

УДК 621.316.35:006.354

ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ МЕХАНІЗМУ ПЕРЕМІЩЕННЯ МОСТОВОГО КРАНУ ПРИ ЖИВЛЕННІ ВІД ТРОЛЕЙНОГО ШИНОПРОВОДА В УМОВАХ ДІЇ ВИЩИХ ГАРМОНІК СТРУМУ

- КОЦУР М.І. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електричних та електронних апаратів НУ «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: kotsur8@gmail.com
- БЕЗВЕРХНЯ Ю.С. д-р філософії (канд. техн. наук), ст. викл. кафедри електричних машин НУ «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: juliakafedraem@gmail.com
- ЯРИМБАШ Д.С. д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри електричних машин НУ «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: yarymbash@gmail.com;
- КОЦУР І.М. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електричних машин НУ «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, e-mail: igor.m.kotsur@gmail.com

Мета роботи. Аналіз та дослідження взаємопов'язаних електромагнітних процесів між електроприводами механізму переміщення мостового крану та тролєями шинопровода в умовах дії вищих гармонік струму, з врахуванням конструктивних особливостей, нелінійності магнітних і електрофізичних властивостей матеріалів, ефектів близькості, поверхневих та зовнішніх поверхневих ефектів.

Методи дослідження. Дослідження проводилися із застосуванням методів теорії електромагнітного поля, теорії електричних кіл, математичної фізики, розв'язанням системи диференціальних рівнянь першого роду, інтерполяції, апроксимації та регресійного аналізу.

Отримані результати. Розроблена імітаційна модель взаємопов'язаних електромагнітних процесів між електроприводами механізму переміщення мостового крану (з релейно-контакторною системою та перетворювачем частоти) та струмопровідними елементами системи електропостачання мостового крану. Проведено дослідження взаємопов'язаних електромагнітних процесів між електроприводами механізму переміщення мостового крану та тролєями шинопровода. Встановлені закономірності втрат напруги в тролєях шинопровода від моменту асинхронного електроприводу, що дозволяють, як при основній так і при вищих гармоніках струму, визначити максимальну допустиму відстань переміщення мостового крану до точки підживлення секції тролєїв шинопровода, при якій забезпечується безаварійна робота електроприводу мостового крану, а також визначити кількість точок підживлення секцій тролєїв шинопровода та відстані між ними, що забезпечить однаковий рівень втрат напруги та активних втрат в тролєях шинопровода при основній гармоніці і з врахуванням вищих гармонік струму навантаження.

Наукова новизна. Розроблена імітаційна модель взаємопов'язаних електромагнітних процесів між електроприводами механізму переміщення мостового крану та струмопровідними елементами системи електропостачання мостового крану, яка дозволяє використовувати інтегровані параметри тролєїв шинопровода за даними польового розрахунку з врахуванням скін-ефекту, ефекту близькості, поверхневих та інших крайових ефектів, а також форми та розташування шин (тролєїв) в шинопроводі, відстаней між ними і кількістю фаз шинопровода, в залежності від особливості режимів роботи електроприводу та відстані розташування мостового крану до точки живлення секцій тролєїв шинопровода.

Практична цінність. На основі теоретичного дослідження розроблені рекомендації щодо зменшення втрат напруги та активних втрат в тролєях шинопровода від дії вищих гармонік струму навантаження до рівня втрат напруги та активних втрат при основній гармоніці струму.

Ключові слова: тролей, шинопровід, втрати напруги, активні втрати, модель, мостовий кран, гармоніки.

І. ВСТУП

Виробництво металургійної енергоємної продукції, забезпечення технологічних операцій за допомогою застосування підйомно-транспортних механізмів, у тому числі кранових електроприводів в цехах підприємств є дуже енерговитратним. Тому, для модернізації власних енергосистем підприємств металургійної промисловості потрібно застосування сучасних

рішень в області енергоресурсозбереження. Системи цехового електропостачання повинні задовольняти жорстким вимогам високої надійності, ефективності та безпеки, забезпечуючи при цьому високу якість електричної енергії. Сучасні системи цехового електропостачання можуть мати значну довжину яка може бути більше 1000 м. Тому, їх параметри та електромагнітні характеристики мають істотний вплив на якість електроенергії, режими роботи електроприймачів і

енергоефективність технологічних процесів [1]. Широке застосування силових напівпровідникових перетворювачів у всіх галузях промисловості дозволило підвищити енергоефективність промислових установок, знизити споживання електроенергії, підвищити якість виготовленої продукції [2]. Проте впровадження частотно-регульованих електропроводів [3], випрямлячів та інших напівпровідникових перетворювачів [4] призводить до генерації вищих гармонік струму та напруги в шинопроводах, що негативно позначається на коефіцієнті потужності мережі [5]. Наявність вищих гармонік, а також їх відхилення від нормованих значень, негативно впливає на ефективність і надійність елементів системи електропостачання. Вони можуть призводити до істотного збільшення активних та реактивних опорів тролей шинопровода, втрат напруги, активних втрат, зниження коефіцієнта потужності мережі [6]. Так, наприклад, після модернізації систем електроприводів металообробних установок, прокатних станів і мостових кранів у цехах Запорізького ливарно-механічного заводу, що входить до найбільшої міжнародної гірничо-металургійної групи Metinvest, виникла проблема втрати потужності та напруги системи живлення мостових кранів, що в результаті призвело до значного зниження пускового моменту асинхронних двигунів мостового крана на відстані $2/3$ і повної його зупинки приблизно на $3/4$ від повної протяжності прольоту цеху. Це значною мірою призводить до обмеження потужності цехових електроприймачів та порушення виробничо-технологічних операцій на етапах виготовлення та транспортування продукції.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Для оцінки падіння напруги, залежно від коефіцієнта потужності мережі, застосовуються класичні методи для тролів шинопровода виготовлених із сталі [7] та для тролів шинопровода виготовлених із кольорових металів [8]. Вони засновані на емпіричних залежностях та не враховують геометрію активних матеріалів, їх електромагнітні властивості, частоту основної гармоніки струму, поверхневі ефекти, ефекти близькості тощо. У роботі [9] авторами було запропоновано вдосконалену методику визначення втрат напруги в шинопроводах з урахуванням частоти основної та вищих гармонік струму, а також виконано їх порівняльну оцінку при допустимому гармонічному складі струму, регламентованому стандартом [10], [11]. За результатом оцінки було показано, що при дії вищих гармонік перевищення втрат напруги щодо основної гармоніки становить $1,13 \div 2,5$ раз, залежно від коефіцієнта короткого замикання [12]. Однак ці результати були отримані з припущенням про відсутність впливу ефекту близькості та скін-ефекту. Так як дія ефекту близькості та скін-ефекту посилюються при дії вищих гармонік, згідно з [13], застосування методик [9],[12] не дозволяє забезпечити необхідну точність та достовірність результатів, вплив гармонійного складу струмів та напруг, нелінійності влас-

тностей активних матеріалів, поверхневі ефекти, ефекти близькості тощо. Альтернативою методикам, заснованих на узагальнених висловлюваннях та емпіричних залежностях, можливо застосування методів розрахунку електромагнітних параметрів і на основі польового моделювання [14]. Застосування методів розрахунку на основі польового моделювання набуло поширення для широкого класу завдань електротехніки [15]-[16]. Однак його комп'ютерна реалізація на основі методів кінцевих елементів у компонентних областях активної частини з нелінійними електрофізичними властивостями ускладнена великими витратами часу та вимогами до обчислювальних ресурсів. У роботі [16] пропонується визначати електромагнітні параметри електротехнічних систем перетворення змінного струму на основі реалізації моделі електромагнітного поля для завдання у time step формулюванні. Такий підхід дозволяє враховувати нелінійність властивостей активних матеріалів, гармонійний склад струмів та напруг, але потребує значних витрат часу на чисельну реалізацію через необхідність збіжності розрахунку кожного часового шару. У роботах [17], [18] була запропонована польова модель у частотному формулюванні. Такий підхід вимагає значно менших витрат часу на чисельну реалізацію та дозволяє врахувати окремо вплив кожної гармонійної складової струму та напруги на параметри та характеристики шинопроводів. За допомогою польової моделі в частотному формулюванні [18] запропонована вдосконалена модель для визначення падіння напруги в залежності від коефіцієнта потужності мережі, що має високу точність та ефективність.

