

ПРО ВПЛИВ ЧАСТОТ ЖИВЛЕННЯ СТАТОРНИХ ОБМОТОК АСИНХРОННИХ ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ НА ДИНАМІЧНУ НАВАНТАЖЕНІСТЬ ЕЛЕМЕНТІВ ТЯГОВИХ ПРИВОДІВ ЛОКОМОТИВІВ

У статті наведено результати досліджень з визначення рівня навантаженості елементів тягового привода в декотрих умовах експлуатації, коли значення частот змінювання струмів живлення статорних обмоток розташовані в докритичній та позакритичній зонах для двох видів тягової передачі.

В статье приведены результаты исследований по определению уровня нагруженности элементов тягового привода в некоторых условиях эксплуатации, когда значения частот изменения токов питания статорных обмоток находятся как в докритической, так и в закритической зонах для двух типов тяговой передачи.

The results of studies on determination of loading level of tractive drive elements in some operating conditions, when the values of frequencies of the change of feeding currents of stator windings are to be obtained in both sub-critical and ultracritical zones for two types of the tractive gear are presented in the paper.

Дана робота присвячена проведенню досліджень з визначення рівнів динамічної навантаженості елементів двох типів тягових приводів під час: стаціонарного руху в режимі тяги; аварійних ситуаціях коротких замикань в ланцюгах живлення статорних обмоток асинхронних тягових двигунів; в умовах зриву на буксування колісних пар для випадків, коли частота змінювання струмів, що живлять статорні обмотки, буде знаходитися як в докритичній $\omega_r < \omega_{r\text{кр}}$, так і в позакритичній $\omega_r > \omega_{r\text{кр}}$ зонах.

Розглянемо спрощені співвідношення, які надають можливість визначати найбільші значення електромагнітного моменту та відповідні значення критичної частоти $\omega_{r\text{кр}}$. Якщо прийняти, що процеси в асинхронному трифазному двигуні можна вивчати за допомогою математичної двофазної машини, живлення якої забезпечується напругою з ідеальною синусоїдальною формою [1 – 3], електромагнітний момент буде визначатися за формулою:

$$T_{\text{ем}} = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_s L_r - L_m^2} \operatorname{Re}(j \cdot \bar{\psi}_s^* \cdot \bar{\psi}_r). \quad (1)$$

В цьому рівнянні: $T_{\text{ем}}$ – електромагнітний момент; p – кількість пар полюсів; L_m , L_s , L_r – параметри еквівалентної схеми заміщення АТД; $\bar{\psi}_s^*$ – комплексносполучена величина потокозчеплення статорних обмоток; $\bar{\psi}_r$ – комплексна величина потокозчеплення ротор-

них обмоток; Re – дійсна частина відповідного добутку; j – уявна одиниця. Для знаходження критичної частоти $\omega_{r\text{кр}}$ отримаємо формулу визначення електромагнітного моменту $T_{\text{ем}}$ за допомогою амплітудного значення фазного струму \bar{I}_s , кутової швидкості ротора ω_r та параметрів еквівалентної схеми заміщення АТД. При цьому значення струму роторних обмоток будемо визначати за допомогою струму статорних обмоток:

$$\bar{I}_r = - \frac{L_m}{(L_r + \frac{R_r}{j \cdot \omega_s \cdot s})} \cdot \bar{I}_s. \quad (2)$$

Потокозчеплення статорних $\bar{\psi}_s$ та роторних $\bar{\psi}_r$ обмоток будуть визначатися наступним чином:

$$\bar{\psi}_s^* = \bar{I}_s \cdot (L_s - \frac{L_r \cdot L_m^2 \cdot \omega_s^2 \cdot s^2}{R_r^2 + \omega_s^2 \cdot L_r^2 \cdot s^2} - j \cdot \frac{L_m^2 \cdot \omega_s \cdot s \cdot R_r}{R_r^2 + \omega_s^2 \cdot L_r^2 \cdot s^2});$$

$$\bar{\psi}_r = \frac{R_r \cdot L_m}{R_r^2 + \omega_s^2 \cdot L_r^2 \cdot s^2} \cdot \bar{I}_s \cdot (R_r - j \cdot \omega_s \cdot s \cdot L_r). \quad (3)$$

Після підстановки (3) в (1) та відповідних перетворень отримаємо вираз для визначення електромагнітного моменту $T_{\text{ем}}$:

$$T_{\text{ем}} = \frac{3}{2} p \cdot \frac{L_m^2 \cdot \omega_r \cdot R_r}{(R_r^2 + \omega_r^2 L_r^2)} \cdot I_{\text{см}}^2. \quad (4)$$

Похідна електромагнітного моменту T_{em} по частоті ω_r має вигляд:

$$\frac{dT_{em}}{d\omega_r} = \frac{3}{2} p \cdot L_m^2 \cdot R_r \cdot I_{sm}^2 \cdot \frac{R_r^2 - \omega_r^2 \cdot L_r^2}{(R_r^2 + \omega_r^2 \cdot L_r^2)^2} \quad (5)$$

Дорівнюючи нулю похідну $\frac{dT_{em}}{d\omega_r} = 0$, отримаємо,

що $\omega_{кр} = \frac{R_r}{L_r}$. При такому значенні $\omega_{кр}$

найбільше значення електромагнітного моменту буде визначатися за співвідношенням:

$$T_{em}^{max} = \frac{3}{4} p \cdot \frac{L_m^2}{L_r} \cdot I_{sm}^2 \quad (6)$$

За умови однаковості струмів статора і при використанні в якості джерела живлення статорних обмоток автономного інвертора струму (АІС) значення $\omega_{кр}$ та T_{em}^{max} будуть суттєво меншими порівняно з використанням інвертора напруги (АІН). Отримані вирази надають можливість визначати як початкове значення електромагнітного моменту T_{em} , так і критичної частоти $\omega_{кр}$, що використовується під час проведення чисельних розрахунків моделювання різних експлуатаційних умов в роботі тягового привода локомотива.

Під час проведення чисельних розрахунків моделювання вищезначених режимів було розглянуто локомотиви, в яких використовується як індивідуальний, так і груповий тягові

приводи з асинхронними тяговими двигунами. Вищезначені режими руху моделювалися стосовно локомотивів, які мають два двовісні візки. Було розглянуто варіанти використання: індивідуального тягового привода, в якому тяговий двигун має опорно-осьове підвішування, а тягове зусилля на колісні пари передається за допомогою двох тягових редукторів з опорно-осьовим підвішуванням; групового тягового привода з передачею тягового зусилля від тягового двигуна на дві колісні пари одного візка.

Розрахункові схеми елементів механічної частини наведено на рис. 1 – 3, а відповідні математичні моделі взаємодії цих елементів при реалізації тяги, а також математична модель, яка моделює змінювання відповідних процесів у електричній частині, приймалися саме такими, як і в роботах [3 – 5].

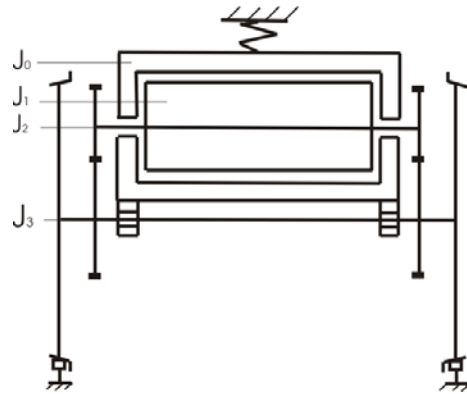


Рис. 1. Схематичне зображення основних елементів тягового привода з опорно-осьовим способом підвішування тягового двигуна (тяговий привод першого класу)

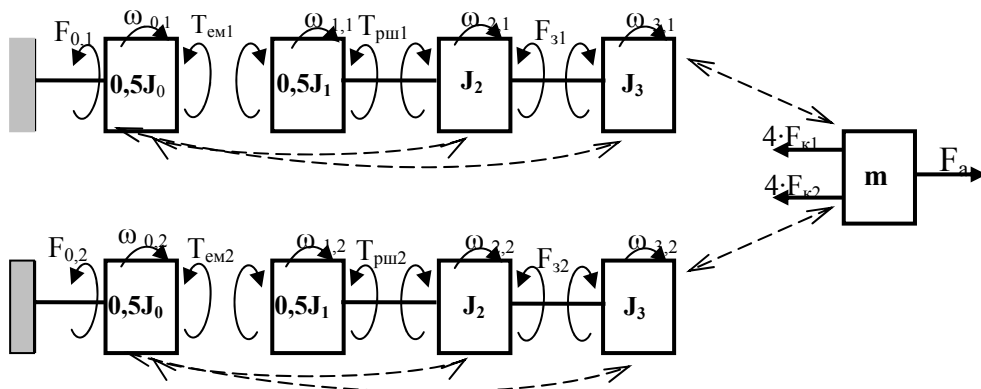


Рис. 2. Кінематична схема розташування елементів тягового привода з опорно-осьовим способом підвішування тягового двигуна (тяговий привод першого класу) для дослідження крутильних коливань

