

УДК 621.314.26

К.М.МАРЕНИЧ, канд. техн. наук, С.А.РУССІЯН (ДВНЗ “Донецький національний технічний ун-т, м. Донецьк”)

Обґрунтування принципу удосконалення способу уповільнення пуску асинхронного електропривода гірничої машини

Постановка задачі та її актуальність. З метою зменшення коливальних складових електромагнітного моменту, запровадження повільного пуску асинхронних електроприводів широке застосування в промисловості знайшли установи «Soft-start». В них тиристорний регулятор напруги (ТРН) функціонує в режимі фазового регулювання, змінюючи напругу на виході (напругу живлення асинхронного двигуна - АД) від фіксованого зменшеного рівня до номінального, за заданим, як правило, - лінійним законом [1]. Дослідженнями [2] встановлено, що при застосуванні розімкненої системи управління ТРН на певному інтервалі зміни кутів α відпирання тиристорів в системі «ТРН-АД» виникає нестійкий стан, що характеризується автоколиваннями струму статора АД, його ЕРС обертання, фактичних кутів відпирання та провідності силових тиристорів. Отже, більш прийнятною є зміна інтенсивності зменшення кутів α відпирання тиристорів ТРН при впровадженні повільного розгону АД з метою протидії виникненню автоколивальних процесів в системі «ТРН-АД». Цей принцип може бути запропоновано в асинхронних електроприводах різних галузей, але стосовно до гірничої промисловості його впровадження додатково потребує з'ясування сумісної роботи ТРН з функціонуванням апарата захисту електротехнічного комплексу (ЕТК) дільниці шахти від витоків струму на землю (АЗ).

Аналіз досліджень і публікацій. Дослідженнями [3] обґрунтовані структури моделей процесів в ЕТК дільниці шахти і встановлено характер впливу контакторної комутації асинхронних двигунів на величину параметру спрацювання дільничних АЗ серії АЗУР. Це підтверджується експериментальними дослідженнями [4]. У дослідженні [5] розглянуті питання впливу силових тиристорних комутаційних схем на величину оперативного струму АЗ. Однак, актуальним є дослідження факторів впливу процесів в системі «ТРН-АД» на параметри стійкості функціонування АЗ (серії АЗУР) при східчастій зміні інтенсивності зменшення кута α відпирання силових тиристорів ТРН.

Постановка задачі. Задачею досліджень є встановлення характеру впливу системи ТРН-АД (в складі ЕТК дільниці шахти) на величину параметру спрацювання дільничного апарата захисту від витоків струму на землю при застосуванні східчастого закону зміни інтенсивності зменшення кута відпирання тиристорів ТРН.

Основний матеріал і результати досліджень. Об'єктом досліджень є процеси в ЕТК дільниці шахти, оснащеному системою «ТРН-АД», розрахункова схема якого наведена на рис. 1. Схема вміщує трифазне джерело живлення з

фазними напругами U_A ; U_B ; U_C ; ТРН, виконаний на трьох парах зустрічно-паралельно з'єднаних тиристорів $VS1-VS6$; АД, в якому R_s і L_s – відповідно – активний опір та індуктивність статора; R_r і L_r – активний опір та індуктивність ротора; L_m – індуктивність головного магнітного поля, розрахована на фазу АД. Для забезпечення шляху протікання оперативного струму АЗ в мережу статора АД паралельно тиристорам ТРН передбачені резистори активних опорів ($R1 - R6$).

