

**НАПРЯМКИ МОДЕРНІЗАЦІЇ СИСТЕМ ДВОДВИГУНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ЗМІННОГО СТРУМУ****О. А. Хребтова, Н. В. Зачепа, А. В. Некрасов, А. О. Оніщенко**

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

**ORCID: 0000-0002-4369-0262; 0000-0003-0365-5320; 0000-0001-7304-2082; 0000-0002-3793-331X**

Розглянуто особливості роботи системи дводвигунного електропривода які встановлюються на технологічних механізмах у деяких випадках з міркувань конструктивного характеру або з метою зменшення моменту інерції електропривода або для тих механізмів, де потрібен механічний зв'язок між окремими ланками робочої машини розташованими на порівняно великій відстані, при цьому технологічний механізм має дуже складну трансмісію й громіздку конструкцію. Для електропривода механізму підіймання, що наведений як приклад стандартної системи дводвигунного привода змінного струму з реостатним пуком, розрахована потужність основних електроприводів. З урахуванням особливостей роботи технологічних механізмів де застосовується наведена схема електропривода розрахунок потужності електричних машин виконується для режимів пуску та роботи у важких умовах. Для аналізу напрямку модернізації системи електропривода що розглядатися були представлені сучасні систем приводів на базі частотно-регульованого асинхронного електропривода. За результатами аналізу встановлено що для встановлених умов роботи самою перспективною є система частотно-регульованого дводвигунного електропривода з автономним живленням. Застосування цієї системи електропривода дозволить не тільки виконати модернізацію морально застарілого обладнання зі збереженням існуючих основних електричних машин, відмовитися від додаткових машин, що підвищить коефіцієнт корисної дії роботи, але і забезпечити необхідні вимоги виконання технологічного процесу. Для наведених схем виконано розрахунок потужності приводних машин змінного струму, потужність частотного перетворювача що застосовується в системі електропривода, коефіцієнту корисної дії й наведено діапазон регулювання та зазначені можливі аварійні випадки. За результатами аналізу на базі наведеного прикладу, встановлено що використання системи частотно-регульованого дводвигунного електропривода з автономним живленням дозволяє знизити потужність приводу в 2,15 рази, зменшити вагу системи електропривода, підвищити керованість, збільшити діапазон регулювання і спростити експлуатацію кінематичної схеми технологічного механізму.

**Ключові слова:** дводвигунний електропривод, потужність електропривода, системи керування.

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** Незважаючи на інтенсивний розвиток промислового обладнання, на сьогодні на багатьох промислових підприємствах що працювали ще у минулому сторіччі використовують механізми з застарілими системами електропривода. З урахуванням часткового зносу технологічного обладнання та обмеженої можливості щодо керування ЕП такі системи не є ефективними і потребують модернізації.

Одним із прикладів такого електропривода є система, що складається з двох електродвигунів, з'єднаних між собою механічним або електричним способом і застосовується у деяких випадках з міркувань конструктивного характеру або з метою зменшення моменту інерції електропривода, а також по ряду інших причин (підвищення надійності роботи привода, відсутність електродвигуна необхідної потужності, отримання спеціальних регульовальних характеристик) [1].

Такі електроприводи знаходять застосування в металорізальних верстатах, в підйомно-транспортних установках (портальні і козлові крани), в механізмах металургійної промисловості, як прокатні кліті, обертові печі, ножиці і т.ін. Також в спеціальних установках великої потужності і в установках торфопідприємств (наприклад, механізм пересування шляхопереукладчика на залізничному ходу). Тобто для тих механізмів, де застосування механічного зв'язку між окремими ланками робочої машини, розташованими на порівняно великій відстані, призводить до дуже складним передачам і громіздким конструкціям.

Спільна робота двох електродвигунів має два основних виконання: жорсткий механічний зв'язок між

електродвигунами, коли обидва електродвигуна знаходяться на одному загальному валу з робочою машиною; електричний зв'язок, коли електродвигуни з'єднані за схемою електричного вала, при якій досягається їх синхронне обертання. Застосовуються дві основні схеми електричного вала: схема синхронного обертання двох асинхронних електродвигунів із загальним реостатом в роторному ланцюзі і схема синхронного обертання електродвигунів з допоміжними машинами [2].