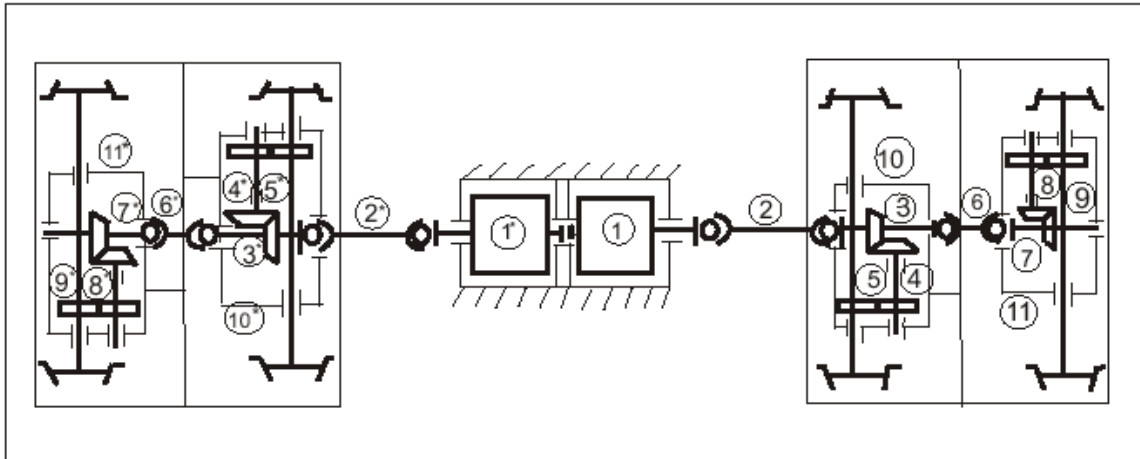


Рис. 3. Схема розташування основних елементів групового тягового привода

На цих рисунках літерами позначено наступне: J_i – моменти інерції відповідних елементів при їх обертальних коливаннях; F_a – зусилля, що створюється у поглинаючому апараті автозчепу при взаємодії локомотива зі складом вагонів поїзда; F_{ki} – поздовжні складові зусиль взаємодії коліс колісних пар з рейками; ω_i – кутові швидкості обертального руху елементів тягового привода при їх коливаннях; $T_{i,j}$ – моменти у відповідних еквівалентних зв'язках з'єднань елементів тягової передачі. Параметри математичних моделей взаємодії наведених на рис. 1 – 3 елементів приймалися такими, як і в роботах [3 – 5], а залежності зусиль від відповідних відносних деформацій та ковзань на контакті взаємодії колеса з рейкою – як в роботах [3 – 6].

Під час проведення розрахунків з визначення динамічної навантаженості приймалися швидкості руху, за яких створюються найбільші значення моментів та зусиль. Враховуючи те, що рівень динамічної навантаженості також залежить від співвідношення частоти обертання електромагнітного поля статора та частоти обертання ротора, вивчалася навантаженість при частотах, які є як меншими, так і більшими декотрих критичних значень, що відповідають створенню екстремальних величин електромагнітного моменту T_{em} .

У відповідності до розрахункових схем (рис. 1, 2) та розроблених математичних моделей [3 – 6] було отримано результати чисельних розрахунків моделювання вищезначених режимів, які можуть створюватися в умовах експлуатації. Результати цих розрахунків для ін-

дивідуального тягового привода наведено на рис. 4 – 22.

На рис. 4 наведено найбільші значення електромагнітного моменту T_{em} при двофазних та трифазних коротких замиканнях за умови, що тяговий привод індивідуальний з двосторонньою передачею тягового моменту та тягові двигуни живляться струмами з використанням імпульсної модуляції. На цьому рисунку і далі праворуч у стовпчику наведені літери означають: **2ф, 3ф** – двофазне та трифазне замикання; **нз** – значення моментів в момент часу перед коротким замиканням. Привернемо увагу також на те, що на цих рисунках виділено моменти часу, при яких створюються досить великі короточасні значення ударних електромагнітних моментів.

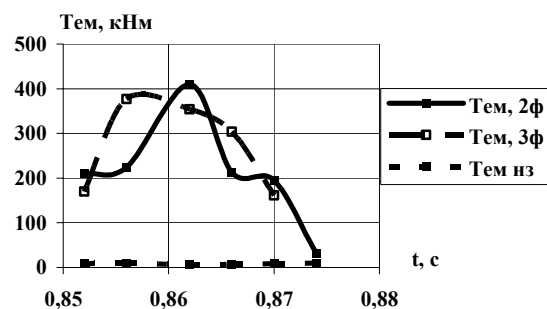


Рис. 4. Найбільші значення електромагнітного моменту T_{em} при двофазних та трифазних коротких замиканнях ($\omega_r = 1,3$ 1/с, $\omega_{кр} = 1,5$ 1/с, $v = 30$ км/год)

На рис. 5 наведено результати розрахунків у ситуації, подібній до наведеної на рис. 4, але при цьому тягові двигуни живляться струмами

з використанням широтно-імпульсної модуляції.

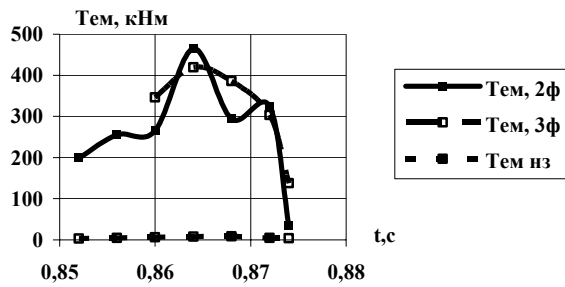


Рис. 5. Найбільші значення електромагнітного моменту $T_{ем}$ при двофазних та трифазних коротких замиканнях ($\omega_r = 1,3$ 1/с, $\omega_{кр} = 1,5$ 1/с, $v = 30$ км/год)

На рис. 6 та 7 наведено найбільші значення крутного моменту в еквівалентному з'єднанні ротор-шестерня $T_{рш}$, який створюється під час двофазних та трифазних коротких замикань при живленні струмами, що змінюються за імпульсною (рис. 6) та широтно-імпульсною модуляцією (рис. 7) відповідно. На цих рисунках і далі літери **ім** та **шім** означають, що використовується імпульсна, або широтно-імпульсна модуляція.

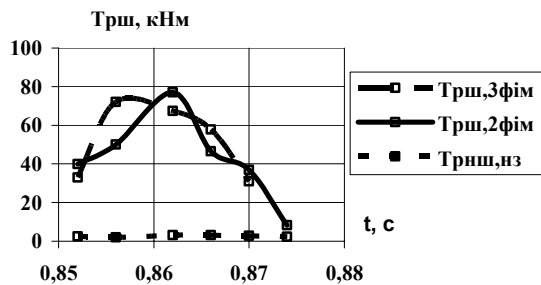


Рис. 6. Найбільші значення моменту $T_{рш}$ при двофазних та трифазних коротких замиканнях ($\omega_r = 1,3$ 1/с, $\omega_{кр} = 1,5$ 1/с, $v = 30$ км/год)

На рис. 8 та 9 наведено найбільші значення зусиль $F_{ш}$ взаємодії зубчастої передачі тягового редуктора під час двофазних та трифазних коротких замикань при живленні струмами, які змінюються за імпульсною (рис. 8) та широтно-імпульсною модуляцією (рис. 9), відповідно.

З наведених результатів маємо, що найбільші рівні динамічних значень електромагнітного моменту $T_{ем}$ досягаються при створенні двофазних коротких замикань та дорівнюють 400 та 460 кНм при використанні імпульсної та широтно-імпульсної модуляції, відповідно. Звернемо

увагу на те, що вказані величини відповідають піковим значенням, які діють протягом дуже короткого часу.