Таким чином актуальним завданням є проведення дослідження взаємопов'язаних електромагнітних процесів між електроприводом механізму переміщення та струмопроводними елементами мостового крана, для визначення електромагнітних параметрів в залежності від відстані розташування мостового крана до точки живлення тролей шинопровода, та розробка рекомендацій щодо збереження допустимих значень втрат напруги в троліях шинопровода при дії вищих гармонік струму у мережі цехового електропостачання.

III. МЕТА РОБОТИ

Аналіз та дослідження взаємопов'язаних електромагнітних процесів між електроприводами механізму переміщення мостового крану та троліями шинопровода в умовах дії вищих гармонік струму, з урахуванням конструктивних особливостей, нелінійності магнітних і електрофізичних властивостей матеріалів, ефектів близькості, поверхневих та зовнішніх поверхневих ефектів.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГУ МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Для проведення досліджень втрат напруги, активних втрат в троліях шинопровода при роботі механі-

зму переміщення мостового крану, розроблена імітаційна модель взаємопов'язаних електромагнітних процесів між струмоприймачами механізму переміщення мостового крану і струмопровідними елементами системи електропостачання мостового крану, яка дозволяє використовувати інтегровані параметри шинопровода за даними польового розрахунку з врахуванням скін-ефекту, ефекту близькості, поверхневих та інших крайових ефектів, форми і розташування шин (тролеїв), відстаней між ними і кількості фаз шинопровода, в залежності від особливості режимів роботи струмоприймачів. Структурна схема імітаційної моделі (рис. 1) містить імітаційні підмоделі шинопровода, перетворювачі частоти з асинхронними двигунами (АД), що мають короткозамкнений ротор.

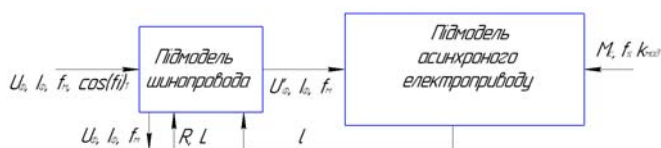


Рисунок 1. Структурна схема імітаційної моделі взаємопов'язаних електромагнітних процесів між струмоприймачем та елементами системи електропостачання цеху

Імітаційна модель реалізована в структурі засобу Simulink програмного забезпечення MatLAB з інтеграцією програмного забезпечення Comsol Multiphysics за допомогою модуля LiveLink.

При розробці імітаційної моделі прийняті наступні припущення [19]:

- струмопровідна система від живлячого трансформатора до тролейного шинопровода має значно не велике та постійне значення активного та реактивного опорів, та при моделюванні не враховується;

- напруга мережі має синусоїдальну форму, амплітуда якої має постійне значення, виконується симетрія фазної напруги;

- коефіцієнт потужності мережі визначається додаванням індуктивності живлячої мережі L_s .

Підмодель шинопровода в структурі засобу Simulink реалізовано за допомогою стандартних елементів активного опору та індуктивності відповідно до кожної фази. Вхідними параметрами підмоделі шинопровода є фазна напруга U_ϕ , струм I_ϕ , частота f_m та коефіцієнт потужності $\cos \varphi_1$ мережі. Також до вхідних параметрів підмоделі шинопровода відносяться результуючі значення активного опору R , індуктивності L та величина відстані l між точкою живлення тролей шинопровода та точкою приєднання струмоприймачів механізму переміщення мостового крану. Активний опір R та індуктивність L є залежними від довжини l шин та визначаються за допомогою польового моделювання з врахуванням гео-

метричної форми, розмірів та відстаней між шинами. При імітаційному моделюванні електромагнітних процесів в тролей шинопровода падіння напруги визначається за повним опором тролей шинопровода [6]. Для розрахунку параметрів R та L в польовій моделі [16] на етапі налагодження імітаційної моделі, в залежності від особливості роботи струмоприймачів механізму переміщення мостового крану, визначається гармонійний склад струму. Для тролейного шинопровода l є змінною величиною, яка залежить від переміщення мостового крану.

Вихідними параметрами підмоделі шинопровода є напруга U'_ϕ , струм I_ϕ , частота мережі f_m , та розраховані значення втрат напруги у фазах А, В, С [182]:

$$\Delta U|_{A,B,C} = U_\phi|_{A,B,C} - U'_\phi|_{A,B,C}, \quad (1)$$

та активні втрати [181]:

$$\Delta P|_{A,B,C} = \cdot i^2|_{A,B,C} \cdot R_{рез}|_{A,B,C}. \quad (2)$$

Підмодель асинхронного електроприводу складається з підмоделі АД та перетворювача частоти. В імітаційній моделі перетворювач частоти використовується в якості генератора вищих гармонік струму, а АД - змінного навантаження. Вони не є предметом дослідження, тому скористаємось їх відомими моделями [20]. Для асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором використовується стандартна найпоширеніша двофазна математична модель в d-q координатах з урахуванням загальноприйнятих припущень [21]. Для перетворювача частоти використовується стандартна найпростіша модель, яка враховує загальноприйняті припущення [22]. В трифазних інверторах з ШІМ за синусоїдальним законом реактивна енергія повністю скомпенсована за вихідною частотою. Це свідчить про те, що коефіцієнт потужності K_M , без врахування кута комутації вентилів, залежить переважно від індуктивності фільтра L_0 та індуктивності живлячої мережі L_s . Так як імітаційне моделювання виконується для окремої ланки цехової мережі, а коефіцієнт потужності ланки цехової мережі буде визначатися коефіцієнтом потужності K_M перетворювача, то для врахування перетікання реактивної потужності між струмоприймачами мережі цеху до джерела напруги додається індуктивність живлячої мережі L_s для регулювання коефіцієнта потужності мережі в межах $\cos \varphi_1 = 0,5 \div 1$.