Однак дводвигунний привід має наступні недоліки. Він складніший по конструкції і обслуговування, займає велику площу, вартість його набагато більше, ніж однодвигунний привід такої ж потужності. Особливо важко підібрати електродвигуни для дводвигунного привода, які повинні мати не тільки однакові номінальні дані, але і однакові механічні характеристики. Якщо ж характеристики електродвигунів відрізняються один від одного, то при їх спільній роботі навантаження між ними буде розподілятися нерівномірно, що приводить до перевантаження одного з них, а також до нерівномірного зносу елементів кінематичної передачі - шестерень редукторів, шпинделів і ін. [2].

Як зазначалося раніше така система електропривода широко використовується в механізмах циклічної дії. Для таких механізмів характерні часті пуски та зупинки, тому система електропривода повинна забезпечити не тільки синхронну роботу під час сталого режиму, а і під час динамічного режиму що значно складніше [3].

На сьогодні досягнення у розвитку силових перетворюючих пристроїв з використанням сучасної мікропроцесорної техніки дозволяють підвищити

показники якості виконання технологічних процесів і як наслідок підвищити якість і продуктивність виробництва, за рахунок модернізації існуючих систем електропривода технологічних механізмів з використанням сучасних методів управління в автоматизованих системах керування електроприводів (АСКЕП).

Мета роботи є аналіз напрямку модернізації системи дводвигунного електропривода змінного струму на прикладі системи дистанційний електричний вал.

**МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.** Як приклад модернізації наведений дводвигунний електропривод в системі дистанційний електричний вал механізму підймання що є типовим і досить широко застосовуваним. Автоматизована система керування, що розробляється, повинна забезпечувати такі режими роботи електропривода, які були б оптимальні, енергоресурсекономичні та забезпечили б виконання всіх етапів технологічної операції, а саме рушення, пуску, синхронне переміщення сторін габаритного об'єкта по заданій траєкторії і позиціонування під час установки при необхідності.

Перелічені вище вимоги є підставою для пошуку технічних рішень, що забезпечують необхідну якість технологічного процесу з мінімальним споживанням електроенергії та зниження експлуатаційних витрат із застосуванням сучасних засобів автоматизації.

Для застосування в системі електричного вала цілком придатні будь-які асинхронні машини з контактними кільцями, з однаковою напругою, кількістю фаз і обмотками. Переважно обидві машини електричного вала на статорі та роторі мають обмотки трифазного струму; застосовуються також і машини, які мають трифазні обмотки тільки на статорі або роторі, тоді, як інша частина машини забезпечена однофазною обмоткою, а іноді додатковою обмоткою, зміщеною відносно до першої на  $90^\circ$  [4].

Сама поширена функціональна схема дистанційного електричного вала з реостатом в роторному ланцюзі основних приводних машин зображена на рис. 1. Машини електричного вала слід розраховувати так, щоб вони могли надійно передавати найбільш розбіжні обертальні моменти обох груп машин. Отже, габаритні потужності машин електричного вала, зазвичай вибирають аж ніяк не за абсолютною величиною необхідних навантажувальних моментів.

Якщо навантаження обох приводних двигунів завжди приблизно незмінне, то машини електричного вала можуть вибиратися відносно невеликими. У деяких випадках висувуються вимоги, щоб погоджене обертання зберігалось також у разі виходу з ладу одного приводного двигуна. У цьому випадку необхідні відповідно потужні машини електричного вала [2]. Переважно електричний вал komponується тільки з двох машин одного типу.

З урахуванням особливостей роботи електропривода технологічних механізмів з урахуванням перевантаження під час пуску розрахунок потужності машин електропривода виконується для режимів пуску та роботи у важких умовах.