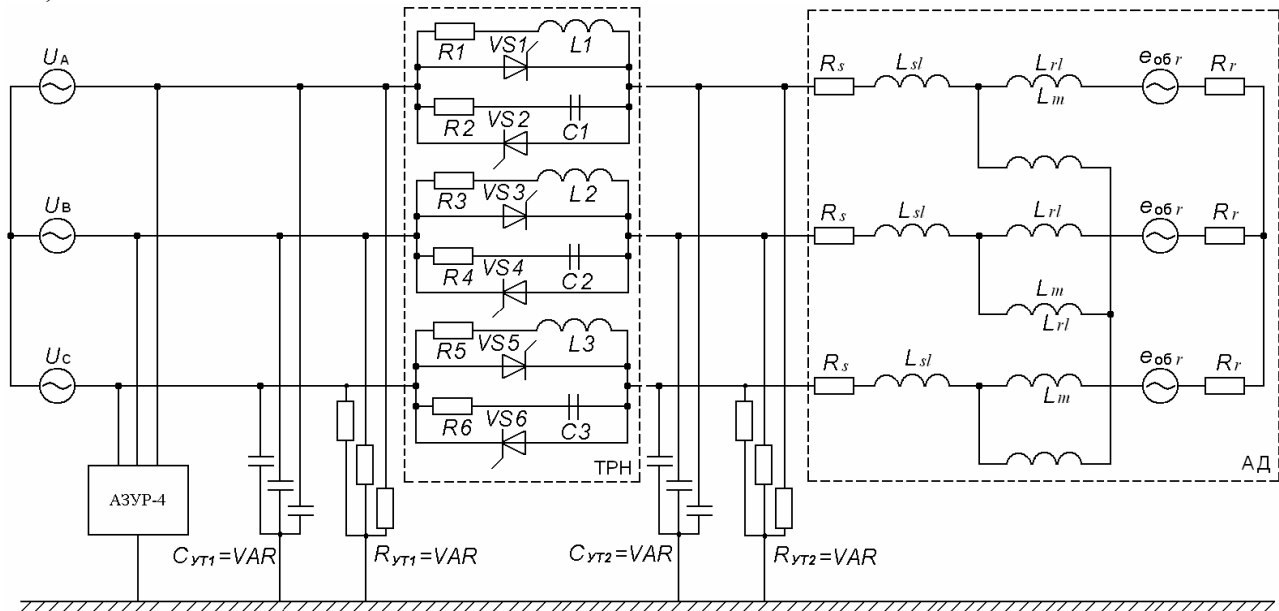


Рис. 1 – Розрахункова схема ЕТК дільниці з системою «ТРН-АД»

Припустимо, що у вихідному стані ТРН, що функціонує в режимі фазового управління, у відповідності до лінійного закону зміни кута α відпирання тиристорів регулятора в діапазоні $\alpha_n \leq \alpha \leq 0$ (ел. град.):

$$\alpha(t)_{\text{лин.пуск}} = \alpha_n - Qt, \quad (1)$$

де $\alpha_n = 180$ ел. град. - початковий кут відпирання тиристорів ТРН, $Q \in [4,7; 28]$ - інтенсивність комутації (град/с).

В процесі досліджень запропонованої моделі прийняті наступні припущення: в якості асинхронного двигуна системи «ТРН-АД» прийнята машина типу ЭДКОФВ315LB4 потужністю 250 кВт з відповідними електричними параметрами, обмотка статора АД з'єднана за схемою “зірка”; лінійна номінальна напруга джерела живлення 660 В, частота напруги 50 Гц; номінальний електромагнітний момент двигуна $M_H = 1613$ Н*м; номінальна частота обертання ротора $\omega_{\text{ном}} = 1480,5$ об/хв; момент опору ($M_{\text{оп}}$) задається при моделюванні в діапазоні $0,1M_H < M_{\text{оп}} < M_H$.

Миттєве значення фазної ЕРС обертання ротора визначається виразом:

$$-e_{o6r} = \frac{1}{\sqrt{3}} p \omega (L_m (2i_{sA} + i_{sB}) + L_r (2i_{rB} + i_{rA})), \quad (2)$$

де p – кількість пар полюсів АД; i_s та i_r - струми статора та ротора; ЕРС e_{o6r} має знак (-) по відношенню до ЕРС обертання, індукованої в обмотці статора.

На першому етапі досліджень доцільно встановити характер взаємного впливу ТРН і АД, враховуючи наявність ЕРС обертання. З цією метою

тиристорні пари можуть бути представлені відповідними опорами R_{VSi} . Значення кожного з цих опорів змінюється стрибкоподібно від $R_{\min} = 10^{-3}$ Ом при відкриванні одного з тиристорів пари до опору ізоляції $R_{\max} = 10^6$ Ом в разі непровідного стану обох тиристорів пари.