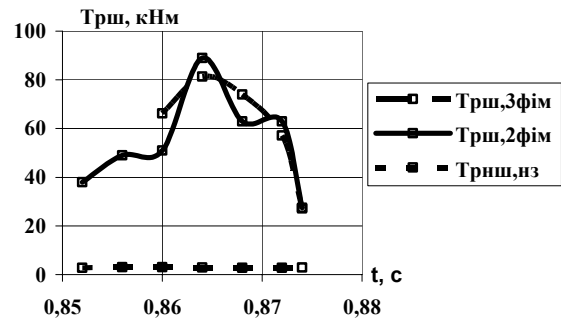


Рис. 7. Найбільші значення моменту $T_{рш}$ при двофазних та трифазних коротких замиканнях ($\omega_r = 1,3$ 1/с, $\omega_{кр} = 1,5$ 1/с, $v = 30$ км/год)

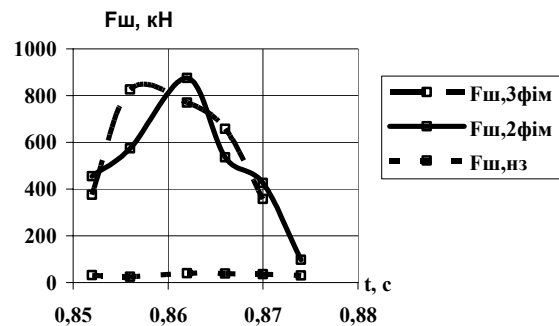


Рис. 8. Найбільші значення зусиль взаємодії $F_{ш}$ зубчастої передачі тягового редуктора при двофазних та трифазних коротких замиканнях ($\omega_r = 1,3$ 1/с, $\omega_{кр} = 1,5$ 1/с, $v = 30$ км/год)

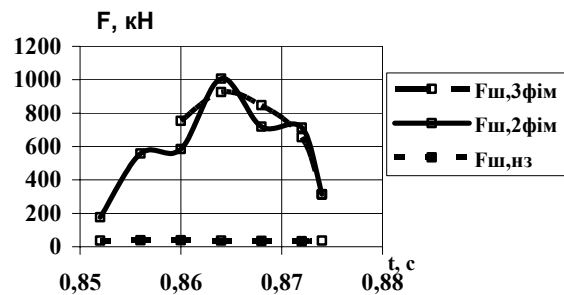


Рис. 9. Найбільші значення зусиль $F_{ш}$ взаємодії зубчастої передачі тягового редуктора при двофазних та трифазних коротких замиканнях ($\omega_r = 1,3$ 1/с, $\omega_{кр} = 1,5$ 1/с, $v = 30$ км/год)

Далі наведено результати розрахунків з моделювання режимів коротких замикань у випадках, коли частота обертання електромагнітного поля вище за величину критичної частоти обертання ротора $\omega_r > \omega_{кр}$.

На рис. 10 та 11 наведено найбільші значення електромагнітного моменту $T_{ем}$ та моменту в еквівалентному з'єднанні ротор–шестерня $T_{рш}$ при двофазних та трифазних коротких замиканнях та живленні струмами, які змінюються за імпульсною (рис. 10) та широтно-імпульсною модуляцією (рис. 11), відповідно.

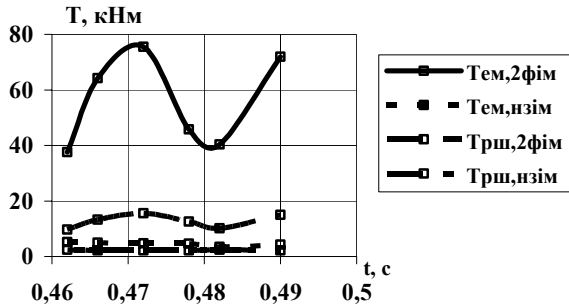


Рис. 10. Найбільші значення електромагнітного моменту $T_{ем}$ та моменту в еквівалентному з'єднанні ротор–шестерня $T_{рш}$ при двофазних коротких замиканнях ($\omega_r = 3,11$ 1/с, $\omega_{гкр} = 1,5$ 1/с, $v = 20$ км/год)

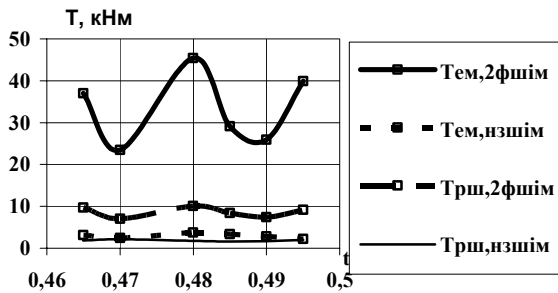


Рис. 11. Найбільші значення електромагнітного моменту $T_{ем}$ та моменту в еквівалентному з'єднанні ротор–шестерня $T_{рш}$ при двофазних коротких замиканнях ($\omega_r = 3,11$ 1/с, $\omega_{гкр} = 1,5$ 1/с, $v = 20$ км/год)

На рис. 12 та 13 наведено значення найбільших величин зусиль взаємодії зубчастої передачі тягового редуктора під час коротких замикань у випадку, коли частота $\omega_r > \omega_{гкр}$, та живленні обмоток статора струмом з використанням імпульсної (рис. 12), або широтно-імпульсної (рис. 13) модуляції, відповідно.

На рис. 14 наведено найбільші значення електромагнітного моменту $T_{ем}$ та моменту в еквівалентному з'єднанні ротор–шестерня $T_{рш}$ в залежності від швидкості руху при короткому

трифазному замиканні, $\omega_r > \omega_{гкр}$, живлення обмоток статора струмом, який змінюється за синусоїдальною формою. На цих рисунках і далі у стовпчику праворуч літери **сін** означають, що живлення статорних обмотки АТД забезпечується струмом, який змінюється за синусоїдальною формою.

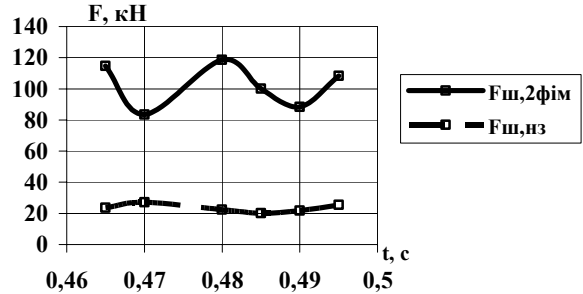


Рис. 12. Найбільші значення зусиль $F_{ш}$ взаємодії зубчастої передачі тягового редуктора при двофазних коротких замиканнях ($\omega_r = 3,11$ 1/с, $\omega_{гкр} = 1,5$ 1/с, $v = 20$ км/год)

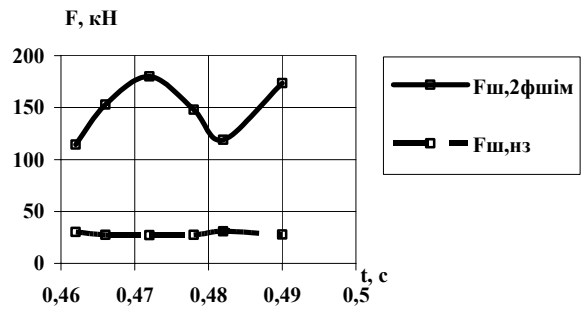


Рис. 13. Найбільші значення зусиль $F_{ш}$ взаємодії зубчастої передачі тягового редуктора при двофазних коротких замиканнях ($\omega_r = 3,11$ 1/с, $\omega_{гкр} = 1,5$ 1/с, $v = 20$ км/год)

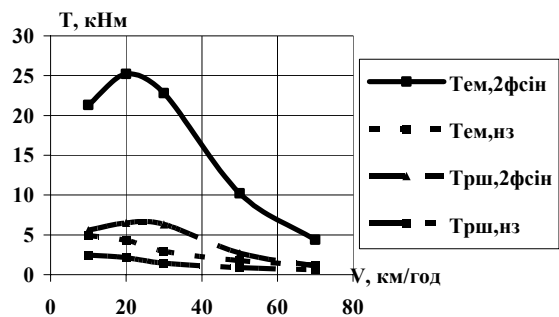


Рис. 14. Найбільші значення електромагнітного моменту $T_{ем}$ та моменту в еквівалентному з'єднанні ротор–шестерня $T_{рш}$ при короткому трифазному замиканні, $\omega_r > \omega_{гкр}$

Порівнювання процесів змінювання електромагнітного моменту $T_{ем}$, які наведено на рис. 4, 5, 10 та 14 та відповідають випадкам коротких замикань, свідчать, що вони суттєво відрізняються як якісно, так і кількісно в залежності від виду живлення статорних обмоток АТД. Найменші значення створюються при живленні статорних обмоток струмами з ідеальною синусоїдальною формою.

На рис. 15 наведено найбільші значення зусиль взаємодії зубчастої передачі тягового редуктора $F_{ш}$ та поздовжньої складової зусилля на контакті колесо–рейка F_k при короткому трифазному замиканні, $\omega_r > \omega_{кр}$, живлення обмоток статора забезпечується струмом, який змінюється за синусоїдальною формою.

