

В.Й. Лобов, К.В. Лобова

## ВПЛИВ ТИРИСТОРНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА НА ПУЛЬСАЦІЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО МОМЕНТУ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ПРИ ПАРАМЕТРИЧНОМУ УПРАВЛІННІ

*Представлені розрахунки та фізичне моделювання коливальних складових електромагнітного моменту при зміні параметрів асинхронного електродвигуна, елементів силових схем перетворювачів, побудованих на резисторно-тиристорних модулях. Установлено, що величина пульсацій електромагнітного моменту у квазісталих режимах залежить від вибраної силової схеми статорного і роторного комутаторів перетворювача, складу елементів, що входять до них, і схеми їх з'єднання, зміни величини кутів відкриття вентилями, способи їх управління, частота обертання ротора, параметри механізму – моменти статичний та інерції. Запропоновано використовувати для дослідження узагальнену схему параметричного управління асинхронного електродвигуна. Бібл. 11, табл. 1, рис. 4.*

*Ключові слова:* асинхронний електродвигун, узагальнена схема, тиристорний перетворювач, пульсації.

*Представлены расчеты и физическое моделирование колебательных составляющих электромагнитного момента при изменении параметров асинхронного электродвигателя, элементов силовых схем преобразователей, построенных на резисторно-тиристорных модулях. Установлено, что величина пульсаций электромагнитного момента в квазистационарных режимах зависит от выбранной силовой схемы статорной и роторной коммутаторов преобразователя, состава элементов, входящих в них, и схемы их соединения, изменения величины углов открытия вентилями, способы их управления, частота вращения ротора, параметры механизма - моменты статический и инерции. Предложено использовать для исследования обобщенную схему параметрического управления асинхронного электродвигателя. Библ. 11, табл. 1, рис. 4.*

*Ключевые слова:* асинхронный электродвигатель, обобщенная схема, тиристорный преобразователь, пульсации.

**Постановка проблеми.** Силкові схеми перетворювачів для управління асинхронних електродвигунів (АД) будуються з використанням різних елементів – резисторів, індуктивностей, діодів, тиристорів, тощо. Перетворювачі, що використовують ці елементи, включаються в статорні, роторні або одночасно в статорні та роторні кола АД і відносять до перетворювачів із параметричним управлінням [1, 2]. У залежності від силової схеми перетворювача змінюються відповідно статичні та динамічні характеристики АД. Схеми перетворювачів по різному визначають пускові, гальмові, реверсивні, енергетичні характеристики АД. При навантаженні АД, що управляється такими перетворювачами, з'являються динамічні зусилля в елементах кінематичного ланцюга, які можуть виявлятися в перехідних і сталих режимах роботи через колювання електромагнітного моменту (ЕМ) АД.

Відомо, що ЕМ містить середню і коливальну складові, але як остання змінюється, з якою частотою, чи залежить від вибраної силової схеми перетворювача та місця включення його елементів у схемі, не досліджено. Пульсації ЕМ, викликані впливом вищих гармонік напруги на АД, призводять до погіршення вібраційних і акустичних характеристик АД і механізму, тобто збільшується шум і вібрація. Це явище супроводжується резонансними явищами і погіршенням міцності механічного обладнання електроприводу і механізму. При збільшенні моменту інерції, кількість пульсацій ЕМ зростає. Особливо великих значень максимальні кидки моментів досягають при реверсі АД. Проте, до теперішнього часу для деяких типів перетворювачів відсутні дослідження і не визначено, як величина колювань ЕМ залежить від параметрів АД і електроприводу, вибраних схем перетворювачів, величини кутів відкриття тиристорів, способу управління

вентилями, частоти обертання ротора, тощо. Тому ці явища потребують досконального дослідження.

Для комплексного підходу і систематизованого аналізу, знаходження або отримання раціональних варіантів силових схем перетворювачів із параметричним управлінням АД найбільш зручно скористуватися узагальненою (спільною) силовою схемою та її математичним описом, який дозволяє створити загальний алгоритм управління та ефективно використовувати при проведенні досліджень ЕОМ (рис.1,а).

Послідовне включення силового тиристора з активним резистором, паралельно яким підключено другий додатковий резистор, утворює модуль, який є не тільки окремим функціональним модулем, а й може бути конструктивно виготовленим блоком, названий як: резисторно-тиристорним модулем (РТМ). Як видно з рис.1,а, узагальнена силова схема перетворювача управління АД складається з статорного (СК) і роторного (РК) комутаторів.

Розглянемо можливості запропонованої узагальненої схеми перетворювача із РТМ у колах статора, позначених у РТМ1 – РТМ6, як:  $R_{si}$  і  $r_{si}$  та в колах ротора РТМ7 – РТМ12, як:  $R_{ri}$  і  $r_{ri}$ , за умови, що:

$$R_{si} = R_s; R_{ri} = R_r; r_{si} = r_s; r_{ri} = r_r,$$

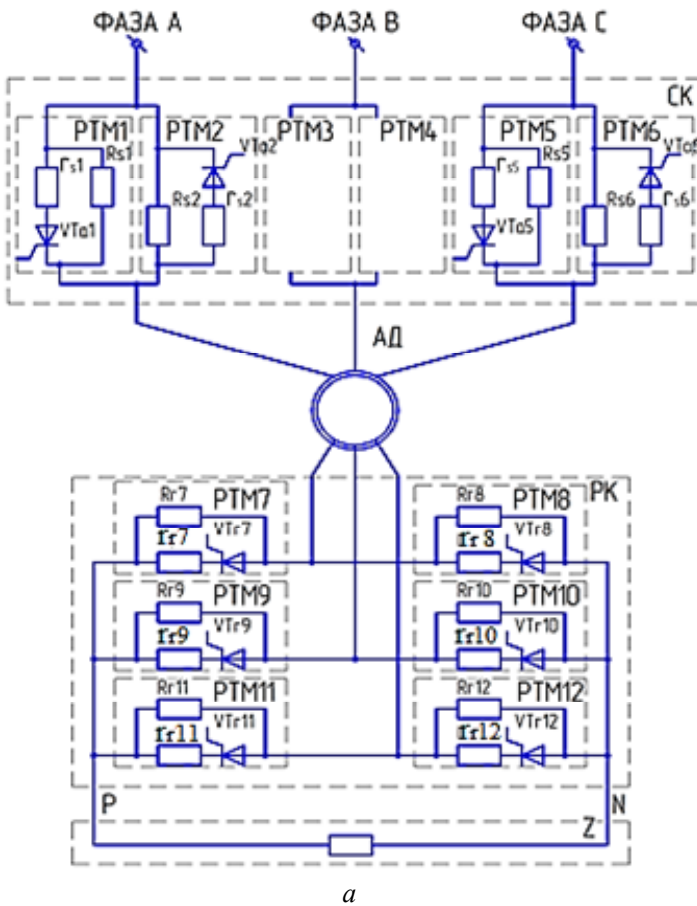
де  $i = 1, 2, \dots$  для граничних  $(0, \infty)$  і проміжних значень величин  $R_s, r_s, R_r$  і  $r_r$  і трьох пристроїв  $Z_0, Z_s, Z_i$ , модуля зв'язку виду  $Z$ .