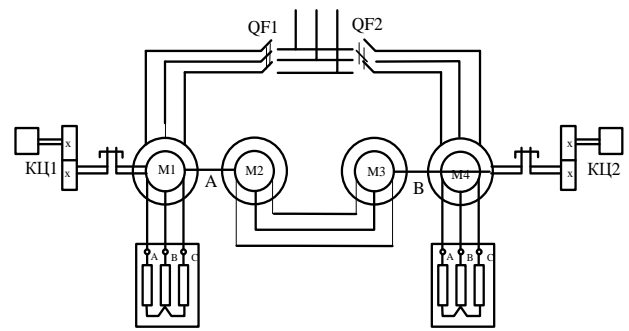


Рисунок 1 – Система електроприводу механізму підймання: QF1, QF2 – комутатори; М1, М4 – приводні асинхронні двигуни з реостатним пуском; М2, М3 – допоміжні машини, з'єднані в схему «електричний вал»; КЛ1, КЛ2 – кінематичний ланцюг відповідно до першого і другого двигуна

Розрахункову потужність електропривода механізму підймання визначаємо із залежності [5]:

$$P_p = \frac{M \cdot n}{9550}, \quad (1)$$

де  $M$  – статистичний момент,  $\text{Н} \cdot \text{м}$ ;  $n$  – частота обертання двигуна,  $\text{об} / \text{хв}$ .

Статистичний момент опору для електропривода визначаємо з урахуванням сил, які формуються під час пуску і під час роботи з перерозподілом моменту опору за відомою формулою [6]:

$$M_c = 9,55 \frac{\Sigma F_c \cdot V}{n \cdot \eta}, \quad (2)$$

де  $\Sigma F$  – сумарне значення сил опору,  $\text{Н}$ ;  $v$  – швидкість переміщення об'єкта;  $n$  – частота обертання двигуна,  $\text{об} / \text{хв}$ ;  $\eta$  – ККД механізму з повним навантаженням з урахуванням ККД складових елементів механізму підймання та робочого органу [7].

Приклад системи що розглядаються виконаний на базі дводвигунного електропривода отже, розрахункова потужність ділитися на два.

За методикою заводу «Динамо» [8] вибір потужності виконують у три етапи. На першому етапі виконують попередній вибір потужності двигуна, потім двигун перевіряють з урахуванням параметрів режиму роботи і керуючого пристрою, а на третьому етапі проводять перевірку двигуна за умовами забезпечення надійного пуску.

Попередню потужність двигуна вибирають з умови за формулою:

$$P \geq P_o / k_T, \quad (3)$$

де  $k_T$  – коефіцієнт, що враховує режим роботи механізму, від керуючого пристрою і електропривода.

З табл. 1 видно, що значення потужності електропривода під час реостатному пуску збільшується майже в 1,33 рази для кожного приводу і в 1,4 рази для всієї системи. Режими роботи згідно з Правилами Держнаглядохоронпраці: Л – легкий (до 60 включень на годину); С – середній (до 120 включень на годину); Т – важкий (до 240 включень на годину) і ВТ – дуже важкий (до 600 включень на годину) [10].

Розрахунок виконано для технологічного механізму що розглянуто у роботі [6, 7].

Таблиця 1 – Коефіцієнти для вибору потужності двигуна з урахуванням системи управління [8]

Вид електропривода (двигун асинхронний)	$\eta_0$	$k_D$	$k_T$							
			Підйом при $[J_{\Sigma} / (1.2J_D)] \leq 2$ , Переміщення і поворот $[J_{\Sigma} / (1.2J_D)] \leq 5$ для режимів				Переміщення та поворот при $[J_{\Sigma} / (1.2J_D)] > 5$ для режимів			
			Л	З	Т	ВТ	Л	З	Т	ВТ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Одношвидкісний у системі частотного регулювання	0,94	1,25	1,45	1,30	1,15	1,05	1,15	1,10	0,85	0,70
З фазним ротором під час гальмування проти включення	0,76	1,25	1,45	1,20	0,95	0,75	0,75	0,65	0,35	0,20
З фазним ротором при динамічного гальмування	0,81	1,25	1,50	1,30	1,10	0,90	0,90	0,85	0,50	0,30