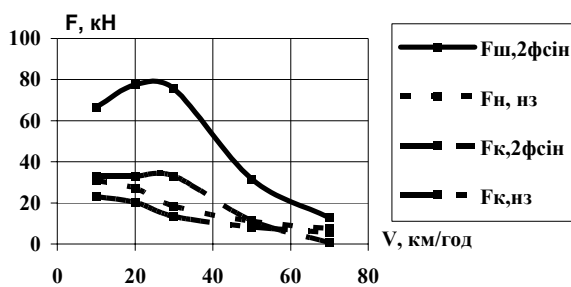


Рис. 15. Найбільші значення зусиль $F_{ш}$ взаємодії зубчастої передачі тягового редуктора та поздовжньої складової зусилля на контакті колесо–рейка при короткому трифазному замиканні, $\omega_r > \omega_{кр}$

На рис. 16 наведено найбільші значення електромагнітного моменту $T_{ем}$ та моменту в еквівалентному з'єднанні ротор–шестерня $T_{рш}$ при короткому двофазному замиканні, $\omega_r > \omega_{кр}$, живлення обмоток статора забезпечується струмом широтно-імпульсної модуляції.

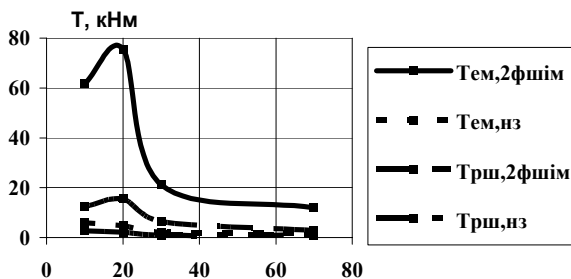


Рис. 16. Найбільші значення електромагнітного моменту $T_{ем}$ та моменту в еквівалентному з'єднанні ротор–шестерня $T_{рш}$ при короткому двофазному замиканні, $\omega_r > \omega_{кр}$

На рис. 17 та 18 наведено найбільші значення фазних струмів I_s статорних обмоток в залежності від швидкості руху, які створюються під час коротких замикань при умові, що частота живлення $\omega_r > \omega_{кр}$. Рис. 17 відповідає випадку живлення статорних обмоток АТД від ідеального джерела струмом, який змінюється за синусоїдальною формою, а рис. 18 – випадку живлення обмоток статора струмом з використанням широтно-імпульсної та імпульсної модуляції.

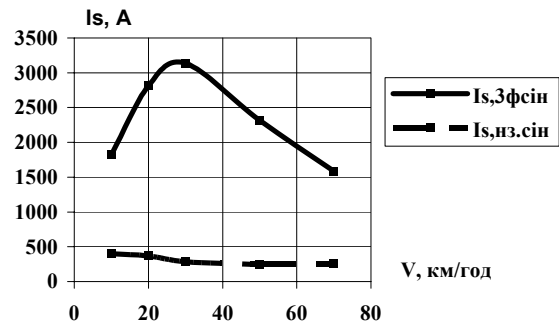


Рис. 17. Найбільші значення фазних струмів I_s статорних обмоток при короткому трифазному замиканні, $\omega_r > \omega_{кр}$

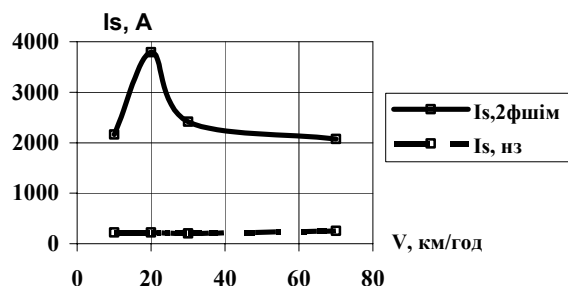


Рис. 18. Найбільші значення фазних струмів I_s статорних обмоток при короткому трифазному замиканні, $\omega_r > \omega_{кр}$

На рис. 19 – 22 наведено результати з моделювання процесів буксування.

На рис. 21 наведено залежності найбільших значень моменту у еквівалентному з'єднанні ротор–шестерня $T_{рш}$ від швидкості руху при буксуванні електровоза під час його наїзду на дільницю із замашеною поверхнею кочення рейок. Цифри у стовпчику (0,5; 1 та 2), поряд із наведеними графіками, вказують на відповідну довжину змашеної поверхні в метрах. Лінія з позначенням (ст) відповідає результатам при стаціонарному режимі руху.

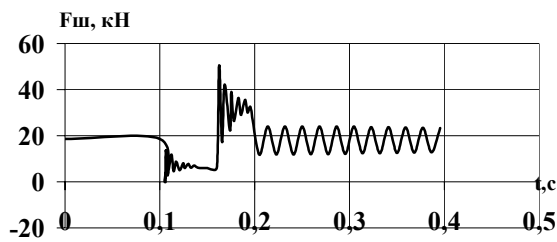


Рис. 19. Процес змінювання зусиль у з'єднанні ротор–шестерня $T_{рш}$ при зриві на буксування та поверненні у режим тяги

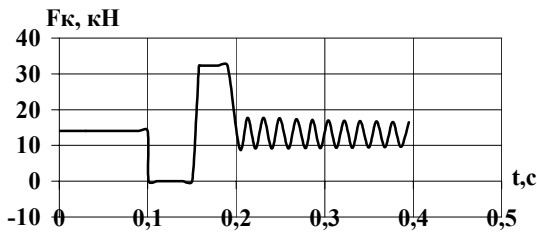


Рис. 20. Процес змінювання поздовжніх зусиль на контакті колесо–рейка F_k при зриві на буксування та повернення у режим тяги

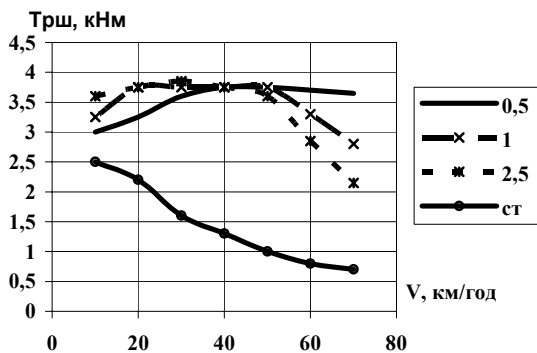


Рис. 21. Найбільші значення моменту у еквівалентному з'єднанні ротор–шестерня $T_{рш}$ від швидкості руху та довжини дільниці із замашеною поверхнею кочення колеса по рейці, $\omega_r > \omega_{кр}$

З цього рисунку маємо, що при швидкостях руху в діапазоні 30...50 км/год довжина дільниці, яка замашена мастилом, не має впливу на створення найбільших значень моменту в з'єднанні ротор–шестерня $T_{рш}$.

На підставі результатів рис. 21 були отримані значення коефіцієнтів динамічної навантаженості $K_d = \frac{T_{max}}{T_{ст}}$, тобто як результати відношень найбільших значень динамічних величин моментів $T_{рш}$ до відповідних статичних значень. Результати цих розрахунків наведено

на рис. 22. Найбільше значення коефіцієнту динамічності при зриві на буксування та швидкості руху 70 км/год дорівнює $K_d = 6,3$. Як показали розрахунки, електромагнітний момент $T_{ем}$ при цьому змінюється несуттєво. Це означає, що при буксуванні динамічна навантаженість приймається механічною частиною тягового привода.

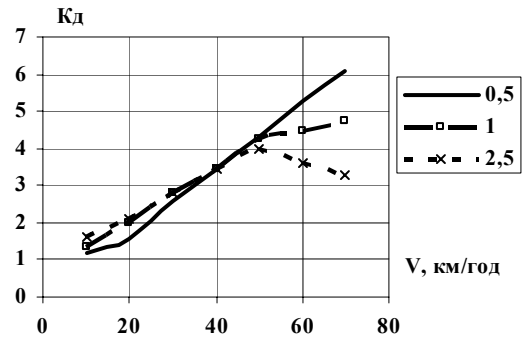


Рис. 22. Чисельні значення коефіцієнтів динамічності K_d в еквівалентному з'єднанні ротор–шестерня, $\omega_r > \omega_{кр}$

У відповідності до розрахункової схеми (рис. 3) та розроблених математичних моделей [3, 5] було отримано результати чисельних розрахунків моделювання процесів, які можуть створюватися в умовах експлуатації локомотивів з використанням групового тягового привода. Розглянуто груповий тяговий привод електровоза (рис. 3), який складається з: тягового двигуна 1; карданного валу, що з'єднує тяговий двигун з тяговим редуктором першої колісної пари візка 2; карданного валу 6, що з'єднує тягові редуктори першої та другої колісної пари; двох валів з конічними та циліндричними шестернями 3, 4 та 7, 8 тягових редукторів першої та другої колісних пар та двох колісних пар 5, 9. Результати цих розрахунків для групового тягового привода наведено на рис. 23 – 52.