У відповідності з прийнятими обмеженнями у таблицях (рис. 1,б,в) наведені можливі варіанти силових схем відповідно для СК і РК, які позначені через:  $S_{ij}$  та  $Z_{kij}$ . Індекси  $ij$  вказують у таблицях порядковий номер відповідного рядка та стовпця, а індекс  $k$  приймає значення  $0, s, i$ , тобто позначає вид модуля зв'язку  $Z$  і утворює ланку постійного струму. У модулі  $Z$  окремо використовуються три різні пристрої:  $Z_0, Z_s, Z_i$ , що утворюють відповідні групи РК.

© В.Й. Лобов, К.В. Лобова

У першу групу  $Z_0$  входять пристрої, які контур постійного струму закорочують, у другу групу  $Z_s$  – дозволяють дискретно змінювати величину параметрів елементів  $Z$  і третю групу  $Z_i$  – здійснюють

імпульсне регулювання цих параметрів. Проте в модулі зв'язку виду  $Z$  змінюється за певним законом величина опору активного резистору, включеного між точками  $P$  і  $N$ .



$r_{si}$	$R_{si}$		
	0	const	$\infty$
0	$S_{11}$	$S_{12}$	$S_{13}$
const	$S_{21}$	$S_{22}$	$S_{23}$
$\infty$	$S_{31}$	$S_{32}$	$S_{33}$

$\delta$

$Z_k$		$R_{ri}$		
		0	const	$\infty$
$Z_0$	const	$Z_0R_{11}$	$Z_0R_{12}$	$Z_0R_{13}$
	$\infty$	$Z_0R_{21}$	$Z_0R_{22}$	$Z_0R_{23}$
	0	$Z_0R_{31}$	$Z_0R_{32}$	$Z_0R_{33}$
$Z_s$	const	$Z_sR_{11}$	$Z_sR_{12}$	$Z_sR_{13}$
	$\infty$	$Z_sR_{21}$	$Z_sR_{22}$	$Z_sR_{23}$
	0	$Z_sR_{31}$	$Z_sR_{32}$	$Z_sR_{33}$
$Z_i$	const	$Z_iR_{11}$	$Z_iR_{12}$	$Z_iR_{13}$
	$\infty$	$Z_iR_{21}$	$Z_iR_{22}$	$Z_iR_{23}$
	0	$Z_iR_{31}$	$Z_iR_{32}$	$Z_iR_{33}$

$\epsilon$

Рис. 1. Узагальнена силова схема параметричного управління АД із СК і РК у складі перетворювача (а), та варіанти силових схем: СК ( $\delta$ ) і РК ( $\epsilon$ )

Незважаючи на введення обмежень, варіант запропонованої узагальненої схеми перетворювача охоплює багато відомих схем параметричного управління АД, про що ілюструють наступні приклади. Схема роздільного параметричного управління за допомогою тиристорів у статорі типу  $S_{13}$ , відома як неперевисний тиристорний регулятор напруги (ТРН). У схемі  $S_{13}$  прийнято  $R_{si} = \infty$  і  $r_i = 0$ , тобто у кожен фазу статора АД включені два тиристири, які з'єднані між собою за зустрічно-паралельною схемою. Якщо в СК прийняти  $R_{si} = \text{const}$  і  $r_i = 0$ , то в кожній фазі АД залишиться тільки резистор  $R_{si}$ . Інша схема типу  $S_{12}$  надає для випадку коли  $R_{si} = \text{const}$  і  $r_i = 0$ . Статорні обмотки АД у схемі типу  $S_{12}$  підключені до живильної мережі через ПТМ. У схемі типу  $S_{12}$  ПТМ містить один резистор  $R_{si}$ , паралельно якому підключений тиристор  $VT_i$ . Причому, в кожен фазу статора АД включено по два ПТМ, сполучених між собою зустрічно-паралельно.

Звертаємо увагу на те, що перетворювачі, які мають у своєму складі вентиляльні елементи із неповною керованістю (тиристири або симистори), що

включаються в кола змінного струму, працюють у режимі природної комутації. Цей тип перетворювачів реалізує фазне управління у статорних або роторних колах АД.

На рис. 1,  $\delta$  представлені двадцять сім варіантів різних силових схем управління колами ротора АД. Варіанти силових схем управління колами ротора АД  $Z_0R_{11}$ ,  $Z_0R_{21}$ ,  $Z_0R_{31}$ ,  $Z_sR_{11}$ ,  $Z_sR_{21}$ ,  $Z_sR_{31}$ ,  $Z_iR_{11}$ ,  $Z_iR_{21}$ ,  $Z_iR_{31}$  при  $R_{ri} = 0$  забезпечують лише замикання обмоток ротора у загальну точку з'єднання, перетворюючи таким чином звичайний ротор у короткозамкнений. Згідно із узагальненою схемою параметричного управління АД при  $R_{ri} = \text{const}$  і  $r_{ri} = \text{const}$  у кожній фазі ротора АД паралельно опору  $R_{ri}$  включається коло із послідовно з'єднаних між собою резисторів опору  $r_{ri}$  і тиристорів  $VT_i$ , а при  $R_{ri} = \infty$  і  $r_{ri} = \text{const}$  – залишається лише послідовно поєднане коло із цих елементів. Усе це призводить до різноманітних силових схем. Так, при  $R_{ri} = \text{const}$  утворюються різновиди схем типів:  $Z_kR_{12}$ ,  $Z_kR_{22}$  і  $Z_kR_{32}$ , а при  $R_{ri} = Z_kR_{13}$ ,  $Z_kR_{23}$ ,  $Z_kR_{33}$ , а також ряд інших схем, наведених на рис. 1,  $\epsilon$ . Схема типу  $Z_kR_{13}$  при  $r_{ri} = 0$  відома під назвою мосто-

вої схеми Ларіонова, у колі постійного струму якої включений модуль зв'язку виду  $Z_k$ . Дві інші схеми типу  $Z_k R_{22}$  (при  $R_{ri} = \text{const}$  і  $r_{ri} = \text{const}$  і  $Z_k = \infty$ ) та  $Z_k R_{23}$  (при  $R_{ri} = \infty$  і  $r_{ri} = \text{const}$  і  $Z_k = \infty$ ) не мають розімкнутого ланцюга постійного струму, і тому можуть бути використані самостійно.