Просторовий вектор \bar{u}_{TPH} падіння напруги ТРН визначається, окрім опорів тиристорів, струмом \bar{i}_s статора двигуна:

$$\bar{u}_{TPH} = \bar{i}_s \cdot (R_{VS1,2}; R_{VS3,4}; R_{VS5,6}) = \frac{2}{3} (\bar{i}_{sa} \cdot R_{VS1,2} + a \cdot \bar{i}_{sb} \cdot R_{VS3,4} + a^2 \cdot \bar{i}_{sc} \cdot R_{VS5,6}), \quad (3)$$

Просторовий вектор напруги на затисках статора двигуна \bar{u}_s знаходиться за II законом Кірхгофа:

$$\bar{u}_s = \bar{u} - \bar{u}_{TPH}, \quad (4)$$

Математична модель АД у нерухомій системі координат визначається наступними залежностями [4]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{\psi}_s = \int (\bar{U}_s - \bar{i}_s R_s) dt + \bar{\psi}_s(0); \\ \bar{\psi}_r = \int (j\omega \bar{\psi}_r - \bar{i}_r R_r) dt + \bar{\psi}_r(0); \\ \omega = \frac{1}{J} \int (M - M_c) dt + \omega(0); \\ M = -\frac{3}{2} I_M [\hat{\psi} \cdot \bar{i}_r]; \\ \bar{i}_s = \frac{1}{L_s L_r - L_m^2} (L_r \bar{\psi}_s - L_m \bar{\psi}_r); \\ \bar{i}_r = \frac{1}{L_s L_r - L_m^2} (L_s \bar{\psi}_r - L_m \bar{\psi}_s). \end{array} \right. \quad (5)$$

Початковими є величини:

$\bar{\psi}_s(0+) = \bar{\psi}_r(0+) = \omega(0+) = 0$, що відповідає процесу пуску АД,

де $\bar{\psi}_r$, $\bar{\psi}_s$, \bar{i}_r , \bar{i}_s - просторові вектори, $\hat{\psi}$ - спряжений вектор к $\bar{\psi}_r$.

Модель визначення залежності моменту АД від частоти обертання ротора описується виразом:

$$M(\omega) = M_0 + (M_H - M_0) \left(\frac{\omega}{\omega_H} \right)^k, \quad (6)$$

де M_0 - момент опору руху при нульовій швидкості; M_H - момент опору при номінальній швидкості; k - коефіцієнт, що характеризує зміну моменту при збільшенні швидкості ($0 < k \leq 2$). [5]

Оскільки ТРН має функціонувати в режимі фазового управління розрахункова схема (рис. 1) доповнюється моделями системи імпульсно-фазового управління (СІФУ); засобу завдання кута α відпирання тиристорів. Все це визначає узагальнену структуру моделі системи «ТРН-АД» (рис. 2).

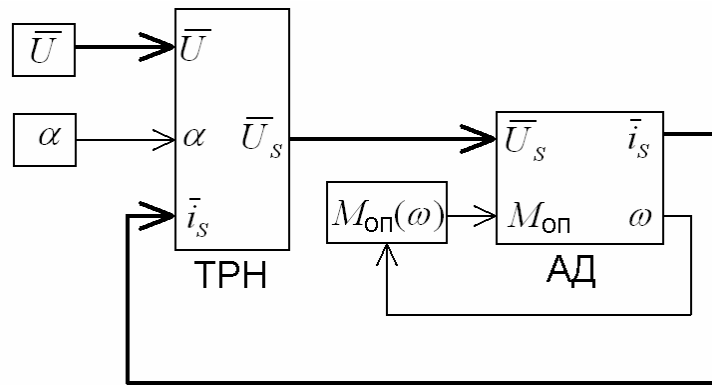


Рис. 2 – Узагальнена структура моделі системи «ТРН-АД»

Окрім зазначеного, структура моделі ТРН з керуванням від СІФУ вміщує просторові вектори напруги джерела живлення, модель визначення просторового вектора $\bar{u}_{ТРН}$ падіння напруги на ТРН, виходячи із залежності (3); просторовий вектор напруги \bar{u}_s на затисках статора АД, відповідно до залежності (4).

Дослідженнями процесів в системі «ТРН-АД» при керуванні пуском двигуна шляхом зміни кута α відпирання тиристорів ТРН (від 180 ел. град. до 0 ел. град.) встановлена наявність діапазону величин α , якому відповідає виникнення автоколивальних параметрів електричних та електромеханічних параметрів, що збігається з результатами досліджень [2], рис. 3.

