_{п}$, кДж	$M_{сєр}$, в.о.	K_M , в.о.	$\Delta t_{п}$, в.о.	$\Delta W_{п}$, в.о.
1,0	0,279	11,94	1,392	0,843	0,201	0,236
	—	—	—			
2,0	0,223	9,125	1,651	0,866	0,171	0,201
	0,537	23,07	1,429			
3,0	0,445	18,25	1,651	0,877	0,158	0,197
	0,791	34,07	1,448			
4,0	0,668	27,37	1,651	0,883	0,147	0,189
	1,045	44,99	1,458			
	0,891	36,5	1,651			

Значення коефіцієнтів $\Delta t_{п}$ і $\Delta W_{п}$ у відносних одиницях (в.о.) характеризують похибки в розрахунках часу пуску і втрат енергії в двигуні за час пуску при даному характері моменту опору навантаження і значеннях сумарного моменту інерції на валу АД, віднесені до значень цих величин при врахуванні електромагнітних перехідних процесів в пусковому режимі.

На рис. 1 наведені залежності відно-

сних значень похибок розрахунку часу пуску (суцільна лінія) і втрат енергії в процесі пуску (пунктирна лінія) по статичній механічній характеристиці залежно від величини сумарного моменту інерції на валу АД для випадків постійного (номінального) (криві 1) і вентиляторного $M_c/M_{ном} = (\omega/\omega_{ном})^2$ (криві 2) характерів моменту навантаження електроприводу в процесі пуску.

При вентиляторному характері моменту навантаження відносні величини похибок в розрахунку часу пуску по статичній механічній характеристиці АД із зміною моменту інерції приводу складає від 14,7 % ($K_J = 4,0$) до 20,1 % ($K_J = 1,0$), а втрат енергії – від 18,9 % ($K_J = 4,0$) до 23,6 % ($K_J = 1,0$).

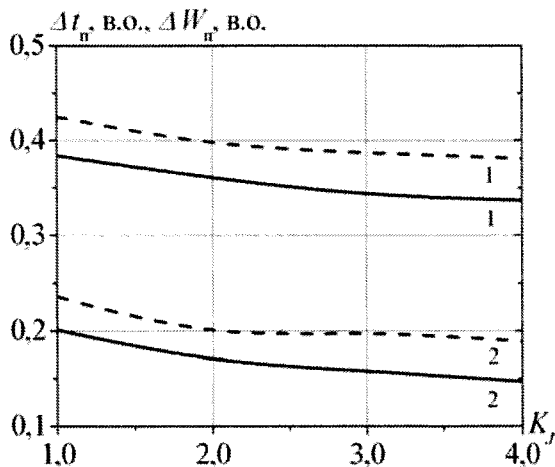


Рис. 1. Відносні значення похибок розрахунку часу пуску і втрат енергії в процесі пуску по статичній механічній характеристиці

При постійному моменті опору на валу електроприводу ці похибки зростають і змінюються від 33,7 % ($K_J = 4,0$) до 38,4 % ($K_J = 1,0$) при розрахунку часу пуску і від 38,1 % ($K_J = 4,0$) до 42,5 % ($K_J = 1,0$) при розрахунку втрат енергії в АД за час пуску.

Зменшення похибки розрахунку пускового режиму АД за його статичною механічною характеристикою можна добитися зменшенням середнього значення (за час пуску) електромагнітного моменту, що розраховується у функції ковзання, до рівня середнього значення електромагнітного моменту двигуна, який визнача-

ється розв'язанням системи рівнянь (2). Тобто поточне в часі значення електромагнітного моменту АД у функції ковзання необхідно помножити на величину коефіцієнта K_M при даному характері моменту опору навантаження і величині сумарного моменту інерції. Розрахункова величина динамічного моменту буде дорівнювати

$$M_{дин} = K_M M(s) - M_c(s). \quad (3)$$

У табл. 3 в знаменнику дробу параметрів приведені результати розрахунку пуску електроприводу, коли динамічний момент двигуна визначається по його статичній механічній характеристиці відповідно до співвідношення (3).