Нижче у табл. 1 та на рис. 23 – 25 наведено результати моделювання трифазних та (при різних початкових значеннях фаз) двофазних замикань. У другому рядку табл. 1 наведено стаціонарні значення моментів та зусиль, якими навантажуються елементи групового тягового привода, а також струмів статорних обмоток, що мали місце перед коротким замиканням під час руху локомотива в режимі тяги. У третьому рядку цієї таблиці наведено ті ж саме значення, що і у другому рядку, тільки при трифазному короткому замиканні. Ці результати відповідають швидкості руху 30 км/год, а частоти дорівнюють $\omega_r = 1,3$ 1/с, $\omega_{кр} = 1,5$ 1/с.

Стационарні значення моментів, зусиль та струмів у груповому тяговому приводі локомотива та їх найбільші значення при трифазному замиканні й умові, що $\omega_r < \omega_{rkr}$

Величина	T_{em} , кНм	$T_{1,2}$, кНм	$F_{3,4}$, кН	$F_{4,5}$, кН	$T_{3,6}$, кНм	S_T , кН	I_s^{max} , А
Режим							
Стационарний	5,34	5,34	17,0	35,4	2,67	18,7	350
3-х фазн. КЗ	94,5	90,3	341,7	729,2	46,2	347,6	5925

На рис. 23 – 25 наведено: найбільші значення електромагнітного моменту тягового двигуна 1 T_{em} ; моментів зусиль $T_{1,2}$ – з'єднання тягового двигуна 1 з карданним валом 2, $T_{3,6}$ – з'єднання вала 3 першого тягового редуктора з карданним валом 6, що з'єднує тягові редуктори двох колісних пар одного візка; зусиль взаємодії валів 3, 4 $F_{3,4}$ та циліндричної зубчастої передачі $F_{4,5}$ вала 4 та колісної пари 5 першого тягового редуктора; зусиль у вузлі закріплення корпусу тягового редуктора до рами візка S_T ; фазних струмів I_s^{max} при двофазних коротких замиканнях і різних початкових значеннях фаз та умові, що $\omega_r < \omega_{rkr}$, обмотки статора живляться струмом, який змінюється за синусоїдальною формою.

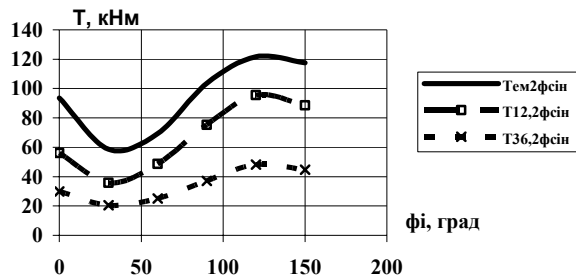


Рис. 23. Найбільші значення моментів $T_{em}, T_{1,2}, T_{3,6}$ при двофазних коротких замиканнях та умові, що $\omega_r < \omega_{rkr}$

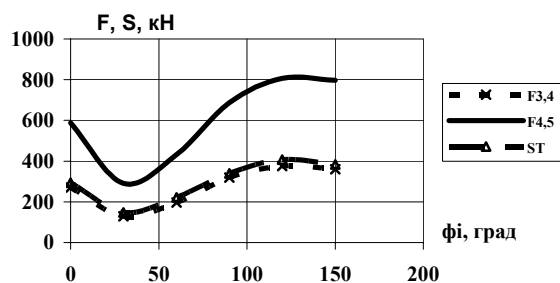


Рис. 24. Найбільші значення зусиль $F_{3,4}, F_{4,5}, S_T$ при двофазних коротких замиканнях та умові, що $\omega_r < \omega_{rkr}$

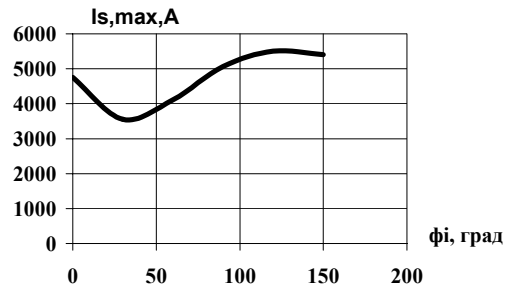


Рис. 25. Найбільші значення струмів фазних обмоток статора I_s^{max} при двофазних коротких замиканнях та умові, що $\omega_r < \omega_{rkr}$

На рис. 26 – 41 наведено результати розрахунків моделювання процесів буксування. При цьому результати рис. 26 – 31 відповідають умові, коли $\omega_r < \omega_{rkr}$, а результати рис. 32 – 41 – умові, коли $\omega_r > \omega_{rkr}$.

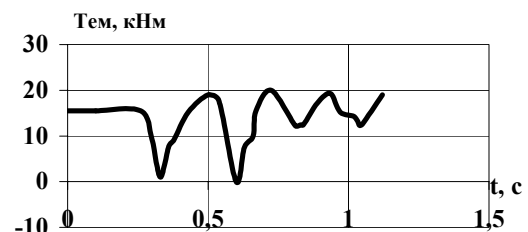


Рис. 26. Залежність електромагнітного моменту T_{em} при буксуванні, довжина замашеної дільниці 0,5 м, $\omega_r < \omega_{rkr}$

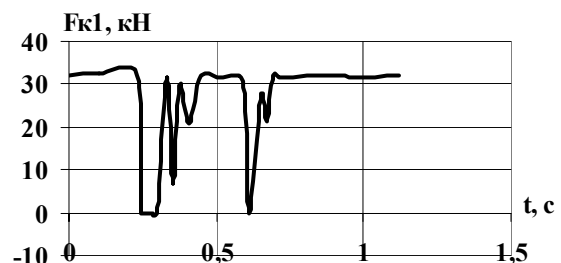


Рис. 27. Залежність поздовжньої складової зусилля на контакті колесо-рейка F_{kl} при буксуванні, довжина замашеної дільниці 0,5 м, $\omega_r < \omega_{rkr}$

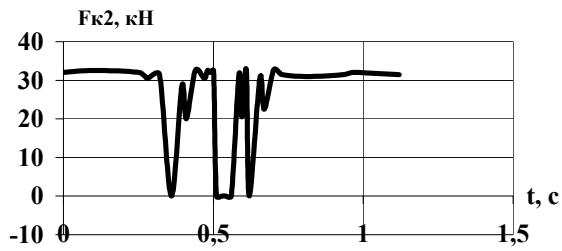


Рис. 28. Залежність поздовжньої складової зусилля на контакті колесо–рейка F_{k2} при буксуваннях, довжина замашеної ділянки 0,5 м, $\omega_r < \omega_{rkr}$

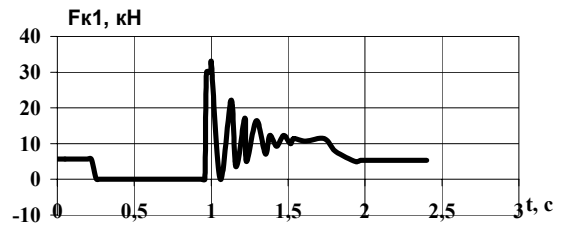


Рис. 32. Залежність поздовжньої складової зусилля на контакті колесо–рейка F_{k1} при буксуваннях, довжина замашеної ділянки 2,5 м, $\omega_r > \omega_{rkr}$, $v = 10$ км/год, ϵ запас за зчепленням

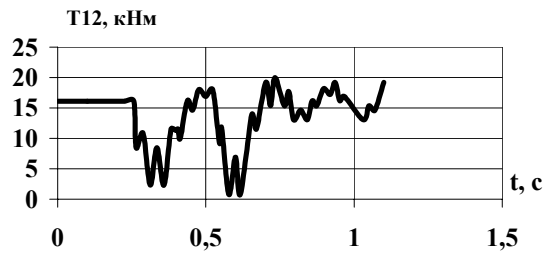


Рис. 29. Залежність моменту T_{12} при буксуваннях, довжина замашеної ділянки 0,5 м, $\omega_r < \omega_{rkr}$

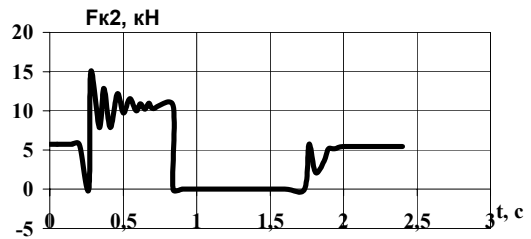


Рис. 33. Залежність поздовжньої складової зусилля на контакті колесо–рейка F_{k2} при буксуваннях, довжина замашеної ділянки 2,5 м, $\omega_r > \omega_{rkr}$, $v = 10$ км/год, ϵ запас за зчепленням