Отже, якщо розрахункове значення потужності основної асинхронної машини становить 34 кВт, а уточнене за системою управління 45 кВт, то допоміжні машини вибирають з потужністю 22 кВт. З умови роботи дистанційного електричного вала допоміжні машини працюють на повне навантаження тільки тоді, коли виконують синхронізацію з нерівномірним розподілом моментів опору на провідних машинах, в інших випадках вони працюють на холосту [2, 4]. За такої системи потужність електропривода механізму підймання збільшена в 2 рази порівняно з розрахунковою  $R_{пр} = 2,04R_p$ , що є витратним як щодо економії електроенергії, так і щодо зменшення безаварійного часу роботи технологічного механізму завдяки збільшенню робочого обладнання.

У роботах [9, 10] обґрунтовано застосування систем керованого рушання, пуску, переміщення і зупинки асинхронного двигуна з перетворювачем частоти (ПЧ), що забезпечує з мінімальними витратами енергії досягнення найбільш сприятливих умов роботи і, унаслідок цього, зниження аварійності технологічного обладнання.

Застосування сучасних систем приводів на базі частотно-регульованого асинхронного електропривода дозволить не тільки виконати модернізацію морально застарілого обладнання, відмовитися від додаткових машин, що підвищить ККД виконуваних робіт, але і забезпечити необхідні вимоги виконання технологічного процесу.

Одним із прикладів такої системи є включення в роторний ланцюг дводвигунного привода без додаткових машин перетворювача частоти, схема якої наведена на рис. 2 [2]. Система є керованим електричним валом, який дозволяє синхронізувати моменти основних асинхронних машин завдяки формуванню керованих струмів у роторному ланцюзі. Недоліком цієї системи є необхідність використання ПЧ з дворазовою потужністю приводних машин  $R_{пч} \geq 2R_{пм}$ .

Більш удосконалена система управління механізмом технологічним механізмом реалізована на дводвигунному електроприводі з машинами подвійного живлення і показана на рис. 3.

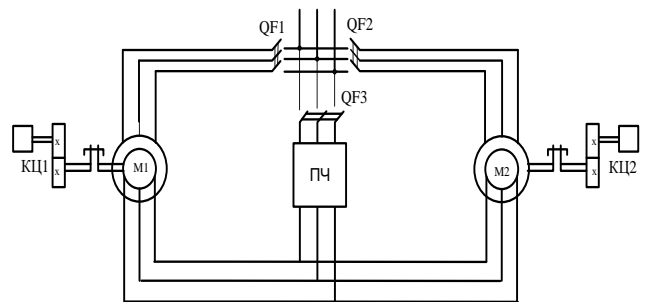


Рисунок 2 – Система дводвигунного електропривода з перетворювачем частоти в загальному ланцюзі ротора

Застосування такої системи дводвигунного електропривода обґрунтовано такими перевагами машин подвійного живлення: робота на різних швидкостях; роздільний контроль активної та реактивної потужності; надійність і мінімальне обслуговування; живлення статора і ротора можливо струмами різних частот; використання для керування статичних перетворювачів половинної потужності; можливість роботи із частотою обертання вала  $2n_{ном}$  з живленням від промислової мережі й отриманням подвоєної потужності за таких самих розмірів, значення магнітного потоку і крутного моменту [11].