Застосовуючи модуль зв'язку виду  $Z$ , відповідний  $Z_0$  схема типу  $Z_k R_{22}$  перетвориться в схему типу  $Z_0 R_{32}$ , а схема типу  $Z_k R_{23}$  відповідно у схему типу  $Z_0 R_{33}$ . Крім того, зі схеми типу  $Z_0 R_{32}$  при  $R_{ri} = \infty$  і  $r_{ri} = \text{const}$  з'являється вже нова схема типу  $Z_0 r_{13}$ , а при  $R_{ri} = \text{const}$  і  $r_{ri} = \infty$  досить широко застосовується у промислових умовах схема типу  $Z_0 r_{22}$ , що містить у ланцюзі ротора тільки додаткові резистори. При  $R_{ri} = \text{const}$  і  $r_{ri} = 0$  виходить схема типу  $Z_0 R_{32}$  і при  $R_{ri} = \text{const}$ ,  $r_{ri} = 0$  – типу  $Z_0 r_{33}$ . Аналогічним чином із схеми типу  $Z_0 R_{33}$  при  $r_{ri} = 0$  утворюється інша схема – типу  $Z_0 r_{33}$ , в якій обмотки ротора з'єднані у схему «зірки» і послідовно підключені до тиристорів та резисторів, що замкнуті між собою у нульову точку. Силова структура РК значно зміниться для схеми типу  $Z_0 R_{32}$ , якщо в ланцюзі постійного струму будуть присутні пристрої типу  $Z_s$  або  $Z_i$ .

Із схеми типу  $Z_{s(i)} R_{32}$  отримується роторний комутатор, у якому тиристири з'єднані у схему трикутника. У цьому разі влаштування  $Z_s$  або  $Z_i$  є тільки один тиристор, включений у ланцюг постійного струму. Якщо прийняти, що в узагальненій схемі типу  $Z_{s(i)} R_{32}$  резистори:  $R_{r1} = R_{r2} = R_{r3} = R_{r4} = R_{r5} = R_{r6} = \infty$ ,  $r_{r2} = r_{r3} = r_{r5} = r_{r6} = \infty = \text{const}$ ,  $r_{r1} = r_{r4} = 0$ , то виявиться, що трикутний комутатор включений у нульову точку з'єднання ротора АД, і виходить силова схема типу  $Z_1 R_{32}$ , у ланцюзі ротора відсутні резистори опору. Якщо прийняти у схемі типу  $Z_{s(i)} R_{32}$ , що  $R_{r1} = R_{r4} = R_{r5} = R_{r6} = \infty = \text{const}$ , а  $r_{r1} = r_{r4} = 0$ ,  $r_{r2} = r_{r3} = r_{r5} = r_{r6} = \infty = \text{const}$ , то комутатор буде включений за схемою  $Z_2 R_{32}$ .

Таким чином, використання узагальненої схеми перетворювача для параметричного управління АД дозволить використати для дослідження різних силових схем перетворювачів, які отримуються від узагальненої і вирішити актуальну проблему визначення величини пульсацій, перенапружень, амплітуд і частот коливальних складових ЕМ простими інженерними методами.

**Аналіз попередніх досліджень і публікацій.** Дослідженню управління АД у різних режимах роботи присвячена велика кількість публікацій. Ці питання є одними з основних, що сьогодні обговорюються фахівцями. Автори не надають достатньої інформації для побудови автоматизованих систем параметричного управління АД з урахуванням зміни електромагнітних моментів, які суттєво змінюються на перехідні процеси при пусках, гальмуванні, реверсу та роботі. Основною проблемою АД, яку вирішують дослідники, це узгодження крутного моменту з моментом навантаження, так як під час пуску, наприклад, крутний момент за частки секунди часто досягає 150-200 %, що може привести до виходу з ладу кінематичного ланцюга приводу [3]. У той же самий час високий пусковий струм при старті може бути в 6-8 разів більше номінального, породжуючи проблеми зі стабільністю живлення та коливаннями ЕМ, величини яких

у представленій інформації не визначені та й не представлені. Для усунення деяких цих недоліків промисловістю випускаються контролери ЕнерджіСейвер (пристрої плавного пуску з функцією енергозбереження і корекції коефіцієнта потужності) займають проміжне положення між пристроями плавного пуску і перетворювачами частоти. ЕнерджіСейвер використовує традиційну для пристроїв плавного пуску схему зустрічно-паралельно включених тиристорів [4], тобто ТРН, які по закінченню процесу пуску замикаються контакторами. Момент, створений АД, залежить від величин прикладеної напруги і ковзання. Чим менший момент навантаження прикладений до ротора, тим більше ротор «доганяє» поле статора (ковзання зменшується), тим далі АД переходить у менш економічний режим. Якщо відповідним чином знизити напругу живлення на обмотках статора АД, ковзання повернеться до номінального значення. Механічні характеристики АД при зниженні напруги на обмотках статора мають відповідні знижені ЕМ. При цьому знизиться струм, що протікає через обмотки АД, і споживана потужність, пропорційна добутку напруги і струму, втрати зменшуються, ККД електродвигуна зростає [5]. Проте, якісний та кількісний аналіз зміни амплітуд і частоти коливальних складових ЕМ у цій роботі відсутній.

Аналіз динамічних процесів перетворення енергії в АД являє собою складну задачу в зв'язку з істотною нелінійністю рівнянь, що описують АД, обумовленої добутком змінних. Тому дослідження динамічних характеристик АД доцільно вести з застосуванням засобів обчислювальної техніки [6]. Спільне рішення системи диференціальних рівнянь у програмному середовищі MathCAD дозволяє розрахувати графіки перехідних процесів швидкості  $\omega$  і ЕМ  $M$  при чисельних значеннях параметрів схеми заміщення АД. Як показав аналіз динамічної механічної характеристики АД в [6], максимальні ударні моменти при прямому пуску перевищують номінальний момент  $M_n$  статичної механічної характеристики більш ніж в 4.5 рази і можуть досягти неприпустимо великих по механічній міцності значень. Ударні моменти при пуску, і особливо при реверсі АД, призводять до виходу з ладу кінематики виробничих механізмів і самого АД. У той же час, коливання моментів АД при управлінні від перетворювачів не визначено.