Враховуючи те, що системи цехового електропостачання мають різну будову, конструкцію та конфігурацію, яка визначається специфікою та особливос-

тями технологічних процесів, дослідження електромагнітних процесів в трелеях шинопровода проводились на прикладі роботи механізму переміщення існуючого мостового крана 32т механічного цеху ТОВ «ЗЛМЗ» (ТОВ «Запорізький ливарно-механічний завод»), що входить до гірничо-металургійної групи ТОВ «Метінвест Холдинг». За наданими даними ТОВ «ЗЛМЗ» у механічному цеху розташовано два однакових мостових крана, які працюють незалежно один від одного. Мостові крани мають єдину струмопровідну систему живлення, що виконана з тролейного трифазного шинопровода, та містить 12 секцій. Довжина 10-ти тролейних секцій складає 12м, а 11-та та 12-та секції є ремонтні, довжина яких складає 2м. Загальна протяжність прольоту складає 120м. Тролей шинопровода виконані зі сталевого куткового профілю 75x75x10мм. Всі секції, окрім ремонтної, з'єднані послідовно та мають єдину точку живлення. Мостовий кран має чотири мотор-редуктори з двигунами типу серії МТН-312-6 потужністю 15кВт (ПВ-40) з релейно-контакторною системою регулювання частоти обертання ротора.

На основі даних імітаційного моделювання отримано сімейство залежностей середнього значення втрати напруги між фазами А, В, С (рис. 2, а) та активних втрат (рис. 2, б) в залежності від відстані розташування мостового крана до точки живлення тролейного шинопровода при релейно-контакторній системі регулювання електропривода мостового крану (при дії основної гармоніки струму) для моментів опору АД $M_c = 0,3M_n$, $M_c = 0,7M_n$ та $M_c = M_n$.

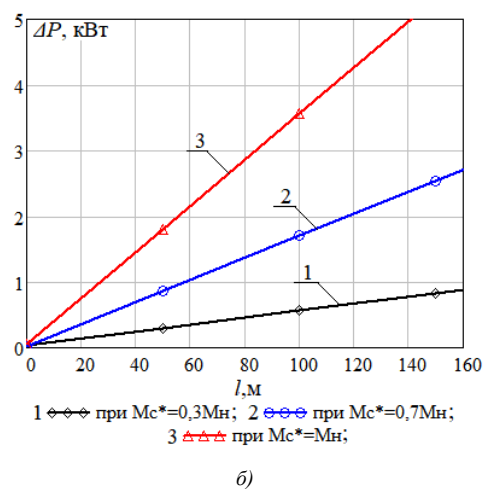
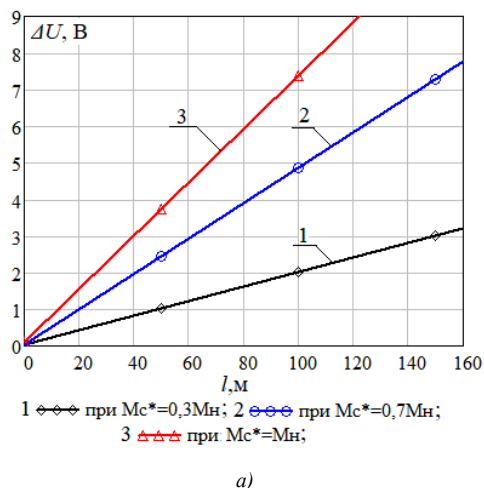
Як показує аналіз, при збільшенні відстані розташування мостового крана до точки живлення тролейного шинопровода падіння напруги та активних втрат в тролейному шинопроводі зростають за лінійним законом. При переміщенні крана до кінця прольоту (120м) падіння напруги на основній гармоніці струму буде складати $\Delta U = 2,5\text{В}$ при $M_c = 0,3M_n$;

$\Delta U = 5,85\text{В}$ при $M_c = 0,7M_n$ та $\Delta U = 8,85\text{В}$ при

$M_c = M_n$. При цьому, падіння напруги при різних значеннях навантаження не повинно досягати припустимого значення для кранового обладнання $\Delta U\% - 5\%$. Не симетрія за ефективним значенням фазної напруги не перевищує 3,2%. При переміщенні крана до кінця прольоту активні втрати в трелеях шинопровода на основній гармоніці струму будуть складати

$\Delta P = 0,78\text{кВт}$ при $M_c = 0,3M_n$; $\Delta P = 2,05\text{кВт}$ при

$M_c = 0,7M_n$ та $\Delta P = 4,2\text{кВт}$ при $M_c = M_n$.



а) падіння напруги; б) активні втрати.

Рисунок 2. Залежності падіння напруги та активних втрат в тролейному шинопроводі в залежності від відстані мостового крана до точки живлення при основній гармоніці струму

На основі даних імітаційного моделювання отримані коефіцієнти змінних складових падіння напруги та активних втрат в трелеях шинопровода від ударного струму в перехідному режимі роботи асинхронних двигунів привода механізму переміщення мостового крана при їх прямому пуску з навантаженням, в залежності від відстані l положення мостового крана до точки живлення тролейного шинопровода (табл. 1). Коефіцієнт змінної складової падіння напруги представляє собою відношення значення падіння напруги в момент пуску до значення падіння напруги в трелеях шинопровода в усталеному режимі роботи привода механізму переміщення мостового крана:

$$K_{3M}^U \Big|_l = \frac{\Delta U_{max}^{3M}}{\Delta U_{cm}^l}, \quad (3)$$

де ΔU_{max}^{3M} - максимальне значення падіння напруги в троліях шинопровода в момент пуску АД при дії ударного струму; $\Delta U_{cm}^U|_l$ - значення падіння напруги в усталеному режимі роботи при відповідному значенні l .

Коефіцієнт змінної складової активних втрат:

$$K_{3M}^P|_l = \frac{\Delta P_{max}^{3M}}{\Delta P_{cm}^U|_l}, \quad (4)$$

де ΔP_{max}^{3M} - максимальне значення активних втрат в троліях шинопровода в момент пуску АД при дії ударного струму; $\Delta P_{cm}^U|_l$ - значення активних втрат в усталеному режимі роботи при відповідному значенні l .

Таблиця 1. Коефіцієнти змінних складових втрат напруги та активних втрат в тролієвому шинопроводі при прямому пуску АД

Відстань положення мостового крана l , м	Час розгону АД (час перехідного процесу), сек	K_{3M}^U , в.о.	K_{3M}^P , в.о.
при $M_c = 0,7M_n$			
2	0,73	4,5	4,62
50	0,98	4,32	4,47
100	1,2	4,18	3,8
150	2,0	4,1	3,04
200	2,3	3,6	2,76
при $M_c = M_n$			
2	1,3	3,05	24
50	1,85	2,82	21
100	2,8	2,67	18
150	3,3	2,56	15,7
200	4,2	2,39	13,25

Як показує аналіз, при $l=2$ м, що відповідає положенню мостового крана на початку прольоту, змінні складові втрат напруги та активні втрати в троліях шинопровода будуть мати найбільші значення, що викликано ударною складовою пускового струму АД. При збільшенні l , за рахунок зростання активного опору тролієвого шинопровода, коефіцієнти K_{3M}^U та K_{3M}^P будуть зменшуватись, а час перехідного процесу, тобто час розгону АД буде зростати. При більшо-

му значенні навантаження АД час перехідного процесу та коефіцієнт K_{3M}^P будуть зростати, що також пов'язано зі зростанням ударного струму. При цьому, коефіцієнт K_{3M}^U при зростанні навантаження АД буде зменшуватись, що пов'язано зі зростанням значення втрат напруги ΔU_{cm}^U при усталеному режимі роботи. Так як ударна складова струму пропорційно змінюється в залежності від кількості ступенів регулювання частоти обертання ротора АД релейно-контакторної системи [193], то відповідно до цього, в залежності від кількості ступенів та величини опору резисторів релейно-контакторної системи, коефіцієнти K_{3M}^U , K_{3M}^P теж змінюються пропорційно.