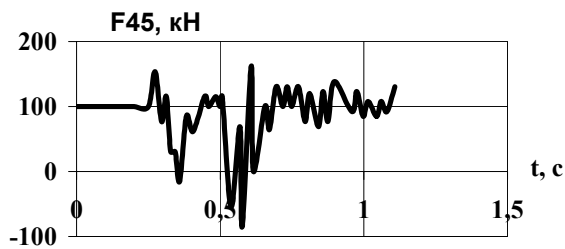


Рис. 30. Залежність зусилля F_{45} при буксуваннях, довжина замашеної ділянки 0,5 м, $\omega_r < \omega_{rkr}$

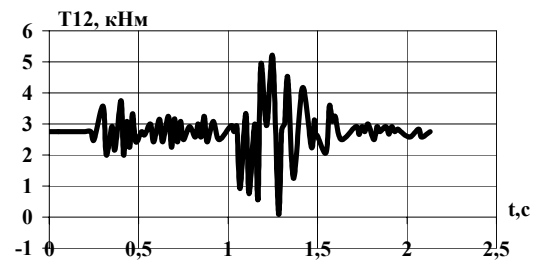


Рис. 34. Залежність моменту T_{12} при буксуваннях, довжина замашеної ділянки 2,5 м, $\omega_r > \omega_{rkr}$, $v = 10$ км/год, ϵ запас за зчепленням

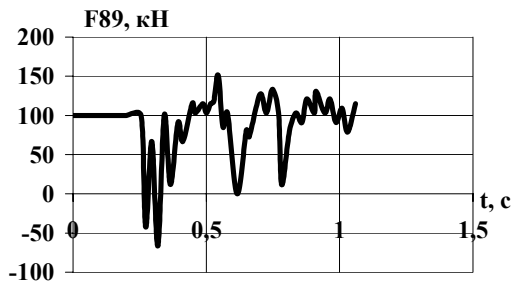


Рис. 31. Залежність зусилля F_{89} при буксуваннях, довжина замашеної ділянки 0,5 м, $\omega_r < \omega_{rkr}$

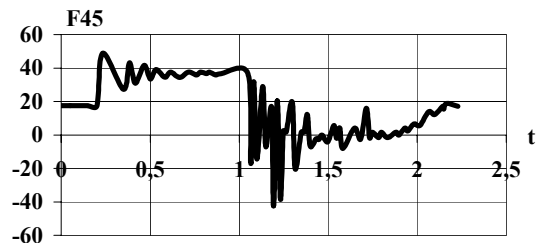


Рис. 35. Залежність зусилля F_{45} при буксуваннях, довжина замашеної ділянки 2,5 м, $\omega_r > \omega_{rkr}$, $v = 10$ км/год, ϵ запас за зчепленням

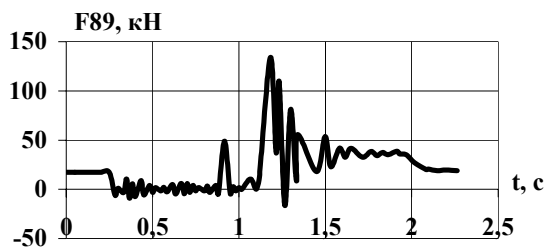


Рис. 36. Залежність зусилля F_{89} при буксуваннях, довжина замашеної ділянки 2,5 м, $\omega_r > \omega_{кр}$, $v = 10$ км/год, є запас за зчепленням

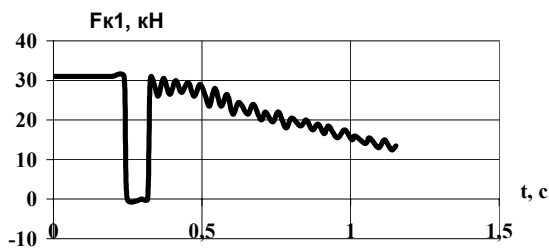


Рис. 37. Залежність поздовжньої складової зусилля на контакт колесо–рейка $F_{к1}$ при буксуваннях, довжина замашеної ділянки 0,5 м, $\omega_r > \omega_{кр}$, $v = 30$ км/год, нема запасу за зчепленням

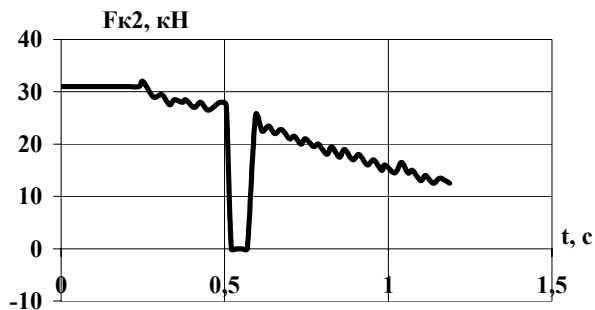


Рис. 38. Залежність поздовжньої складової зусилля на контакт колесо–рейка $F_{к2}$ при буксуваннях, довжина замашеної ділянки 0,5 м, $\omega_r > \omega_{кр}$, $v = 30$ км/год, нема запасу за зчепленням

В табл. 2 наведено дані для розрахунку динамічної навантаженості групового тягового привода при $\omega_r > \omega_{кр}$, обмотки статора живляться струмом, який змінюється з використанням імпульсної та широтно-імпульсної модуляції.

Кількість переключень тиристорів при моделюванні широтно-імпульсної модуляції складало 16 на півперіоду змінювання струмів обмоток статора.

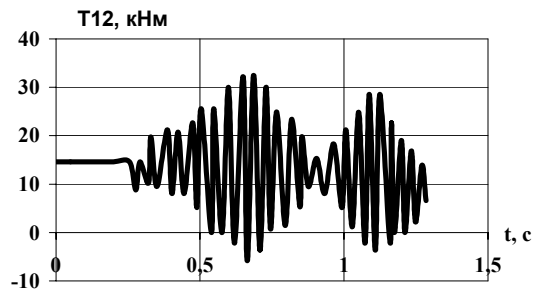


Рис. 39. Залежність моменту T_{12} при буксуваннях, довжина замашеної ділянки 0,5 м, $\omega_r > \omega_{кр}$, $v = 30$ км/год, нема запасу за зчепленням

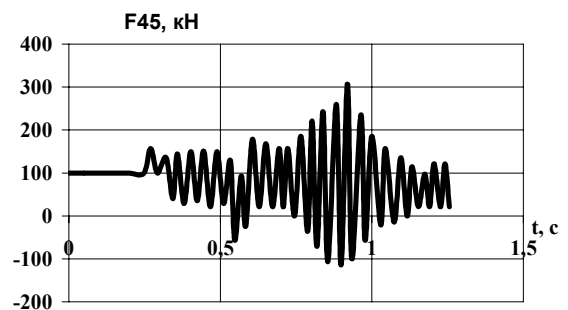


Рис. 40. Залежність зусилля F_{45} при буксуваннях, довжина замашеної ділянки 0,5 м, $\omega_r > \omega_{кр}$, $v = 30$ км/год, нема запасу за зчепленням

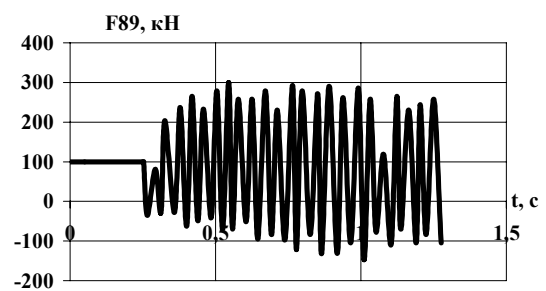


Рис. 41. Залежність зусилля F_{89} при буксуваннях, довжина замашеної ділянки 0,5 м, $\omega_r > \omega_{кр}$, $v = 30$ км/год, нема запасу за зчепленням

В табл. 3 наведено результати розрахунків з моделювання стаціонарного режиму руху в тязі зі швидкістю 20 км/год при живленні статорних обмоток струмом із використанням імпульсної та широтно-імпульсної модуляції.