До числа актуальних завдань в області управління АД відноситься розробка досить простих і ефективних перетворювачів для розширення діапазону регулювання швидкості обертання АД вниз від номінального значення. Можливість переведення електроприводу на знижені частоти обертання дозволяє реалізувати економічні режими експлуатації при зниженні технологічних навантажень і розширює його регульовальні властивості. Потреба в такому регулюванні неминуче з'являється в умовах діючого виробництва. Традиційні системи регульованого АД з короткозамкненим двигуном «тиристорний перетворювач напруги - асинхронний двигун» (ТПН-АД) орієнтовані для плавного пуску і для створення гальмівних режимів [7]. Схема передбачає регулювання напруги за рахунок формування заданих кутів управління тиристорами.

Основою такого перетворювача є фазове або імпульсне управління. Це дозволяє використовувати відносно недорогі одноопераційні тиристори, які мають досить високі енергетичні показники [8]. При управлінні такими перетворювачами виникає необхідність підвищення рівномірності обертання ротора за рахунок зменшення амплітуди і/або управління частотою пульсацій ЕМ, спотворених роботою силових елементів перетворювача [9].

Дослідження пульсацій ЕМ у перетворювачах частоти з ШІМ інвертора при постійній і змінній частоті розглядається в роботі [10]. Результати досліджень в цій роботі вказують на існування цієї проблеми при управлінні АД, але методика розрахунку не може бути перенесена на розрахунок коливань моменту для перетворювачів із параметричним управлінням. Основою перетворювачів із фазовим або імпульсним управлінням є інша силова схема, що складається з РТМ [11]. Разом з очевидними перевагами використання простих перетворювачів побудованих на основі РТМ, як показує аналіз науково-технічної літератури, питання визначення рівнів пульсацій ЕМ АД фахівцями досконально не розглядалось.

Методи аналітичних розрахунків здійснені для перетворювачів частоти, асинхронно-вентильних каскадів або вентильних двигунів можуть бути частково використані для розрахунку пульсацій ЕМ при управлінні такими типами перетворювачів. Основні відмінності тут викликані, як особливістю регулювання величини струму через керовані вентилі, так і можливими схемами з'єднання резисторів, тиристорів, статорних і роторних обмоток АД. Окрім цього відомо, що у АД змінюються в процесі регулювання величини, такі як кут відкривання тиристорів, напруга статора, ЕРС ротора, струми статора та ротора, ЕМ, його ковзання й інші та вони пов'язані між собою відповідними функціональними залежностями [10]. Зміна коливань ЕМ  $\Delta M$  залежить від вибраних силових схем, що включені в статор і ротор, величини кутів відкриття тиристорів, способу управління вентилями, частоти обертання ротора, параметрів електродвигуна і електроприводу [5, 6, 9].

При проектуванні сучасних електроприводів часто виникає необхідність визначення динамічних зусиль в елементах кінематичного ланцюга, які можуть виявлятися в перехідних і сталих режимах роботи через коливання ЕМ. У перехідних режимах роботи електроприводу відхилення форми кривої напруги на затисках АД від синусоїдальної викликає високочастотні коливання ЕМ і нерівномірність частоти обертання ротора.

Визначення коливальних складових ЕМ має велике практичне значення, оскільки вони істотно впливають не тільки на механічну міцність вузлів електроприводу і стан технологічного механізму. Якщо частоти власних коливань механічної частини електроприводу виявляються близькими до частот коливальних складових ЕМ, то може виникнути небезпека появи значних перенапружень в елементах електроприводу.

**Метою роботи** є виявлення впливу параметрів електродвигуна, елементів силових схем перетворювачів, побудованих на РТМ, статичного моменту і моменту інерції механізму на коливальні складові ЕМ АД.

**Методи дослідження.** Всебічний аналіз різноманітності силових схем перетворювачів і дослідження основних режимів АД пов'язаний з великим обсягом аналітичних обчислень і необхідністю проведення експериментальних досліджень. Тому методологічною основою вирішення поставлених завдань є комплексний підхід, що дозволяє найбільш зручно користуватися узагальненою схемою управління АД [11], її математичним описом, загальним алгоритмом управління і провести дослідження коливальних складових ЕМ шляхом математичного моделювання.

**Викладення матеріалу та результати.** Для оцінки значень коливань ЕМ використовується узагальнена схема управління АД. Схема має перетворювач, що складається з статорного і роторного комутаторів. Кожний комутатор реалізується з РТМ (рис. 1,а). Використовуючи ЕОМ виконані розрахунки різних режимів роботи АД. Встановлено, що пульсації в деяких випадках досягають значних величин, виконаних. Так, для АД типу МТФ 411-8, керованого за допомогою силових типів  $S_{13}Z_{0r_{11}}$ ,  $S_{13}Z_{0r_{22}}$ ,  $S_{13}Z_{0r_{32}}$ ,  $S_{13}Z_{2R_{32}}$ ,  $S_{22}Z_kR_{32}$ ,  $S_{11}Z_lR_{33}$  обчислені максимальні  $M_{\max}$ , мінімальні  $M_{\min}$  і середні  $M_m$  значення ЕМ. Використовуючи обчислені значення ЕМ, визначені коливання  $\Delta M$  при різних кутах відкриття  $\alpha_s$ ,  $\alpha_r$  тиристорів статора і роторного комутаторів і швидкостях обертання ротора  $\omega_r$ , відповідно рівних: мінус 600, 400, 200, плюс 200, 400 і 600 об/хв. Результати розрахунків зведені графіками, що представлені на рис. 2.

Величини опорів резисторів РТМ, що входять у досліджувані силові схеми, прийняті відповідно до табл. 1.

У схемах включення РТМ послідовно з обмотками АД викликає появу додаткових коливань складових ЕМ, частота і амплітуда яких визначаються специфікою роботи тиристорів у перетворювачі. При комутації вентилями резисторів у колах АД виникає квазісталий режим, що є послідовністю перехідних процесів. У такому режимі змінюється структура силових кіл АД. Інтервали існування структур для статорних і роторних кіл визначаються моментами подачі управляючих імпульсів і умовами природної комутації вентилів.