Таблиця 3. Пуск електроприводу з корекцією величини динамічного моменту

$M_c = M_n = const$					
K_J , в.о.	$t_{п}$, с	$W_{п}$, кДж	K_M	$\Delta t_{п}$, в.о.	$\Delta W_{п}$, в.о.
1,0	0,862	42,73	0,875	-0,006	0,033
	0,867	41,33			
2,0	1,646	81,63	0,884	-0,007	0,035
	1,657	78,74			
3,0	2,427	120,3	0,889	~ 0	0,043
	2,426	115,1			
4,0	3,203	158,8	0,892	0,005	0,044
	3,188	151,1			
$M_c / M_n = (\omega / \omega_n)^2$					
K_J , в.о.	$t_{п}$, с	$W_{п}$, кДж	K_M	$\Delta t_{п}$, в.о.	$\Delta W_{п}$, в.о.
1,0	0,279	11,94	0,843	0,007	0,063
	0,277	11,19			
2,0	0,537	23,07	0,866	0,004	0,06
	0,535	21,68			
3,0	0,791	34,07	0,877	0,001	0,06
	0,79	33,02			
4,0	1,045	44,99	0,883	0,001	0,059
	1,044	42,34			

Для порівняльної оцінки отриманих результатів в табл. 3 наведені показники пуску АД, узяті з табл. 1 і 2, розраховані по математичній моделі (2), що враховує електромагнітні перехідні процеси в двигуні. Величини цих показників, як і в табл. 1 і 2, приведені в чисельнику дробу значень.

Як впливає з даних табл. 3 при розрахунку динамічного моменту по співвідношенню (3) як при постійному (номінальному), так і вентиляторному характері моменту навантаження відносні величини похибок в розрахунку часу пуску менше 1%, а втрат енергії в двигуні за час пуску – від 3,3 % до 6,3 %. Такий високий ступінь збіжності результатів розрахунку по методиках, що визначають динамічний момент як результат розв'язання системи рівнянь (2), так і по модифікованій статичній механічній характеристиці АД $M(s)=K_M M(s)$, дозволяє зробити висновок про можливість розрахунку достовірних часових і енергетичних показників пуску двигуна аналітичними, графоаналітичними і графічними методами без застосування чисельних способів рішення системи диференційних рівнянь (2).

Слід зазначити, що при розрахунку часових і енергетичних показників пуску АД, приведених табл. 3, для кожного значення результуючого моменту інерції і відповідному характері моменту навантаження використовувалися індивідуальні значення коефіцієнта K_M .

Значення цього коефіцієнта при постійному (номінальному) моменті навантаження залежно від величини сумарного моменту інерції привода змінювалися від 0,875 ($K_J = 1,0$) до 0,892 ($K_J = 4,0$), а при вентиляторному характері моменту навантаження, – від 0,843 ($K_J = 1,0$) до 0,883 ($K_J = 4,0$).

Враховуючи, що значення коефіцієнта K_M при постійному і вентиляторному

моментах навантаження двигуна і зміні моменту інерції на його валу від $J_{дв}$ до $4J_{дв}$ відрізняються мало, корегувати розрахунок перехідного процесу пуску АД по його статичній характеристиці можна з постійним (середнім) значенням коефіцієнта K_M для будь-якого характеру навантаження електроприводу.

Висновки

Застосування запропонованого підходу до розрахунку дозволяє досягти зменшення похибки розрахунку часових та енергетичних показників процесу пуску на базі статичної моделі зменшення середнього за час пуску моменту двигуна до рівня середнього моменту, що розраховується за динамічною характеристикою. При значеннях коефіцієнта приведення моменту двигуна для асинхронного електропривода с вентиляторним моментом навантаження від 0,843 ($K_J = 1,0$) до 0,883 ($K_J = 4,0$) та при постійному (номінальному) моменті навантаження від 0,875 ($K_J = 1,0$) до 0,892 ($K_J = 4,0$) розрахунках часу пуску не перевищують 1 %, а енергоспоживання – від 3,3% до 6,3%.

Список літератури

1. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин: [Учеб. для вузов] / Копылов И.П. – М.: Высш. шк., 2001. – 327 с.
2. Ключев В.И. Теория электропривода: [Учебник для вузов] / Ключев В.И. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.
3. Математична модель для дослідження режимів асинхронних машин електромеханотронних систем / О.М. Попович // Праці Інституту електродинаміки НАН України. Зб. наук. праць. – 2010. – Вип. 25.– С. 89–97.
4. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин, Е.А. Соболенская. – М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с.