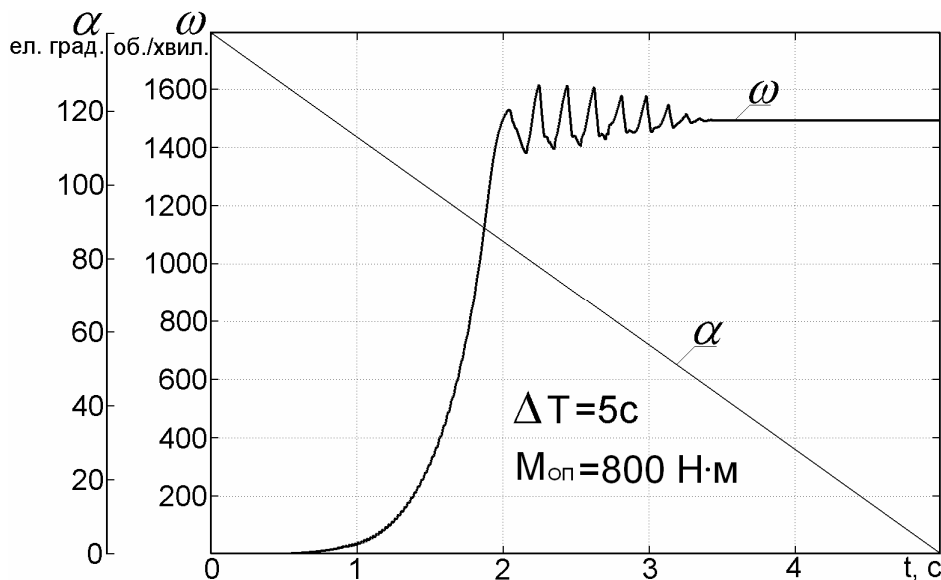


Рис. 3 – Діаграма зміни частоти обертання ротора (ω) АД при пуску в процесі змінення кута α відпирання тиристорів ТРН

Узагальнені результати досліджень автоколивальних процесів наведені на рис. 4 і рис. 5.

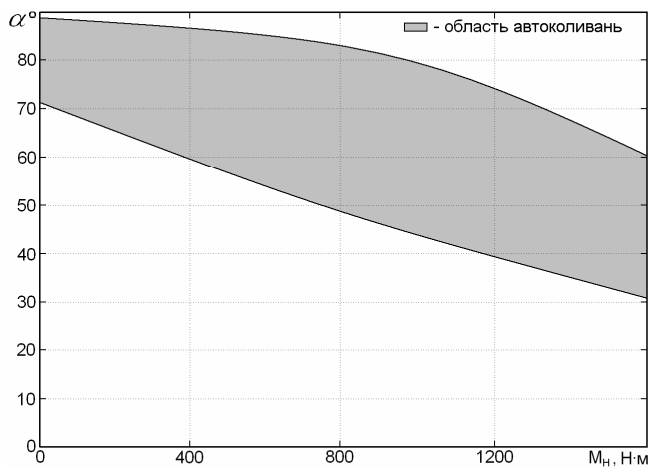


Рис. 4 – Розрахункова область автоколивань параметрів в системі «ТРН-АД» обумовлених величинами кута α відпирання тиристорів ТРН в залежності від моменту опору $M_{оп}$ АД

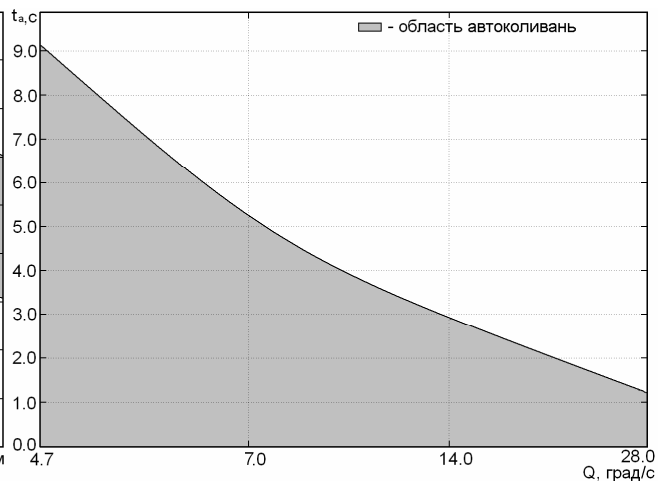


Рис. 5 – Залежність тривалості (t_a) автоколивань параметрів в системі «ТРН-АД» від інтенсивності (Q) зменшення кута α відпирання тиристорів ТРН