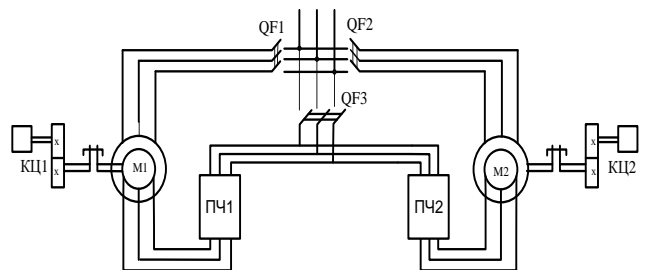


Рисунок 3 – Система дводвигунного електропривода з перетворювачем частоти в ланцюзі ротора кожної машини

Асинхронний двигун з фазним ротором у режимі машини подвійного живлення (МПЖ) має високі

техніко-економічні показники. Високий ККД, що перевищує ККД звичайного режиму, пояснюється в цих машинах відсутністю вторинних утрат (утрати в роторі асинхронного двигуна). У МПЖ вторинних утрат за принципом роботи взагалі немає, оскільки статор і ротор є первинними, обмотки яких підключені безпосередньо до однієї загальної мережі.

Електромагнітний момент машини подвійного живлення має три складові. Перша складова відповідає звичайному моменту асинхронного двигуна, коли відсутня додаткова електрична сила (ЕРС) у ланцюзі ротора ( $\epsilon = 0$ ). Друга складова обумовлена додатковою ЕРС, яка вводиться в роторний ланцюг з метою впливу на швидкість двигуна. Третя складова пов'язана з впливом на коефіцієнт потужності. Перша і третя складові досягають максимального значення під час ковзання  $s = \pm s_k$ , а друга – з  $s = 0$ . Залежно від режиму роботи МПЖ, кожна зі складових може мати домінуюче значення. Механічні характеристики трифазного двигуна з живленням з боку ротора за різних умов регулювання швидкості наведені на рис. 4. За необхідності впливу тільки на швидкість двигуна додаткова ЕРС вторинного ланцюга повинна збігатися з вектором поля статора або відставати від нього на  $180^\circ$ .

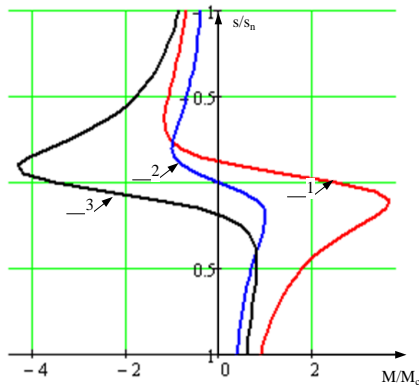


Рисунок 4 – Механічні характеристики трифазного колекторного двигуна з ПЧ з боку ротора за різних умов регулювання швидкості: 1 – додаткова ЕРС, зрушена на  $40^\circ$ ; 2 – додаткова ЕРС збігається з вектором поля статора; 3 – додаткова ЕРС, зрушена на  $220^\circ$

Потужність асинхронних машин дводвигунного привода для регулювання від перетворювача частоти в ланцюзі ротора вибирається за номінальними значеннями моменту опору і відповідає розрахунковим значенням, тобто 34 кВт – кожен приводний двигун.

Переваги цієї системи порівняно з класичним частотно-регульованим електроприводом, полягають у можливості зниження потужності перетворювача частоти, вибраного за номінальними значеннями струму, і потужності в ланцюзі управління, тобто в

роторному ланцюзі асинхронної машини. Струм у роторному ланцюзі визначається з виразу:

$$I_c = I_\mu + I_r, \tag{4}$$

де  $I_c$  – струм статора;  $I_\mu$  – струм контуру намагнічування;  $I_r$  – струм ротора.

Недоліком цієї системи є наявність малих заспокоїливих моментів, тому машини схильні до коливань [11] і виникає необхідність застосування асинхронних машин з контактними кільцями, які мають певні недоліки, порівняно з асинхронними машинами з короткозамкненим ротором (АД КЗ). Тому з урахуванням усіх переваг МПЖ, для механізму циклічної дії ця система непридатна, оскільки під час рушення має значні коливання машин, що може призвести до нерівномірного переміщення сторін об'єкту. Система частотно-регульованого електропривода на базі АД КЗ наведена на рис. 5.