У результаті зміни структури силових кіл змінюється і еквівалентна величина опорів резисторів РТМ, зміна яких приводять до коливань струмів статора і ротора АД. Останні у свою чергу змінюють магнітний потік і ЕМ електродвигуна. Як показують розрахунки (рис. 2), найменші коливання ЕМ АД забезпечують силові схеми з роздільним управлінням у колі ротора (типу  $S_{11}Z_lR_{33}$ ) і сумісним управлінням у колах статора і ротора (типу  $S_{22}Z_kR_{32}$ ). Перша схема практично повністю усуває коливання ЕМ. У цій схемі підвищується  $M_m$  і підтримується приблизно на рівні номінального у всьому діапазоні вимірювання частоти обертання АД. Зменшення пульсації ЕМ тут досягається унаслідок підвищення коефіцієнта загасання струму роторного кола. Він збільшується за рахунок підвищення еквівалентного опору резисторів РТМ. Друга схема поступається першій по амплітуді пульсацій  $\Delta M$  електродвигуна.

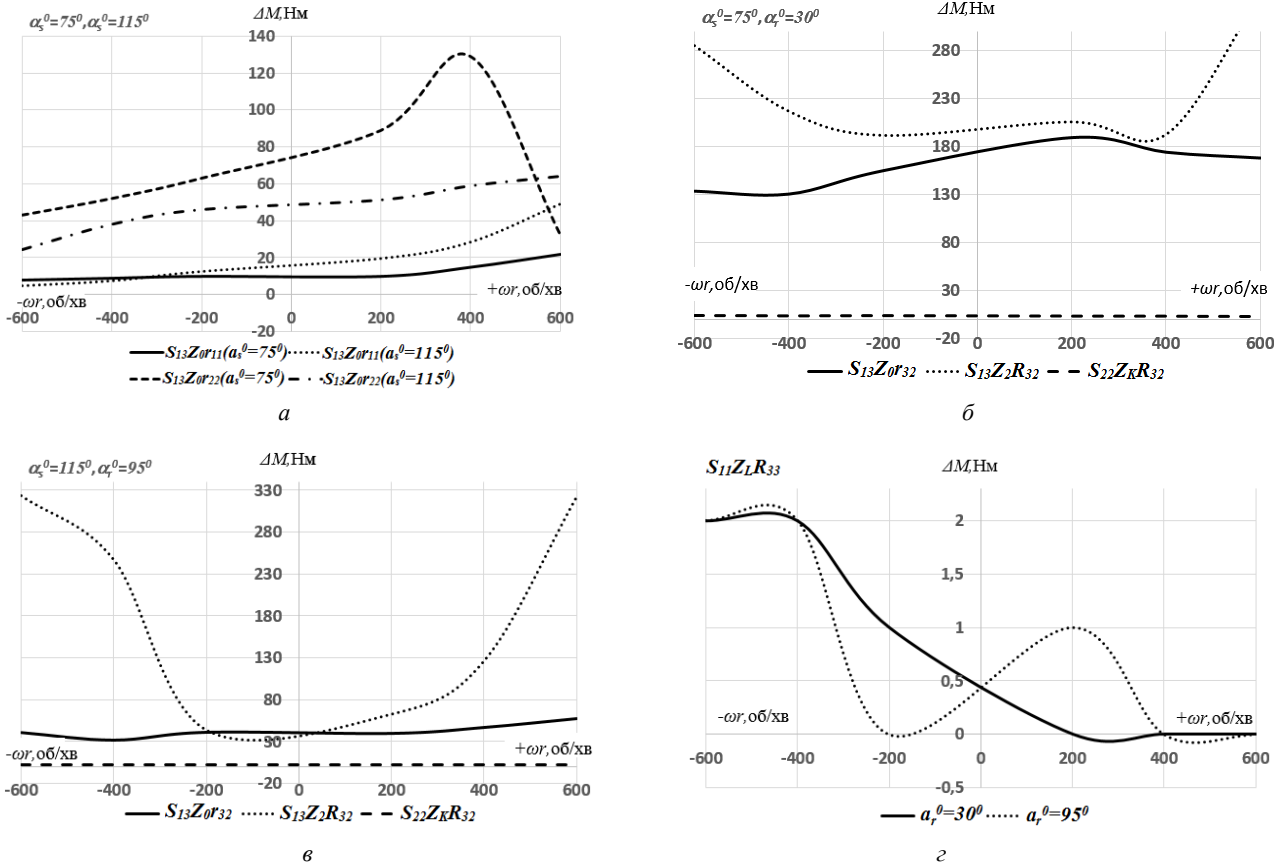


Рис. 2. Коливання електромагнітного моменту АД при швидкостях обертання ротора, кутах відкриття  $\alpha_s$ ,  $\alpha_r$  тиристорів СК і РК для різних силових схем

Таблиця 1  
Величини опорів резисторів РТМ для схем

Тип силової схеми	Величина опорів резисторів, Ом			
	$R_{si}$	$R_{ri}$	$r_{si}$	$r_{ri}$
$S_{13}Z_0r_{22}$	—	1.95	—	—
$S_{13}Z_0r_{32}$	—	2.8	—	—
$S_{13}Z_2R_{32}$	—	2.8	—	—
$S_{22}Z_kR_{32}$	0.32	4.4	0.1	0.48
$S_{11}Z_lR_{33}$	—	4.4	—	0.9

Збільшення кута відкриття  $\alpha_r$  для першої схеми приводить до підвищення максимального моменту в зоні низьких швидкостей і зменшення його при високих швидкостях АД. Це пояснюється тим, що змінюється гармонійний склад напруг АД. Включення РТМ тільки в дві фази ротора (схема типу  $S_{13}Z_2R_{32}$ ) приводить до значних коливань ЕМ АД. Велике значення  $\Delta M$  викликає вібрацію, сильний шум і удари, тому їх величина повинна бути зменшена до мінімуму. Величина цих коливань вище в порівнянні з іншими силовими схемами. Так, наприклад, для цієї схеми при швидкості  $n_r = 600$  об/хв і кутах  $\alpha_s = 75^\circ$  і  $\alpha_r = 30^\circ$   $\Delta M$  досягає значення, рівного 377 Нм, що в 1.5 рази вище за номінальний момент АД. При частоті обертання ротора АД, рівній 400 об/хв і кутах  $\alpha_s = 115^\circ$  і  $\alpha_r = 95^\circ$   $\Delta M$  досягає величини, рівної його номінальному моменту. При цьому коливання моменту  $\Delta M$  можуть досягати потрібної величини критичного моменту АД. При несиметричному включенні елементів перетворювача у колі ротора АД ЕМ так само, як і при

однофазному включенні, містить середню і коливальну складові.