На основі результатів імітаційного моделювання встановлено, що при збільшенні l напруга, що підводиться до статорної обмотки, зменшується на величину втрат напруги в троліях шинопровода. При цьому, активна потужність, що споживається АД, не залежно від відстані розташування мостового крана l не змінюється, та визначається робочою характеристикою $\xi = f(P_2)$ при відповідному значенні механічної потужності P_2 АД. Тому, для підтримання активної потужності P_1 , що споживається АД, має місце зростання струму навантаження. Таким чином, для $M_c = 0,7M_n$ струм в троліях шинопровода при зміні $l=2\div 200$ м за дійсним свої значенням збільшується від 96,3А до 101,5А; для $M_c = M_n$ від 133А до 145,5А. Збільшення струму, який за значенням вище свого розрахункового рівня, призводить до додаткового падіння напруги та збільшенню активних втрат в троліях шинопровода і до струмового перевантаження АД, отже до його перегрівання та скорочення строку його експлуатації. Окрім цього, має місце зменшення перевантажувальної здібності АД як для механізму переміщення крана, так і для підйомного механізму та механізму переміщення візка. Це супроводжується зменшенням максимального моменту, отже пускового моменту АД (рис. 3).

При $\Delta U=55$ В значення максимального моменту досягає моменту навантаження $M_c = M_n$ АД, що може призвести до його "прокинення". Криву залежності $M_{max}^* = f(\Delta U)$ можна розбити на дві ділянки. Перша ділянка представляє прямолінійну залежність в діапазоні зміни $\Delta U=(0\div 18)$ В, друга ділянка – експоненційну залежність в діапазоні зміни $\Delta U=(18\div 80)$ В. Прямолінійній ділянці залежності $M_{max}^* = f(\Delta U)$ відповідає прямолінійне прирощення

струму навантаження відносно прирощення падіння напруги ($\Delta U = 0 \div 18\text{В}$). Нелінійній ділянці, коли $\Delta U \geq 18\text{В}$, відповідає нелінійне прирощення струму навантаження відносно прирощення падіння напруги в трелеях шинопровода. Це викликано тим, що при $\Delta U \geq 18\text{В}$ для підтримання активної потужності P_1 , що споживається АД, стрімко зростає струм навантаження, що в свою чергу призводить до ще більшого падіння напруги та зростання активних втрат в трелеях шинопровода.

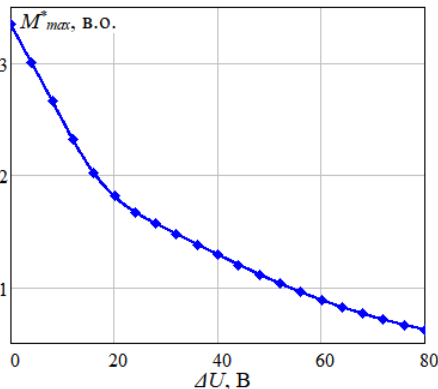


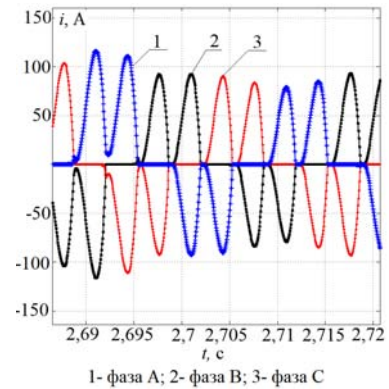
Рисунок 3. Залежність максимального моменту АД типу МТН-312-6 потужністю 15кВт від падіння напруги в трелеях шинопровода

Таким чином, враховуючи вище наведене, для недопущення аварійного режиму роботи електроприводу крана, особливо для способів регулювання швидкості обертання роторів АД, для яких перехідний режим їх роботи супроводжується ударними складовими струму та напруги, при проектуванні нових та експлуатації існуючих систем живлення мостових кранів необхідно проводити попередній розрахунок втрат напруги та активних втрат в їх елементах не тільки в усталеному, а також і у перехідних режимах роботи електроприводів різних механізмів мостового крану.

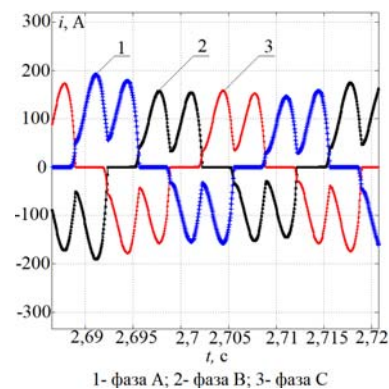
За допомогою імітаційного моделювання проведено дослідження втрат напруги та активних втрат при роботі АД з ПЧ механізму переміщення мостового крану. На рис. 4 наведені осцилограми фазних струмів в трелеях шинопровода при роботі електроприводу з ПЧ механізму переміщення мостового крану для моментів опору $M_c = 0,3M_n$, $M_c = 0,7M_n$ та

$M_c = M_n$ АД типу МТН-312-6 потужністю 15кВт (ПВ-40). Гармонійний склад фазних струмів для різних значень навантаження наведено на рис. 5. При збільшенні навантаження коефіцієнт гармонійних спотворень зменшується. При цьому, переважними складовими вищих гармонік струму є гармоніки 5, 7, 11 та 13, але з [13] відомо, що, на параметри трелеїв шинопровода не впливає амплітуда вищих складових струму, а впливає тільки їх частота, що обумовлено

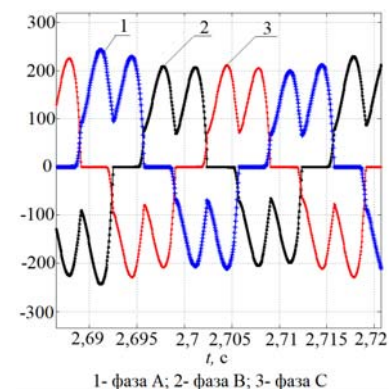
впливом скін-ефекту та поверхневим ефектом. Хоча амплітуди вищих гармонік струму $I_k/I_1 \leq 5\%$ в більшій мірі не впливають на результуюче значення струму, але при визначенні параметрів трелеїв шинопровода потрібно враховувати всі існуючі складові гармоніки струму.



а)



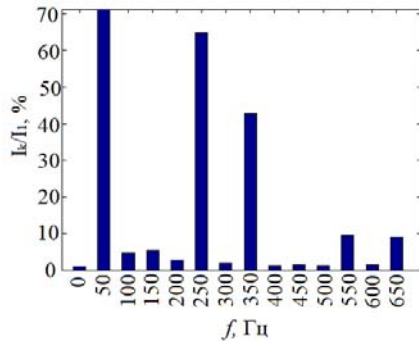
б)



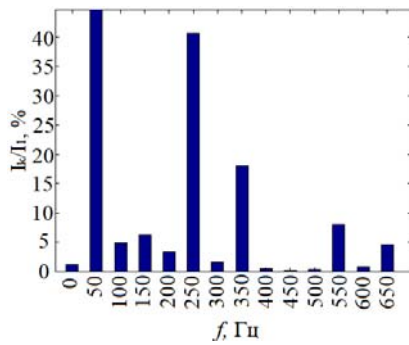
в)

а) при $M_c = 0,3M_n$; б) при $M_c = 0,7M_n$; в) при $M_c = M_n$.