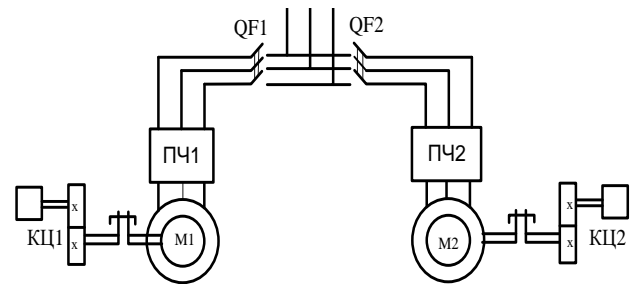


Рисунок 5 – Система частотно-регульованого дводвигунного електропривода з автономним живленням

Застосування перетворювача частоти з автономним інвертором струму спрощує формування необхідних законів частотного управління оскільки формує параметри напруги живлення незалежно від моменту навантаження.

Ця система електроприводу має такі переваги: жорсткі зовнішні характеристики; ККД приблизно 0,95–0,96; практично немає споживання з мережі реактивної потужності; простоту конструкції, дешевизну, малі вагові габарити через відсутність в АМ щітково-колекторного апарата; постійна часу перетворювача – близько 0,001 с. [12].

Використання цієї системи дозволяє збільшити термін служби двигуна на 20 %, зменшити витрати на ремонт на 30 %, зменшити час простою з вини відмови електрообладнання на 80 %, економити на заміні контакторів і контактів [13].

Для розрахунку потужності дводвигунного електропривода враховується коефіцієнт з табл. 1. Результати розрахунку потужності електропривода в розглянутих системах управління, їхні переваги та недоліки зведені до табл. 2.

Таблиця 2 – Порівняльні характеристики систем дводвигунного електроприводу механізму підймання

Параметри	Система «дистанційний	Дводвигунний привод з	Дводвигунний привод
-----------	-----------------------	-----------------------	---------------------

	електричний вал»	МПЖ	з незалежним частотним регулюванням АД
Необхідна потужність асинхронних машин.	$1,971P_d$	$P_d$	$0,95 P_d$
Діапазон регулювання	$1 \div 10$ залежно від ступенів	$1 \div 200$	$1 \div 100$
ККД	$\approx 0,5$	0,99	0,95
Аварійність	Високий рівень аварійності за рахунок контакторних-релейного обладнання	Низький рівень за рахунок застосування АД з щітково-колекторним апаратом	Дуже низька за рахунок застосування ПЧ–АД з системою управління
Система управління	Простота експлуатації та ремонту	Складність реалізації та налаштування	Необхідність застосування системи управління
Потужність ПЧ	–	$1,2 P_d$	$P_d$
Вартість	–	$1,35 Q$	$Q$

**ВИСНОВКИ.** За результатами аналізу встановлено, що використання системи частотно-регульованого дводвигунного електропривода з автономним живленням є ефективним засобом зниження матеріальних витрат під час експлуатації електроприводів у технологічних механізмах циклічної дії.

Перевірочний розрахунок потужності електропривода з урахуванням системи управління показав, що застосування системи ПЧ–АД дозволяє знизити потужність приводу в  $2,15$  рази, зменшити вагу системи електропривода, підвищити керованість, збільшити діапазон регулювання і спростити експлуатацію кінематичної схеми технологічного механізму.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Электрооборудование торфопредприятий - область применения и виды специальных электроприводов. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <ftp://leg.co.ua/arhiv/raznoe-arhiv/elektrooborudovanie-torfopredpriyatij/Page-11.html>
2. Унгро Ф., Йордан Г. Системы согласованного вращения асинхронных электродвигателей. Л. : Энергія., 1971. 182 с.
3. Петров Л. П. Управление пуском и торможением асинхронных двигателей. М. : Энергоиздат, 1981. 184 с.
4. Ещин Е. К. Электромеханические системы многодвигательных электроприводов : Моделирование и управление. Кемерово. 2003. 247 с.
5. Герасимьяк Р. П., Лещев В. А. Анализ и синтез крановых электромеханических систем. Одесса : СМІЛ, 2008. 192 с.
6. Хребтова О. А., Сергієнко С. А. Дослідження властивостей системи електропривода механізму

підйому затвора зливної греблі. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи.* 2012. № 4 (20). С. 63–69.