Амплітуда коливальної складової ЕМ залежить від ступеня несиметрії у колі ротора, а її частота завжди рівна подвоєній частоті ковзання. Що ж до середніх моментів АД, то вони при фазовому управлінні вентилями у колі статора (схема типу  $S_{13}Z_0r_{32}$ ) збільшуються з підвищенням частоти обертання ротора і, навпаки, зменшуються за наявності у колі ротора додаткових резисторів (схема типу  $S_{13}Z_0r_{22}$ ) або РТМ (схеми типів  $S_{13}Z_0r_{32}$ ,  $S_{13}Z_2r_{32}$ ,  $S_{13}Z_kr_{32}$ ,  $S_{13}Z_lr_{32}$ ). Середній момент АД змінюється в незначних межах при регулюванні частоти обертання ротора в схемі з роздільним управлінням у колі ротора ( $S_{11}Z_lr_{33}$ ) і в схемі зі сумісним управлінням у колах статора і ротора ( $S_{22}Z_kr_{32}$ ). Для першої згаданої схеми величина середнього моменту найбільша у всьому діапазоні зміни швидкості АД.

Отже, вживання РТМ у колі АД дозволяє помітно знизити величину пульсацій ЕМ, підвищити значення максимального і середнього моментів і обмежити його величини ударних і знакозмінних моментів як при пуску, так і, як показали дослідження, при переході з однієї швидкості на іншу. Збільшення еквівалентної величини опорів резисторів РТМ у колі статора дещо покращує коефіцієнт потужності кола, завдяки цьому ударні знакозмінні моменти виявляються зменшеними не тільки через зниження напруги на статорі, але і через зменшення їх значення і збільшення загасання аперіодичних струмів.

Момент інерції електроприводу робить істотний вплив на тривалість і характер протікання перехідних процесів. На рис. 3 приведені одержані на ЕОМ і експериментальній установці осцилограми пуску електроприводу за наявності на валу АД різних по величині додаткових махових мас. Аналізуючи ці графіки, можна прийти до висновку, що із збільшенням моменту

інерції електроприводу кількість значних по величині кидків перехідного ЕМ спочатку процесу пуску збільшується, а коливання частоти обертання ротора і ЕМ у районі синхронної швидкості зменшується. Це викликано тим, що деякі коефіцієнти загасання вільних складових ЕМ при малій швидкості вельми малі.

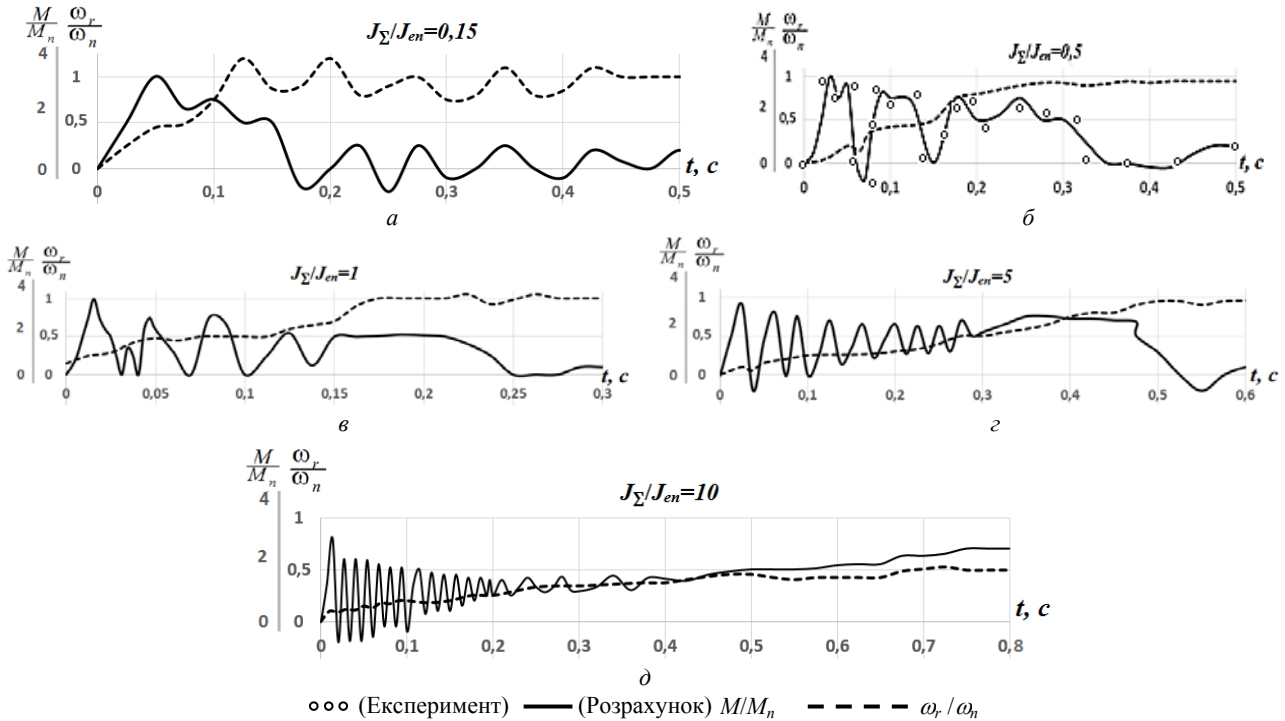


Рис. 3. Осцилограми пуску електроприводу з різними значеннями махових мас

Якщо збільшити момент інерції електроприводу, то АД довше працюватиме на знижених швидкостях, де малі коефіцієнти загасання статорного і роторного кіл, що і визначає більш повільне загасання ЕМ із збільшенням сумарного моменту інерції  $J_\Sigma$  електроприводу та механізму. При збільшенні  $J_\Sigma$  підвищується частота і збільшується амплітуда піків перехідного ЕМ. Спочатку процесу із зменшенням  $J_\Sigma$  кількість цих піків знижується. Проте, при цьому збільшуються коливання швидкості і ЕМ у зоні низьких ковзань АД.

Зіставлення великого числа розрахункових і експериментальних осцилограм для АД різної потужності з нормальним і підвищеним ковзанням указує на те, що отримані результати при зміні сумарного моменту інерції адекватні. Вплив сумарного моменту інерції на перехідний процес для інших силових схем управління АД майже такий же, як і для схеми типу  $S_{13}Z_{0r}r_{32}$ .