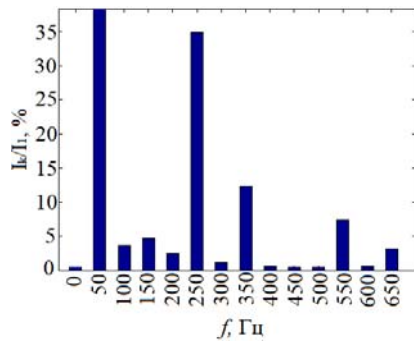
Рисунок 4. Осцилограми фазних струмів в трелеях шинопровода при різних значеннях навантаження електроприводу механізму переміщення мостового крана



а)



б)



в)

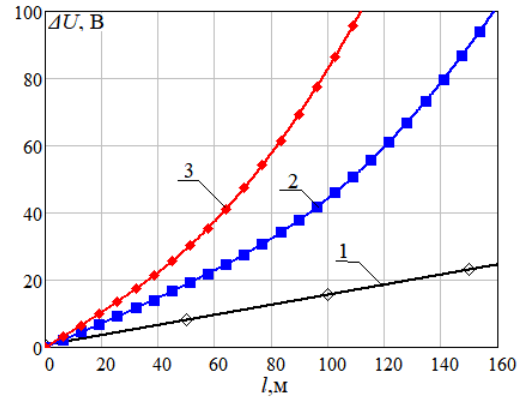
а) при $M_c = 0,3M_n$ ($THD_I=79,6\%$); б) при $M_c = 0,7M_n$

($THD_I=46,59\%$); в) при $M_c = M_n$ ($THD_I=38,71\%$).

Рисунок 5. Гармонійний склад фазних струмів в троліях шинопровода в при різних значеннях навантаження електропривода механізму переміщення мостового крана

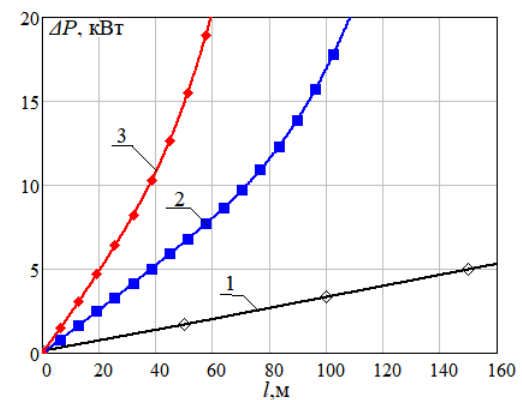
На основі даних імітаційного моделювання отримано сімейство залежностей середнього значення втрат напруги між фазами А, В, С (рис. 6, а) та активних втрат (рис. 6, б) від відстані розташування мостового крана до точки живлення тролієвого шинопровода при частотному регулюванні електропривода мостового крана для моментів опору $M_c = 0,3M_n$,

$M_c = 0,7M_n$ та $M_c = M_n$. Як показує аналіз, при



1 $\diamond\diamond$ при $M_c^*=0,3M_n$; 2 $\blacksquare\blacksquare$ при $M_c^*=0,7M_n$;
3 $\blacklozenge\blacklozenge$ при $M_c^*=M_n$;

а)



1 $\diamond\diamond$ при $M_c^*=0,3M_n$; 2 $\blacksquare\blacksquare$ при $M_c^*=0,7M_n$;
3 $\blacklozenge\blacklozenge$ при $M_c^*=M_n$;

б)

а) падіння напруги; б) активні втрати.

Рисунок 6. Залежності падіння напруги та активних втрат в тролієвому шинопроводі від відстані мостового крана до точки живлення при частотному регулюванні

збільшенні відстані l мостового крана до точки живлення тролієвого шинопровода, падіння напруги та активні втрати в тролієвому шинопроводі з врахуванням вищих гармонік струму при частотному регулюванні, як і при релейно-контакторному регулюванні АД (при врахуванні основної гармоніки струму) при $M_c = 0,3M_n$ зростають за лінійним законом. Для

моментів навантаження $M_c = 0,7M_n$ та $M_c = M_n$ залежність падіння напруги та активних втрат від відстані l у діапазоні $l=(0\div 18)$ м буде мати лінійну ділянку, як і залежність максимального моменту АД від падіння напруги в троліях шинопровода

$M_{max}^* = f(\Delta U)$ (рис. 3). При $l > 18$ м падіння напруги та активні втрати в троліях шинопровода будуть змінюватись за нелінійним законом, що викликано поперше, збільшенням активного опору тролієв при дії

вищих гармонік струму відносно власного значення при основній гармоніці струму в 4,074 раз, та повного реактивного опору в 8,3 раз; по-друге збільшенням струмового навантаження від 94,6А до 139,5А при $M_c = 0,7M_n$ та (133÷192)А при $M_c = M_n$ для підтримання споживання АД активної потужності внаслідок зменшення вхідної напруги електроприводу. При переміщенні мостового крана на відстань $l=130\text{м}$ при $M_c = 0,7M_n$ та на $l=75\text{м}$ при $M_c = M_n$ згідно рис.3 настане аварійний режим роботи електроприводу, що викликано умовою $M_{max} < M_n$, при цьому, значення активних втрат в троліях шинопровода буде значно перевищувати $\Delta P \gg 20\text{кВт}$, що призведе до значного перегріву тролієв шинопровода та аварійного стану всієї цехової мережі. Для забезпечення нормальної роботи мостового крана та живлення систем електроприводу при застосуванні систем електроприводу механізмів мостового крана з частотним регулюванням необхідно збільшити кількість точок підживлення тролієв шинопровода.

Для визначення кількості точок підживлення та відстані між підживлюючими тролійними компенсаторами необхідно, щоб значення втрат напруги, при врахуванні дії вищих гармонік струму, не перевищувало значення втрат напруги при дії основної гармоніки струму на максимальній відстані переміщення мостового крана. При цьому, необхідно щоб виконувалась умова $\Delta U\% \leq 5\%$. Таким чином, використовуючи залежності (рис. 2 та рис. 6) при навантаженні

$M_c = M_n$ оптимальна відстань між тролійними компенсаторами повинна складати не більше $l \leq 16,2\text{м}$. При цьому, $\Delta U_{рез} = 8,5\text{В}$ (при основній гармоніці струму для максимальної робочій відстані роботи мостового крана $l=120\text{м}$ $\Delta U_l = 8,8\text{В}$). Кількість точок підживлення тролієвого шинопровода повинно бути $n \geq 8$. Як було зазначено вище, довжина секції тролієв в механічному цеху складає 12м, тому до кожної секції необхідно підводити тролієвий компенсатор для компенсації втрат напруги. При цьому, результуюче значення падіння напруги буде дорівнювати $\Delta U_{рез} = 5,5\text{В}$, а результуюче значення активних втрат при дії вищих гармонік струму $\Delta P_{рез} = 2,7\text{кВт}$, що на 35,7% менше ніж значення активних втрат в троліях шинопровода при дії основної гармоніки струму на максимальній відстані роботи мостового крана (при $l=120\text{м}$ $\Delta P_l = 4,2\text{кВт}$).