Таблиця 2

Дані для розрахунку динамічної навантаженості групового тягового привода при $\omega_r > \omega_{кр}$

v , км/год	10	20	20	30	50	70
Режим роботи АІН	ШІМ	ШІМ	ІМ	ІМ	ІМ	ІМ
ω_r , рад/с	3,61	3,11	3,11	3,6	3,76	6,75
I_s , А	300	370	370	285	250	256

Таблиця 3

Значення моментів та зусиль при стаціонарному режимі руху в тязі при швидкості 20 км/год та $\omega_r = 3,11$ 1/с $>$ $\omega_{кр} = 1,5$ 1/с

Режим	Величина	$T_{ем}$, кНм	$T_{1,2}$, кНм	$T_{2,3}$, кНм	$F_{3,4}$, кН	$F_{4,5}$, кН	$T_{3,6}$, кНм	S_T , кН	F_k , кН
ШІМ	MAX	6,7	5,9	5,9	18,8	39,3	3,0	20,3	12,2
	MIN	1,3	5,4	5,4	17,5	36,6	2,7	18,7	11,6
ІМ	MAX	6,8	5,7	5,7	18,2	38,1	2,9	19,7	11,8
	MIN	1,2	5,2	5,2	16,8	35,2	2,6	17,9	11,1

На рис. 42, 43 показано залежності найбільших значень електромагнітного моменту $T_{ем}$, моментів $T_{1,2}$, $T_{2,3}$, $T_{3,6}$ та зусиль $F_{3,4}$, $F_{4,5}$, S_T у вузлах з'єднань елементів механічної частини групового тягового привода під час двохфазних коротких замикань при різних початкових значеннях фаз ϕ та умові, що $\omega_r > \omega_{кр}$, обмотки статора живляться струмом, який змінюється за синусоїдальною формою.

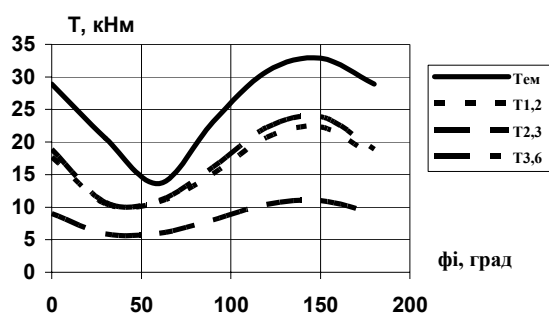


Рис. 42. Найбільші значення електромагнітного моменту $T_{ем}$ та моментів $T_{1,2}$, $T_{2,3}$, $T_{3,6}$ у вузлах з'єднань елементів механічної частини групового тягового привода при двохфазних коротких замиканнях як функції часу при різних початкових значеннях фаз та умові, що $\omega_r > \omega_{кр}$

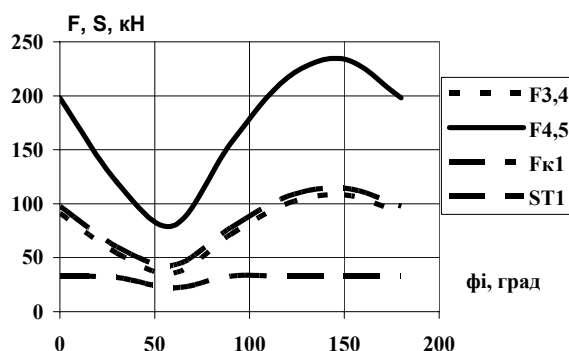


Рис. 43. Найбільші значення зусиль $F_{3,4}$, $F_{4,5}$, S_T у вузлах з'єднань елементів механічної частини групового тягового привода та поздовжньої складової зусилля на контакті колесо–рейка $F_{к1}$ при двохфазних коротких замиканнях і різних початкових значеннях фаз та умові, що $\omega_r > \omega_{кр}$

На рис. 44 – 47 показано залежності найбільших значень електромагнітного моменту $T_{ем}$, моментів $T_{1,2}$, $T_{2,3}$, $T_{3,6}$ та зусиль $F_{3,4}$, $F_{4,5}$, S_T у вузлах з'єднань елементів механічної частини групового тягового привода під час двохфазних коротких замикань як функції часу та умові, що $\omega_r > \omega_{кр}$, обмотки статора живляться струмом з використанням імпульсної (рис. 44 – 45) та широтно-імпульсної (рис. 46 – 47) модуляції. Тут обрано моменти часу, за яких досліджувалися найбільші значення відповідних величин.

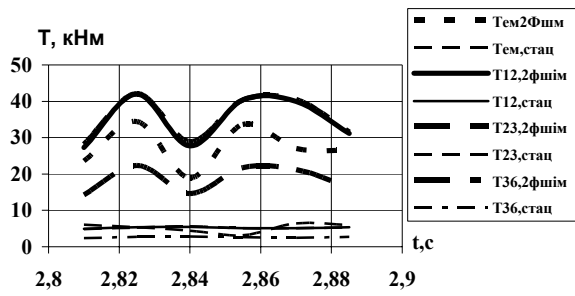


Рис. 44. Найбільші значення електромагнітного моменту $T_{ем}$ та моментів $T_{1,2}, T_{2,3}, T_{3,6}$ у вузлах з'єднань елементів механічної частини групового тягового привода при двофазних коротких замиканнях як функції часу та умові, що $\omega_r > \omega_{ркр}$

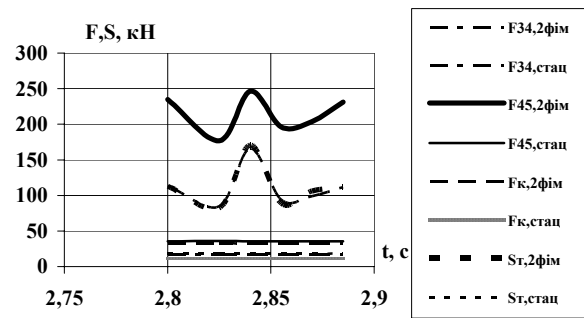


Рис. 47. Найбільші значення зусиль $F_{3,4}, F_{4,5}, S_T$ у вузлах з'єднань елементів механічної частини групового тягового привода та поздовжньої складової зусилля на контактні колесо-рейка $F_{к1}$ при двофазних коротких замиканнях як функції часу та умові, що $\omega_r > \omega_{ркр}$

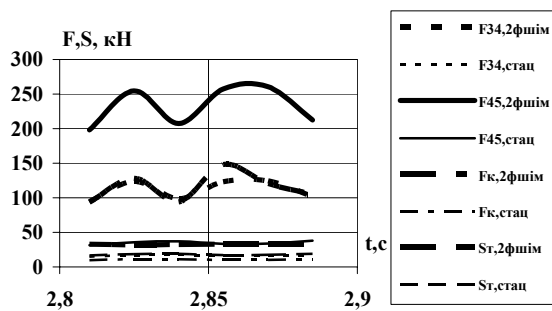


Рис. 45. Найбільші значення зусиль $F_{3,4}, F_{4,5}, S_T$ у вузлах з'єднань елементів механічної частини групового тягового привода та поздовжньої складової зусилля на контактні колесо-рейка $F_{к1}$ при двофазних коротких замиканнях як функції часу та умові, що $\omega_r > \omega_{ркр}$

На рис. 48 – 50 наведено найбільші значення електромагнітного моменту $T_{ем}$, моментів $T_{1,2}, T_{2,3}, T_{3,6}$, зусиль $F_{3,4}, F_{4,5}, F_{7,8}, F_{8,9}$ у вузлах з'єднань елементів механічної частини групового тягового привода, поздовжніх складових зусиль на контактні колесо-рейка $F_{к1}, F_{к2}$ та зусилля S_{T1} у вузлі приєднання корпуса тягового редуктора до рами візка при буксуванні в залежності від довжини дільниці із замашеною поверхнею головок рейок та при різних швидкостях руху.

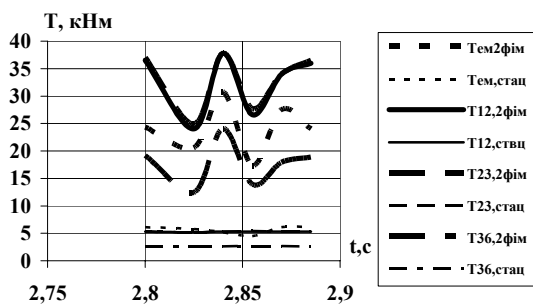


Рис. 46. Найбільші значення електромагнітного моменту $T_{ем}$ та моментів $T_{1,2}, T_{2,3}, T_{3,6}$ у вузлах з'єднань елементів механічної частини групового тягового привода при двофазних коротких замиканнях при різних початкових значеннях фаз та умові, що $\omega_r > \omega_{ркр}$

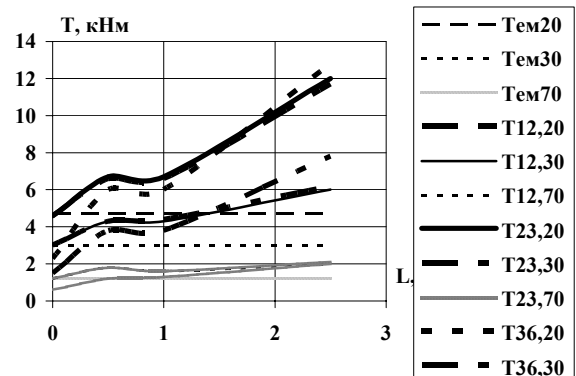


Рис. 48. Найбільші значення електромагнітного моменту $T_{ем}$ та моментів $T_{1,2}, T_{2,3}, T_{3,6}$ у вузлах з'єднань елементів механічної частини групового тягового привода при буксуванні в залежності від довжини дільниці із замашеною поверхнею головок рейок та при різних швидкостях руху

Аналіз осцилограм, які ілюструють змінювання зусиль на контактні колесо-рейка $F_{кi}$ при зривах на буксування, показує, що у випадку відсутності необхідного запасу за зчепленням при положенні колісних пар поза межами дільниці із замашеними поверхнями рейок, а режим

роботи АТД відповідає випадку $\omega_r > \omega_{rkr}$, після буксування на замащеній дільниці спостерігається самовільне зменшення зусиль на контакті колесо-рейка F_{ki} .