Збільшення статичного моменту на валу АД приводить також до більш тривалого протікання за часом процесу розгону (рис. 4).

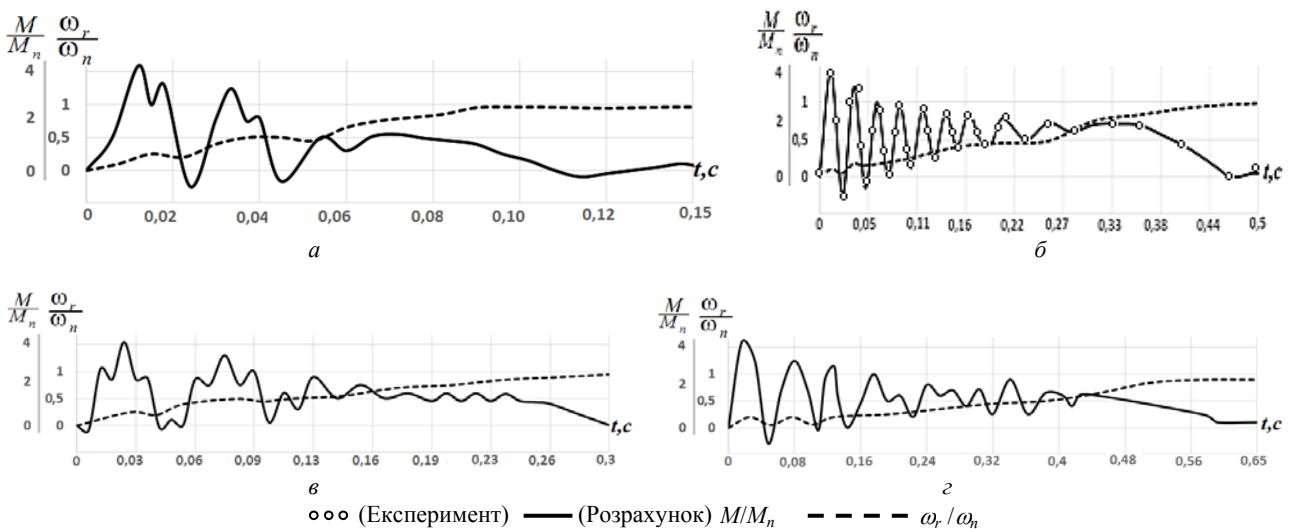


Рис. 4. Розрахункові та експериментальні осцилограми пуску АД при зміні статичного моменту для схеми  $S_{13}Z_{0r}r_{11}$ : а -  $M_s = 0$ , б -  $M_s = M_n$ ; та для схеми  $S_{13}Z_{0r}r_{32}$ : в -  $M_s = 0$ , г -  $M_s = M_n$

Частота пульсацій ЕМ спочатку процесу розгону підвищується. Із збільшенням швидкості ротора АД частота пульсацій значно знижується, і в районі синхронної швидкості коливання моменту зовсім пропадають. Картина перехідного процесу при зміні статичного моменту нагадує картину перехідного процесу при зміні моменту інерції. Осцилограми пуску АД при зміні статичного моменту на валу ротора, наведені на рис. 4 для двох силових типів  $S_{13}Z_{0r_{11}}$  і  $S_{13}Z_{0r_{32}}$  наочно підтверджують вищесказане. Для першої схеми кут відкриття  $\alpha_S$  тиристорів прийнятий рівним  $90^\circ$ , а для другої схеми кути  $\alpha_S$  і  $\alpha_r$  відповідно склали  $30^\circ$  і  $60^\circ$ . Результати моделювання на ЕОМ показують, що картина перехідного процесу для інших силових схем при зміні навантаження на валу АД аналогічна перехідному процесу, створюваному схемами типів  $S_{13}Z_{0r_{11}}$  і  $S_{13}Z_{0r_{32}}$ . Відмінність їх виявляється тільки в різних коливаннях ЕМ.

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** Таким чином, проведені дослідження дозволили виявити особливості впливу параметрів елементів різних типів силових схем перетворювачів, побудованих на РТМ, на амплітуду і частоту коливальних складових ЕМ АД.

Виконане математичне та фізичне моделювання дозволило встановити умови виникнення електромагнітних пульсацій, визначити шляхи їх усунення та підтвердило ефективність вибраного методу дослідження. При цьому встановлено, що величина пульсацій електромагнітного моменту АД у квазісталих режимах залежить від вибраної силової схеми перетворювача, статорного і роторного комутаторів, складу елементів, що входять до них, і схеми їх з'єднання в модулях.

Зіставлення розрахункових і експериментальних осцилограм пуску АД різної потужності з нормальним і підвищеним ковзанням указує на те, що вплив на пульсації ЕМ надають величини кутів відкриття вентиліями, способи їх управління, частоти обертання ротора, параметри електродвигуна і механізму – моменти статичний та інерції.

Одночасно виявлено, що вживання РТМ у складі силових схем статорного і роторного комутаторів перетворювача знижують величину пульсації ЕМ у АД та підвищують значення його максимального і середнього моментів і обмежують величину ударного і знакозмінних моментів, як при його пуску, так і переході з однієї швидкості на іншу.

У подальших дослідженнях планується зосередитись на перевірці розробленої методики в промислових умовах.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Маренич К.Н., Бурака А.Н. Обоснование принципа параметрического управления асинхронным двигателем нагрузочного стенда в генераторном режиме // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Гірничо-електромеханічна. – 2001. – №27. – С. 278-282.
2. Однолько Д.С. Математическое имитационное моделирование системы бездатчикового векторного управления

асинхронным двигателем в условиях параметрических возмущений // Системный анализ и прикладная информатика. – 2015. – №2. – С. 31-35.

3. Принцип действия устройств плавного пуска: оборудование для управления электроприводом. – Режим доступа: [https://www.softstarter.ru/plavnij-pusk/upp/princip\\_dejstviya/](https://www.softstarter.ru/plavnij-pusk/upp/princip_dejstviya/).

4. Контроллеры-оптимизаторы ЭнерджиСейвер: оборудование для управления электроприводом. – Режим доступа: <https://www.softstarter.ru/catalog/plavnij-pusk/energysaver/>.

5. Макаров А.М., Сергеев А.С., Крылов Е.Г., Сердобинцев Ю.П. Системы управления автоматизированным электроприводом переменного тока: учеб. пособие. Волгоград: ВолГТУ, 2016. – 192 с.