На основі проведеного дослідження щодо впливу вищих гармонік струму, які виникають при роботі нелінійних навантажень (напівпровідникові перетворювачі), на параметри, а також на падіння напруги і активні втрати в троліях шинопровода необхідно:

- до модернізації електроприводів механізмів мостового крана з релейно-контакторним регулюванням на частотно-регульований електропривод (або інших на базі напівпровідникових пристроїв) враховувати дані виробника щодо магнітної сумісності перетворювача з мережею електропостачання, та визначити з високою точністю зміну параметрів тролієв шинопровода, а також проводити оцінку втрат напруги та активних втрат в залежності від особливості роботи мостового крана, будови та конфігурації системи тролієвого струмопровода;

- в залежності від отриманих попередніх розрахунків параметрів, падіння напруги та активних втрат в троліях шинопровода, згідно допустимих значень падіння напруги для кранового обладнання ($\Delta U\% \leq 5\%$) та граничного значення активних втрат, при яких задовольняється умова нагріву тролієв шинопровода, визначити граничну довжину секції або групи секцій тролієв, та кількість точок їх підживлення;

- при відсутності можливості зміни конфігурації системи підживлення секцій тролієв шинопровода, необхідно провести розрахунок обмеження встановленої потужності механізмів мостового крана, та граничної довжини переміщення мостового крана від точки підживлення;

- для обмеження впливу вищих гармонік струму застосовувати 12-ти та 18-ти пульсні випрямлячі для ПЧ, що дозволить виключити 5-ту та 7-му гармоніки (12-ти пульсний випрямляч) та 11-ту та 13-ту гармоніки (18-ти пульсний випрямляч) струму.

- для системи керування ПЧ передбачити її захист від падіння напруги нижче допустимого значення, так як живлення контролеру ПЧ відбувається від кола постійного струму;

Для підвищення ефективності роботи електроприводів мостового крана, розроблені рекомендації дозволять зменшити втрати напруги та активні втрати в троліях шинопровода від дії вищих гармонік струму навантаження до рівня втрат напруги та активних втрат при основній гармоніці струму.

V. ВИСНОВКИ

Розроблена імітаційна модель взаємопов'язаних електромагнітних процесів між електроприводами механізму переміщення мостового крана (з релейно-контакторною системою та ПЧ) та струмопровідними елементами системи електропостачання мостового крана, яка дозволяє використовувати інтегровані параметри тролієв шинопровода за даними польового розрахунку з врахуванням скін-ефекту, ефекту близькості, поверхневих та інших крайових ефектів, а також форми та розташування шин (тролієв) в шинопроводі, відстаней між ними і кількістю фаз шинопровода, в залежності від особливості режимів роботи електроприводу та відстані розташування мостового крана до точки живлення секцій тролієв шинопрово-

да.

Проведено дослідження взаємопов'язаних електромагнітних процесів між електроприводами механізму переміщення мостового крану та тролєями шинопровода. Встановлені закономірності втрат напруги в тролєях шинопровода від моменту асинхронного електроприводу, що дозволяють, як при основній так і при вищих гармоніках струму, визначити максимальну допустиму відстань переміщення мостового крану до точки підживлення секції тролєїв шинопровода, при якій забезпечується безаварійна робота електроприводу мостового крану, а також визначити кількість точок підживлення секцій тролєїв шинопровода та відстані між ними, що забезпечить однаковий рівень втрат напруги та активних втрат в тролєях шинопровода при основній гармоніці і з врахуванням вищих гармонік струму навантаження.

На основі теоретичного дослідження розроблені рекомендації щодо зменшення втрат напруги та активних втрат в тролєях шинопровода від дії вищих гармонік струму навантаження до рівня втрат напруги та активних втрат при основній гармоніці струму.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Zare , F. Reduced layer planar busbar for voltage source inverters [Text] / F. Zare, G. F. Ledwich // IEEE Trans. Power Electron. – 2002. – Vol. 17. – №. 4. – pp. 508–516.
- [2] Gaoyu, Z. Study on DC busbar structure considering stray inductance for the back-to-back IGBT-based converter [Text] / Z. Gaoyu, Z. Zhengming, Y. Liqiang // IEEE:Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC): Intern. Scient. and Tech. Conf., 15-17 July 2013: report theses. Long Beach, CA, USA. - pp. 1213- 1218. DOI:10.1109/APEC.2013.6520453
- [3] Kotsur, M. Speed Synchronization Methods of the Energy-Efficient Electric Drive System for Induction Motors [Text] / M. Kotsur, D. Yarymbash, I. Kotsur, Yu. Bezverkhnia // IEEE: 14-th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET 2018): Intern. Scient. and Tech. Conf., 20-23 February 2018: report theses. - Lviv-Slavske, Ukraine. - pp. 304-307. DOI:10.1109/TCSET.2018.8336208
- [4] Kotsur, M.I. Converter for frequency-current slip-power recovery scheme [Text] / M.I. Kotsur, P.D. Andrienko, I. M. Kotsur, O.V Bliznyakov // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu – 2017. - №4 – P. 49-54
- [5] Bedkowski, M. Coupled numerical modelling of power loss generation in busbar system of low-voltage switchgear [Text] / M. Bedkowski, J. Smolka, K. Banasiak, Z. Bulinski, A. J. Nowak, T. Tomanek, A. Wajda // Int. J. Thermal Sci. – 2014. – vol. 82. – pp. 122–129.
- [6] Plesca, A. Busbar heating during transient conditions [Text] / A. Plesca // Electric Power Syst. Res. – 2012. – № 89. – pp. 31–37. DOI: 10.1109/T-AIEE.1915.4765211
- [7] Федоров А.А. Справочник энергетика промышленных предприятий Т. 1. Электроснабжение. [Текст] / Под общей ред. Федорова А. А. - М.-Л.: Госэнергоиздат, 1987. - 840 С.
- [8] Рапутов, Б. М. Электрооборудование кранов металлургических предприятий [Текст] / Б. М. Рапутов. - М.: Металлургия, 1990 - 272 с.
- [9] Rosskopf, A. Influence of inner skin- and proximity effects on conduction in litz wires [Text] / A. Rosskopf, E. Bar, C. Joffe // IEEE Trans. Power Electron. – 2014. – № 29(10). – pp. 5454–5461, DOI: 10.1109/TPEL.2013.2293847
- [10] МЭК (61000-3-12:2004) Совместимость технических средств электромагнитная. Ограничение гармонических составляющих тока, создаваемых техническими средствами с потребляемым током более 16 А, но не более 75 А (в одной фазе), подключаемыми к низковольтным системам электроснабжения общего назначения. Нормы и методы испытаний.
- [11] IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems [Text] / IEEE standard 519-1992, London. - 1992.
- [12] Popa, I. Numerical modeling of DC busbar contacts [Text] / I. Popa, A.I. Dolan // IEEE: 13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM 2012): Intern. Scient. and Tech. Conf., 15-17 September 2012: report theses. Long Beach, CA, USA. - pp. 188- 193 DOI: 10.1109/OPTIM.2012.6231869
- [13] Безверхня, Ю.С. Аналіз параметрів шинопроводів цехових мереж в умовах дії вищих гармонік струму [Текст] / Ю. С. Безверхня, М. І. Коцур, Д.С. Яримбаш, І. М. Коцур, С.Т. Яримбаш, І.М. Килимник// Електротехніка та електроенергетика. – 2018. – № 4. – С. 51-63. – Режим доступу : DOI :10.15588/1607-6761-2018-4-5.
- [14] Безверхня, Ю. С. Підвищення ефективності визначення параметрів тролейних шинопроводів на основі польового моделювання [Текст] / Ю. С. Безверхня, М. І. Коцур, Д. С. Яримбаш, І. М. Коцур // Вісник Національного технічного університету «ХП». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – 2021. – №2 (3), С. 38-43. – Режим доступу: DOI: 10.20998/2224-0349.2021.02.05.
- [15] Kotsur, M. Determination of a busbar's parameters by electromagnetic field simulation [Text] / M.I. Kotsur, D.S. Yarymbash, Yu.S. Bezverkhnya, I.M. Kotsur // 2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP), Kremenchuk, Ukraine, 2020, pp. 1-4, doi:

10.1109/PAER49887.2020.9240811

- [16] Коцур, М.І. Особливості польового моделювання електромагнітних процесів тролейного шинопровода [Текст] / Коцур, М.І., Яримбаш, Д.С., Безверхня, Ю.С., Дівчук, Т.Є. // Електротехніка та електроенергетика. – 2021. – № 1. – С. 46-60. – Режим доступу: DOI : 10.15588/1607-6761-2021-1-5
- [17] Kotsur, M. I. New approach for voltage drop estimation in the busbars of workshop networks at higher current harmonics influence [Text] / M. I. Kotsur, D. S. Yarymbash, Yu.S. Bezverkhnya, I.M. Kotsur // Problemele energeticii regionale. – 2019. – №1(39). – P. 43-56. – Режим доступу: DOI: 10.5281/zenodo.2650419
- [18] Kotsur, M. I. Accuracy Improvement for the Determination of Parameters and Voltage Drops in Busbars, Considering the Networks Power Factor [Text] / M. I. Kotsur, D. S. Yarymbash, Yu.S. Bezverkhnya, I.M. Kotsur // Problemele energeticii regionale. – 2021. – №3(51). – P. 37-52. – Режим доступу: DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2021.3-51.04>.
- [19] Kotsur, M. I. Increasing of Thermal Reliability of a Regulated Induction Motor in Non-Standard Cycle Time Conditions [Text] / M. I. Kotsur, I.M. Kotsur, Yu. Bezverkhnia, D. Andrienko // IEEE: International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), November 15th - 17th, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Ukraine, 2017, pp. 88-91. DOI:10.1109/MEES.2017.8248960
- [20] Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин [Текст] / И.П. Копылов. – М.: Высшая школа, 2001. – 327 с.
- [21] Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MatLab, SimPowerSystems и Simulink [Текст] / И. В. Черных. – М.: ДМК Пресс; СПб. Питер, 2008. – 288 с.
- [22] Герман-Галкин, С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: учеб. пособие / С. Г. Герман-Галкин; –СПб.: Крона принт, 2001. – 320 с.

Стаття надійшла до редакції 31.05.2022

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ МЕХАНИЗМА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ МОСТОВОГО КРАНА ПРИ ПИТАНИИ ОТ ТРОЛЛЕЙНОГО ШИНОПРОВОДА В УСЛОВИЯХ ДЕЙСТВИЯ ВЫСШИХ ГАРМОНИК ТОКА

КОЦУР М.И.	канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электрических и электронных аппаратов НУ «Запорожская политехника», Запорожье, Украина, e-mail: kotsur8@gmail.com
БЕЗВЕРХНЯЯ Ю.С.	д-р философии (канд. техн. наук), ст. преп. кафедры электрических машин НУ «Запорожская политехника», Запорожье, Украина, e-mail: juliakafedraem@gmail.com
ЯРЫМБАШ Д.С.	д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой электрических машин НУ «Запорожская политехника», Запорожье, Украина, e-mail: yarymbash@gmail.com;
КОЦУР И.М.	канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электрических машин НУ «Запорожская политехника», Запорожье, Украина, e-mail: igor.m.kotsur@gmail.com

Цель работы. Анализ и исследование взаимосвязанных электромагнитных процессов между электроприводами механизма перемещения мостового крана и троллеями шинопровода в условиях действия высших гармоник тока, с учетом конструктивных особенностей, нелинейности магнитных и электрофизических свойств материалов, эффектов близости, поверхностных и внешних поверхностных эффектов.

Методы исследования. Исследования проводились с применением методов теории электромагнитного поля, теории электрических цепей, математической физики, решения системы дифференциальных уравнений первого рода, интерполяции, аппроксимации и регрессионного анализа.

Полученные результаты. Разработана имитационная модель взаимосвязанных электромагнитных процессов между электроприводами механизма перемещения мостового крана (с релейно-контакторной системой и преобразователем частоты) и токопроводящими элементами системы электроснабжения мостового крана. Проведены исследования взаимосвязанных электромагнитных процессов между электроприводами механизма перемещения мостового крана и троллеями шинопровода. Установлены закономерности потерь напряжения в троллеях шинопровода от момента асинхронного электропривода, позволяющие, как при основной, так и при высших гармониках тока, определить максимальное допустимое расстояние перемещения мостового крана до точки подпитки секции троллея шинопровода, при которой обеспечивается безаварийная работа, а также определить количество точек подпитки секций троллея шинопровода и расстояния между ними, что обеспечит одинаковый уровень потерь напряжения и активных потерь в троллеях шинопровода при основной гармонике, и с учетом высших гармоник тока нагрузки.

Научная новизна. Разработана имитационная модель взаимосвязанных электромагнитных процессов между электроприводами механизма перемещения мостового крана и токопроводящими элементами системы электроснабжения мостового крана, которая позволяет использовать интегрированные параметры троллеев шинопровода по данным полевого расчета с учетом скин-эффекта, эффекта близости, поверхностных и других эффектов, а также формы и расположения шин (троллеев) в шинопроводе, расстояний между ними и количеством фаз шинопровода, в зависимости от особенности режимов работы электропривода и расстояния расположения мостового крана до точки питания секций троллеев шинопровода.

Практическая ценность. На основе теоретического исследования разработаны рекомендации по уменьшению потерь напряжения и активных потерь в троллеях шинопровода от действия высших гармоник тока нагрузки до уровня потерь напряжения и активных потерь при основной гармонике тока.

Ключевые слова: троллей, шинопровод, потери напряжения, активные потери, модель, мостовой кран, гармоники.

PECULIARITIES OF OVERHEAD CRANE MOVEMENT MECHANISM OPERATION WHEN POWERED BY A BUSBAR'S TROLLEY AT ACTION OF HIGHER CURRENT HARMONICS

KOTSUR M.I.

Ph. D, Associate professor, Associate professor of the electrical and electronic apparatuses department of the Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: kotsur8@gmail.com;

BEZVERKHNIA Yu.S.

Ph. D, Senior lector electrical machine department of the Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: juliakafedraem@gmail.com;

YARYMBASH D.S.

Sci. D, head of electrical machine department of the Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: yarymbash@gmail.com

KOTSUR I.M.

Ph. D, Associate professor, Associate professor of the electrical machine department of the Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: igor.m.kotsur@gmail.com;

Purpose. Analysis and research of interconnected electromagnetic processes between electric drives of overhead crane moving mechanism and trolleys under conditions of higher current harmonics, taking into account design features, nonlinearity of magnetic and electrophysical properties of materials, proximity effects, surface and external surface effects.