7. Хребтова О. А., Гладырь А. И. Особенности трогания кранового электропривода подъема затвора сливной плотины. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» : Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика.* 2008. № 30. С. 381–384.

8. Александров М. П., Гохберг М. М., Ковкин А. А. Справочник по кранам : В 2 т. Том 1. Характеристики материалов и нагрузок. Основы расчета кранов, их приводов и металлических конструкций. под ред. М. М. Гохберга. М. : Машиностроение. 1988. 536 с.

9. Клепиков В. Б. Динамика электромеханических систем с нелинейным трением: монография. Х. : Изд-во «Підручники НТУ «ХП». 2014. 408 с.

10. Петрушин В. С., Якимец А. М., Груша А. В., Каленик О. В. Энергетические и тепловые показатели регулируемых асинхронных двигателей с учетом высших пространственновременных гармоник. *Електромашинобудування та електрообладнання: Міжвід. наук.-техн. зб.* 2008. № 70. С. 68–71.

11. Радин В. И., Брускин Д. Э., Зорохович А. Е. Электрические машины. Асинхронные машины. Учебник для электромех. спец. вузов. под ред. И. П. Копылова. М. : Высшая школа, 1988. 328 с.

12. The power electronics handbook / ed. by T.L. Skvarenina. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 2002. 664 p.

13. Чорний А. П., Гладир А. І., Осадчук Ю. Г. та ін. Пускові системи нерегульованих електроприводів : монографія. Кременчук: ПП Щербатих О. В., 2006. 280 с.

#### DIRECTIONS OF MODERNIZATION OF SYSTEMS OF TWO-MOTOR ELECTRIC DRIVE OF AC

O. Khrebtova, N. Zachepa, A. Nekrasov, A. Onishchenko

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

ORCID: 0000-0002-4369-0262; 0000-0003-0365-5320; 0000-0001-7304-2082; 0000-0002-3793-331X

**Purpose.** The features of the operation of the twin-motor electric drive system are considered. They are used to reduce the moment of inertia of an electric drive and for those mechanisms where a mechanical connection is required between the individual links of the working machine. The links are located at a great distance from each other. This technological mechanism has a very complex transmission and bulky design. For a standard twin-motor drive system, it is usually performed with rheostat starting of the main machines. **Methodology.** For this circuit, the power of AC electrical machines is calculated. The peculiarity of the operation of the electric drive of the technological mechanisms are taken into account. The calculation of electric machine power is performed for start-up and operation in difficult

conditions. Modern drive systems, based on frequency -controlled synchronous electric drive are presented for analysis. The prospective ones are considered: a system of two motor electric drives with a frequency converter in the common rotor circuit, a system of two motor electric drives with a frequency converter in the rotor circuit of each machine and a system of a frequency-controlled two motor electric drives with autonomous power supply. **Results.** Based on the comparison results, for the established operating conditions, a frequency-controlled two motor electric drive system with autonomous power supply was selected. **Originality.** This will allow modernizing outdated equipment, abandoning additional machines, increasing efficiency and meeting the necessary requirements for the technological process. The power of AC drive machines, the power of the applied frequency converter, the adjustment range and the possible emergencies are calculated for the schemes. **Practical value.** According to the results of the analysis, it was found that the use of a frequency-controlled twin-motor electric drive system with autonomous power supply allows reducing the drive power by 2.15 times, reducing the weight of the electric drive system, increasing controllability, increasing the control range and simplifying the operation of the kinematic diagram of the technological mechanism.