6. Дементьев Ю.Н., Чернышев А.Ю., Чернышев И.А. Электрический привод: учеб. пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – 232 с.

7. Анисимов В.А., Горнов А.О., Москаленко В.В. Тиристорные пусковые устройства в электроприводах переменного тока // Привод и управление. – 2002. – №1. – С. 32-34.

8. Черепанов В.П., Хрулев А.К. Тиристоры и их зарубежные аналоги: справочник. – М: ИП РадиоСофт, 2002. – 512 с.

9. Красовский А.Б. Основы электропривода: учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. – 405 с.

10. Чернышев А.Ю., Дементьев Ю.Н., Чернышев И.А. Электропривод переменного тока: учеб. пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 213 с.

11. Lobov V.Y. Method for research of parametric control schemes by asynchronous motor // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – no.6. – pp. 102-108.

#### REFERENCES

1. Marenich K.N., Burlaka A.N. Substantiation of the principle of parametric control of an asynchronous motor of a load stand in the generator mode. *Scientific papers of Donetsk National Technical University. Series: Mining and electromechanical*, 2001, no.27, pp. 278-282. (Rus).
2. Odolko D.S. Mathematical simulation of sensorless vector control induction motor under parametric perturbations. *System analysis and applied information science*, 2015, no.2, pp. 31-35. (Rus).
3. Principle of operation of soft starters: equipment for electric drive control. Available at: [https://www.softstarter.ru/plavnij-pusk/upp/princip\\_dejstviya/](https://www.softstarter.ru/plavnij-pusk/upp/princip_dejstviya/) (accessed 15 October 2015).
4. Controllers-optimizers EnergySaver: equipment for electric drive control. – Available at: <https://www.softstarter.ru/catalog/plavnij-pusk/energysaver/>. (accessed 22 May 2016).
5. Makarov A.M., Sergeyev A.S., Krylov Ye.G., Serdobintsev Yu.P. *Sistemy upravleniia avtomatizirovannym elektroprivodom peremennogo toka: ucheb. posobie* [Control systems automated AC drive. Tutorial]. Volgograd, VolGUTU Publ., 2016. 192 p. (Rus).
6. Demytyev Yu.N., Chernyshev A.Yu., Chernyshev I.A. *Elektricheskii privod: ucheb. posobie* [Electric drive. Tutorial]. Tomsk, TPU Publ., 2010. 232 p. (Rus).
7. Anisimov V.A., Gornov A.O., Moskalenko V.V. Thyristor starting devices in AC drives. *Drive and control*, 2002, no.1, pp. 32-34. (Rus).
8. Cherepanov V.P., Khrulev A.K. *Tiristory i ikh zarubezhnyye analogi: spravochnik* [Thyristors and their foreign counterparts. Directory]. Moscow, IP RadioSoft Publ., 2002. 512 p. (Rus).
9. Krasovskiy A.B. *Osnovy elektroprivoda: ucheb. posobie* [Bases of the electric drive. Tutorial]. Moscow, Publishing House MSTU N.E. Bauman, 2015. 405 p. (Rus).

10. Chernyshev A.Yu., Dementyev Yu.N., Chernyshev I.A. *Elektroprivod peremennogo toka: ucheb. posobie* [AC electric drive. Tutorial]. Tomsk, Publishing house of Tomsk Polytechnic University, 2011. 213 p. (Rus).

11. Lobov V.Y. Method for research of parametric control schemes by asynchronous motor. *Metallurgical and Mining Industry*, 2015, no.6, pp. 102-108.

Надійшла (received) 10.02.2017

Лобов В'ячеслав Йосипович<sup>1</sup>, к.т.н., доц.,

Лобова Карина Віталіївна<sup>1</sup>,

<sup>1</sup> Криворізький національний університет,  
50027, Кривий Ріг, вул. Віталія Матусевича, 11,  
тел/phone +38 0564 4090635,  
e-mail: lobovvjcheshlav@gmail.com

V.I. Lobov<sup>1</sup>, K.V. Lobova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Kryvyi Rih National University,  
11, V. Matusyevycha Str., Kryvyi Rih, 50027, Ukraine.

#### **The thyristor converter influence on the pulsations of the electromagnetic torque of the induction motor at parametrical control.**

**Purpose.** The purpose of the work is to identify the parameters influence of the electric motor, the power circuits elements of the converters, built on resistor-thyristor modules, the static torque and the moment of inertia of the mechanism on the vibrational components of the induction motor's electromagnetic moment. **Methodology.** The methodological basis for the solution of the task is an integrated approach. The application of the generalized control circuit for an induction electric motor and its mathematical description made it possible to analyze various power circuits of parametric control of an induction electric motor. To create a common control algorithm, effectively use the computer for calculations. To perform qualitative and quantitative analysis of the amplitudes and frequencies of the vibrational components of the electromagnetic torque of the electric motor. **Results.** The conducted researches allowed to reveal the

peculiarities of the effect of the parameters of the elements of various types of power circuits of the parametric control converters on the vibrational components of the electromagnetic torque of an induction electric motor. Calculations and physical modeling have been performed, it has been possible to establish the conditions for the occurrence of electromagnetic pulsations and to determine the ways of their elimination. It was found that the magnitude of pulsations of the electromagnetic moment of an induction electric motor in quasi-permanent modes depends on the selected power circuit of the converter's stator and rotor commutators, the composition of the elements included in them, and the connection circuits. Comparison of calculated and experimental waveform when starting induction electric motors indicates that the pulsation of the electromagnetic torque is affected by: the size of the opening angle of the valves, their control methods, the rotor speed, the parameters of the electric motor and the mechanism are static and inertial moments. At the same time, it was revealed that the use of resistor-thyristor modules in the power circuits of the stator and rotary commutators reduces the magnitude of the pulsation of the electromagnetic torque of the induction electric motor. Increase the value of its maximum and average torques. Limit the magnitude of the shock and alternating torques when it starts and the transition from one speed to another. **Scientific novelty.** It is proposed to use a generalized circuit of parametric control of an induction electric motor for studying the change in the electromagnetic torque. The circuit consists of resistor – thyristor modules in stator and rotary commutators. The presented technique allowed simultaneously to investigate transients during the control of an induction electric motor by various power circuits of converters. The results of calculations allow choosing the necessary power circuit, taking into account the vibrational components of the electromagnetic torque of the induction motor. References 11, tables 1, figures 4.

**Key words:** induction electric motor, generalized circuit, thyristor converter, pulsations.