Methodology. The research was carried out using methods of electromagnetic field theory, electrical circuit theory, mathematical physics, solving a system of first order differential equations, interpolation, approximation and regression analysis.

Findings. A simulating model of interrelated electromagnetic processes between electric drives of an overhead crane mechanism and current-conducting elements of the power supply system of an overhead crane has been developed. Investigations of electromagnetic processes between the electric drives of the overhead crane mechanisms and the trolleys have been carried out. The laws of voltage losses in the busbar's trolleys from the torque of the asynchronous electric drive have been established. This allowed to determine the maximum permissible distance of overhead crane movement to the feeding point of the busbar's trolley section, at which trouble-free operation is ensured as well as to determine the number of feeding points of the busbar's trolley sections and the distance between them. This will ensure the same level of voltage losses and active losses in the trolleys at the fundamental harmonic, and taking into account the higher harmonics of the load current.

Originality. A simulating model of interrelated electromagnetic processes between electric drives of an overhead crane mechanism and current-conducting elements of the power supply system of an overhead crane has been developed. which allows to use integrated parameters of busbar trolleys according to field calculation taking into account skin effect, the shape and location of tires (trolleys) in the busbar, the distances between them and the number of phases of the busbar, depending on the peculiarities of the modes of operation of the electric drive and the distance of the bridge crane to the power point of busbar trolley sections

Practical value. Based on the theoretical research, recommendations to reduce voltage losses and active losses in the trolley from the action of higher harmonic loads to the level of voltage losses and active losses at the fundamental harmonic current have been developed.

Keywords: trolley, busbar, voltage losses, active losses, model, overhead crane, harmonics

REFERENCES

- [1] Zare F., Ledwich G. F. (2002). Reduced layer planar busbar for voltage source inverters. *IEEE Trans. Power Electron.*, 17, 4, 508–516 (in English).
- [2] Gaoyu, Z., Zhengming, Z., Liqiang, Y. (2013). Study on DC busbar structure considering stray inductance for the back-to-back IGBT-based converter. *IEEE: Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Long Beach, CA, USA, 1213-1218. DOI: 10.1109/APEC.2013.6520453 (in English).
- [3] Kotsur, M., Yarymbash, D., Kotsur, I., Bezverkhnia Yu. (2018). Speed Synchronization Methods of the Energy-Efficient Electric Drive System for Induction Motors. *IEEE: 14-th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET 2018)*, Lviv-Slavske, Ukraine, 304-307 DOI:10.1109/TCSET.2018.8336208 (in English).
- [4] Kotsur M.I., Andrienko P.D., Kotsur I. M., Bliznyakov O.V. (2017). Converter for frequency-current slip-power recovery scheme. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 4, 49-54.
- [5] Bedkowski, M., Smolka, J., Banasiak, K., Bulinski, Z., Nowak, A. J., Tomanek, T., Wajda, A. (2014). Coupled numerical modelling of power loss generation in busbar system of low-voltage switchgear. *Int. J. Thermal Sci.*, 82, 122–129 (in English).
- [6] Plesca, A. (2012). Busbar heating during transient conditions. *Electric Power Syst. Res.*, 89, 31–37. DOI: 10.1109/T-AIEE.1915.4765211 (in English).
- [7] Fedorov, A.A. (1987). Reference book power engineering of industrial enterprises T. 1. Power supply. Under the general ed. Fedorov A.A. M.: Gosenergoizdat, 840. (in Russian).
- [8] Raputov, B. M. (1990). Electrical equipment for cranes of metallurgical enterprises, Metallurgy, Moscow, 272.
- [9] Roskopf, A., Bar, E., Joffe, C. (2014). Influence of linner skin- and proximity effects on conduction in litz wires. *IEEE Trans. Power Electron.*, 29, 10, 5454–5461, DOI: 10.1109/TPEL.2013.2293847 (in English).
- [10] IEC (61000-3-12: 2004) *Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Ogranichenie garmonicheskikh sostsvlyaiushikh toka, sozdavaemykh tekhnicheskimi sredstvami potrebyaemymy tokom bolee 16A, no ne bolee 75A (v odnoy faze), podkluchaemykh k nizkovol'nym sistemam electrosnabzheniya obshshego naznacheniya. Normy i metody ispytaniy.* (Electromagnetic compatibility of technical means. Limit of harmonic current components created by technical means with a current consumption of more than 16 A, but not more than 75 A (in one phase), connected to low-voltage general-purpose power systems. Norms and methods of testing). (in Russian).
- [11] *IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems* IEEE standard. London, 1992, 519-1992 (in English).
- [12] Popa, I., Dolan, A.I. (2013). Numerical modeling of DC busbar contacts. *IEEE: 13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM 2012)*, 188 – 193. DOI: 10.1109/OPTIM.2012.6231869 (in English).
- [13] Bezverkhnia Yu. S., Kotsur M. I., Yarymbash D.S., Kotsur I. M., Yarymbash S.T., Kilimnik I.M. (2018). Analysis of the shop networks busbars parameters at higher harmonic current actions. *Electrical engineering and power engineering*, 4, 51-63. DOI :10.15588/1607-6761-2018-4-5.
- [14] Bezverkhnia, Y. S., Kotsur, M. I., Yarymbash, D. S., & Kotsur, I. M. (2021). Increasing the efficiency of determining the parameters of trolley busbars based on field simulation. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Energy: Reliability and Energy Efficiency*, 2 (3), 38–43. <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2021.02.05>
- [15] Kotsur M.I., Yarymbash D.S., Bezverkhnia Yu.S., Kotsur I.M. (2020). Determination of a busbar's parameters by electromagnetic field simulation, 2020 *IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*, Kremenchuk, Ukraine, 1-4, doi: 10.1109/PAEP49887.2020.9240811
- [16] Kotsur M., Yarymbash, D., Bezverkhnia, Y., & Divchuk, T. (2021). Features of field modeling of electromagnetic processes of trolley busbar. *Electrical Engineering and Power Engineering*, 1, 46–60. <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2021-1-5>
- [17] Kotsur M. I., Yarymbash D. S., Bezverkhnia Yu.S., Kotsur I.M. (2019). New approach for voltage drop estimation in the busbars of workshop networks at higher current harmonics influence. *Problemele energeticii regionale*, 1(39), 43-56. – Режим доступу: DOI: 10.5281/zenodo.2650419
- [18] Kotsur M. I., Yarymbash D. S., Bezverkhnia Yu.S., Kotsur I.M. (2021). Accuracy Improvement for the Determination of Parameters and Voltage Drops in Busbars, Considering the Networks Power Factor. *Problemele energeticii regionale*, 3(51), 37-52. DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2021.3-51.04>
- [19] Kotsur M. I., Kotsur I.M., Bezverkhnia Yu. (2017). Increasing of Thermal Reliability of a Regulated Induction Motor in Non-Standard Cycle Time Conditions. *IEEE: International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, November 15th - 17th, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Ukraine, 88-91. DOI:10.1109/MEES.2017.8248960
- [20] Kopylov I.P. (2001). *Mathematical modeling of electrical machines*, Higher School, Moscow, 327.
- [21] Chernykh, I. V. (2008). *Modeling of electrical devices in MatLab, SimPowerSystems and Simulink*, DMK Press; SPb, 288.
- [22] German-Galkin, S. G. (2001). *Computer modeling of semiconductor systems in MATLAB 6.0*, Corona print, St. Petersburg, 320.