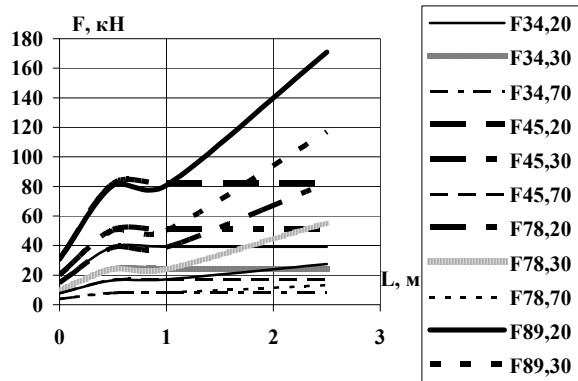


Рис. 49. Найбільші значення зусиль

$F_{3,4}, F_{4,5}, F_{7,8}, F_{8,9}$ у вузлах з'єднання елементів групового тягового привода при буксуванні в залежності від довжини дільниці із замащеною поверхнею головок рейок та при різних швидкостях руху

Це пояснюється тим, що, не звертаючи уваги на зрив за зчепленням, електромагнітний момент протягом невеликої тривалості часу залишається практично постійним, але ж при цьому коефіцієнт відносного ковзання колеса по рейці ϵ_{ki} зростає, що і приводить до зменшення сил F_{ki} , таким чином, до зростання швидкості обертання колісної пари та до зменшення сили тяги. Отримані результати дозволили зробити висновок про те, що в такому

варіанті живлення тягового двигуна тяговий привод з АТД поводить себе таким саме чином, як і привод з тяговим двигуном постійного струму. В цьому випадку наслідки буксування повинні бути усунені за допомогою спеціального протибуксувального пристрою.

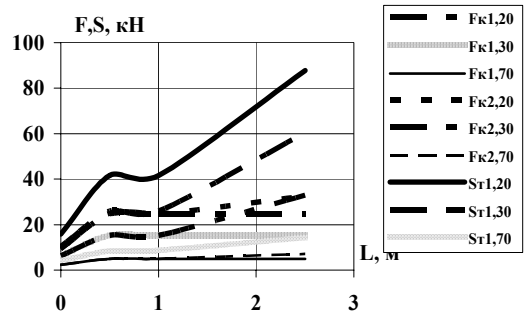


Рис. 50. Найбільші значення поздовжніх складових зусиль на контакті колесо-рейка F_{k1}, F_{k2} та зусилля S_{T1} у вузлі приєднання корпуса тягового редуктора до рами візка групового тягового привода при буксуванні в залежності від довжини дільниці із замащеною поверхнею головок рейок та при різних швидкостях руху

В табл. 4 наведено стаціонарні і найбільші при буксуванні значення моментів та зусиль локомотива з груповим тяговим приводом при умові, що частота обертання електромагнітного поля статора $\omega_r < \omega_{rkr}$ та $\omega_r > \omega_{rkr}$.

Таблиця 4

Найбільші значення моментів та зусиль при буксуванні та відповідні стаціонарні значення

Режим, величини		T_{em} , кНм	$T_{1,2}$, кНм	T_{23} , кНм	F_{34} , кН	F_{45} , кН	T_{36} , кНм	F_{78} , кН	F_{89} , кН	S_{T1} , кН	F_{k1} , кН	F_{k2} , кН
$\omega_r < \omega_{rkr}$	стац.	15,6	15,6	15,6	49,5	103,5	7,8	49,5	103,4	53,2	31,5	31,5
	букс.	20,2	20,2	21,0	78,4	165,4	12,4	74,1	153,7	78,8	33,0	33,0
$\omega_r > \omega_{rkr}$	стац.	15,4	15,4	15,4	48,8	102	7,7	48,8	102	52,5	31,1	31,1
	букс.	15,4	33	34,2	132,6	274,1	25,5	149,5	309,2	158,4	33	31,1

Для порівняння варіантів привода визначався імпульс сили тяги протягом однієї секунди з моменту початку буксування першої за напрямком руху колісної пари. У випадку буксування на замащеній мастилом дільниці довжиною 0,5 м імпульс сили тяги візка у груповому тяговому приводі на швидкості руху $v = 30$ км/год при $\omega_r = 2,6$ 1/с $> \omega_{rkr} = 1,5$ 1/с складає 41,1 кН·с. Протягом того саме часу в подібних умовах в індивідуальному тяговому

приводі імпульс сили тяги одного візка складає 57 кН·с, що надає можливість зробити висновок про те, що ефективність групового тягового привода виявилася на 28 % нижче ефективності індивідуального привода.

У випадках, коли буксування відбувається при відсутності необхідного запасу за зчепленням, АТД створює електромагнітний тяговий момент при частоті обертання поля ротора в докритичній області $\omega_r < \omega_{rkr}$, при цьому від-

бувається короткочасне зменшення результуючої сили тяги. У випадку, коли відбувається повторний короткочасний зрив на буксування, результуюча сила тяги відновлюється до рівня, який був напередодні виникнення процесу буксування.

З порівнювання результатів розрахунку режимів буксування при реалізації тяги у випадках, коли відсутній запас за зчепленням коліс з рейками переважнішою виявляється докритична область роботи АТД, тому що імпульс результуючої сили тяги візка протягом однієї секунди складає 55,6 кН·с та буде на 24 % більше у порівнянні з випадком, коли за інших рівних умов АТД працював у закритичній області. В такий ситуації вихід привода з режиму буксування вимагався б із застосуванням спеціальних протибуксувальних пристроїв та створився б завдяки особливостям роботи асинхронних тягових двигунів. Але ж і за цих умов (двигун працює в докритичній області) імпульс сили тяги візка на інтервалі часу в одну секунду виявився на 2,5 % нижче, ніж при використанні індивідуального привода.

Таким чином, виконане дослідження поведінки тягових приводів на межі зчеплення та при зривах зчеплення, що пов'язано з наїздами локомотива на замащену мастилом дільницю, виявило, що індивідуальний тяговий привод є більш ефективним у порівнянні з груповим тяговим приводом.

Звернемо також увагу на те, що розкид кругів катання колісних пар у груповому тяговому приводі обмежує можливості його використання на межі зчеплення. Використання в індивідуальних тягових приводах АТД дозволяє забезпечувати їх керуванням таким чином, щоб

кожною колісною парою реалізувалася сила тяги на межі зчеплення.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Копылов, И. П. Математическое моделирование асинхронных машин [Текст] / И. П. Копылов, Ф. А. Мамедов, В. Я. Беспалов. – М.: Энергия, 1969. – 96 с.
2. Копылов, И. П. Математическое моделирование электрических машин [Текст] / И. П. Копылов. – М.: Высш. шк., 1987. – 248 с.
3. Математическое моделирование электромеханических процессов в асинхронных групповых и индивидуальных (с опорно-осевым подвешиванием) приводах локомотивов [Текст] / Л. А. Манашкин и др. – Д., 1990. – 52 с. – Деп. в ЦНИИТЭИ 30.05.91 № 5124.
4. Исследование нагруженности асинхронного тягового привода при коротком замыкании статорных обмоток тягового двигателя [Текст] / Л. А. Манашкин и др. // Динамика, прочность и надежность транспортных машин: Сб. науч. тр. / Брянский ин-т транспортного машиностроения. – Брянск, 1986. – С. 146-152.
5. Моделирование динамической нагруженности группового и индивидуального асинхронных тяговых приводов локомотивов в режимах буксований [Текст] / Л. А. Манашкин и др. // Динамика, прочность и надежность транспортных машин: Сб. науч. тр. / Брянский ин-т транспортного машиностроения. – Брянск, 1990. – С. 43-47.
6. Хлебников, В. Н. Исследование фрикционного взаимодействия колес с рельсами [Текст] / В. Н. Хлебников // Железнодорожный транспорт за рубежом. – 1976. – № 3.

Надійшла до редколегії 12.01.2010.

Прийнята до друку 19.01.2010.