**Key words:** two - motor electric drive, electric drive power, control systems.

#### REFERENCES

1. Electrical equipment of peat enterprises - field of application and types of special electric drives. lib.sumdu.edu.ua. Retrieved from <ftp://leg.co.ua/arhiv/raznoe-arhiv/elektrooborudovanie-torfopredpriyatij/Page-11.html>
2. Ungro, F. & Jordan, G. (1971). *Sistemy soglasovannogo vrashcheniya asinkhronnykh elektrodvigateley* [Systems of coordinated rotation of asynchronous electric motors]. Leningrad: Energiya [in Russian].
3. Petrov, L. P. (1981). *Upravleniye puskom i tormozheniyem asinkhronnykh dvigateley* [Control of starting and braking of asynchronous motors]. Moscow: Energoizdat [in Russian].
4. Klepikov, V. B. (2014). *Dinamika elektromekhanicheskikh sistem s nelineynym treniyem: monografiya* [Dynamics of electromechanical systems with nonlinear friction: monograph]. Kharkov: Publishing house "Textbooks of NTU "KhPI" [in Russian].
5. Petrushin, B. C., Yakimets, A. M., Grusha, A. V., & Kalenik A. V. (2008). *Energeticheskiye i teplovyeye pokazateli reguliruyemykh asinkhronnykh dvigateley s uchetom vysshikh prostranstvennovremennykh garmonik* [Energy and thermal characteristics of adjustable asynchronous motors taking into account the higher spatial and temporal harmonics]. *Electrical engineering and electrical equipment: Interdisciplinary scientific and technical. Sat.* No.70, pp. 68-71 [in Russian].
6. Eshchin, E. K. (2003). *Elektromekhanicheskiye sistemy mnogodvigatel'nykh elektroprivodov: Modelirovaniye i upravleniye* [Electromechanical systems of multi-engine electric drives Modeling and control]. Kemerovo [in Russian].
7. Gerasimyak, G. P., & Leshchev, V. A. (2008). *Analiz i sintez kranovykh elektromekhanicheskikh sistem* [Analysis and synthesis of crane electromechanical systems]. Odessa: SMIL [in Russian].
8. Khrebtovaya, O. A., & Sergienko, S. A. (2012). *Doslidzhennya vlastyvostey systemy elektroprivoda mekhanizmu pidyomu zatvora zlyvnoyi hrebli* [Investigation of the properties of the electric drive system of the mechanism for lifting the shutter of the drain dam]. *Electromechanical and energy saving systems.* Vol.4 (20), pp. 63-69 [in Ukrainian].
9. Khrebtovaya, O. A., & Gladyr, A. I. (2008). *Osobennosti troganiya kranovogo elektroprivoda pod'yema zatvora slivnoy plotiny* [Peculiarities of starting the crane electric drive for lifting the shutter of the drain dam]. *Bulletin of the National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute": Problems of the automated electric drive. Theory and practice.* No. 30, pp. 381-384 [in Russian].
10. Aleksandrov, M. P., Gokhberg, M. M., & Kovkin, A. A. (1988). *Spravochnik po kranam: V 2 t. Tom 1. Kharakteristiki materialov i nagruzok. Osnovy rascheta kranov, ikh privodov i metallicheskih konstruksiy* [Handbook of cranes: In 2 volumes. Volume 1. Characteristics of materials and loads. Basics of calculating cranes, their drives and metal structures]. Moscow: Mechanical engineering [in Russian].
11. Radin, V. I., Bruskin, D. E., & Zorokhovich A. E. (1988). *Elektricheskiye mashiny. Asinkhronnyye mashiny. Uchebnik dlya elektromekh. spets. vuzov* [Electric machines. Asynchronous machines. Tutorial for electromechanics. specialist. Universities]. Moscow: Higher school [in Russian].
12. *The power electronics handbook* / ed. by T.L. Skvarenina. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 2002.664 p.
13. Cherny, A. P., Gladyr, A. I., Osadchuk Yu. G. et al. (2006). *Puskovi systemy nerehul'ovanykh elektroprivodiv: monografiya* [Starting systems of non-regulated electric drives: monograph]. Kremenchug PE Shcherbatykh A.V. [in Ukrainian].

Стаття надійшла 24.03.2021.