Таким чином, з метою уникнення виникнення автоколивальних процесів в системі «ТРН-АД» прийнятним слід вважати двоетапний закон завдання інтенсивності зменшення кутів α відпирання тиристорів ТРН при керуванні повільним пуском АД, а саме:

$$\alpha(t) = \begin{cases} \alpha_n - Q_I t, & \alpha_n \leq \alpha \leq \alpha_{AK}; \\ \alpha_{AK} - Q_{II} t, & \alpha_{AK} < \alpha \leq 0^\circ, \end{cases} \quad (4)$$

где $\alpha_n = 180$ ел. град., $Q_I \in [4,7;28]$ град./с., $Q_{II} \in [50;150]$ град./с.; $\alpha_{AK} \approx 90$ ел. град. – кут відпирання тиристорів ТРН, якому відповідає початок автоколивань параметрів в системі «ТРН-АД».

Доцільність такого рішення підтверджує діаграма (рис. 6), що отримана в результаті моделювання процесів у системі «ТРН-АД» при впровадженні закону зменшення заданого кута відпирання тиристорів ТРН відповідно до (4).

Вплив зазначеного вище процесу керування тиристорами ТРН (під час виконання повільного пуску АД) на параметри стійкості дільничного апарата захисту (АЗ) від витоків струму на землю може бути визначений дослідженням комп'ютерної моделі (рис. 7). Стосовно до процесу керованого (відповідно до (4) і рис. 6) включення відгалуження мережі з АД прийняті наступні припущення:

- лінійна номінальна напруга трифазної мережі – 660 В частоти 50 Гц;
- параметри ізоляції електромережі дільниці: $R_{iz}=40$ кОм/фазу, $C_{УТ1}+C_{УТ2}<1$ мкФ/фазу;
- ланцюг оперативного струму представлений відповідними елементами апарата АЗУР-4;
- апарат АЗУР-4 справцює при перевищенні напругою на реагуючому елементі (R_5) величини у 2,4 В (відповідно до технічної характеристики АЗУР-4).

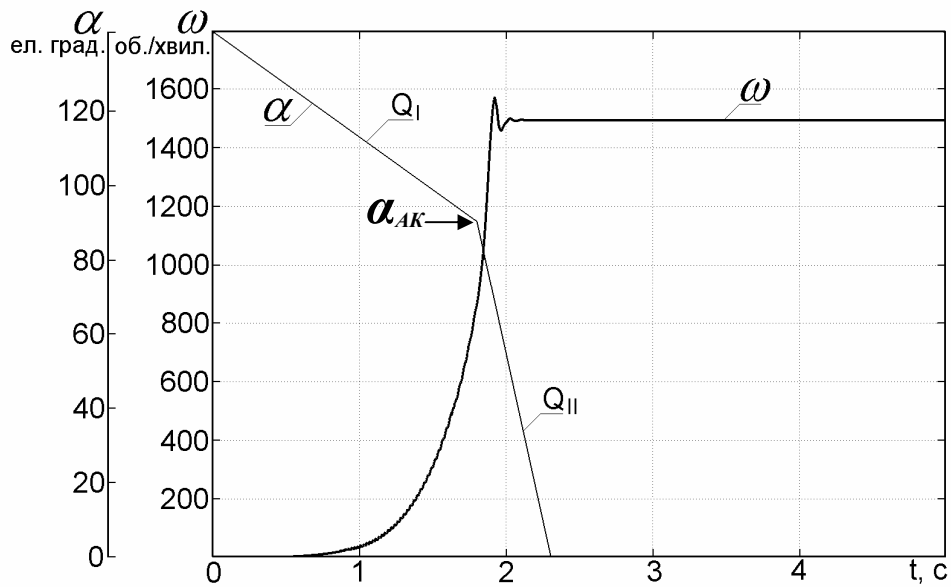


Рис. 6 – Діаграма зміни частоти обертання ротора (ω) в процесі повільного пуску АД при впровадженні двоетапної діаграми завдання кутів α відпирання тиристорів ТРН

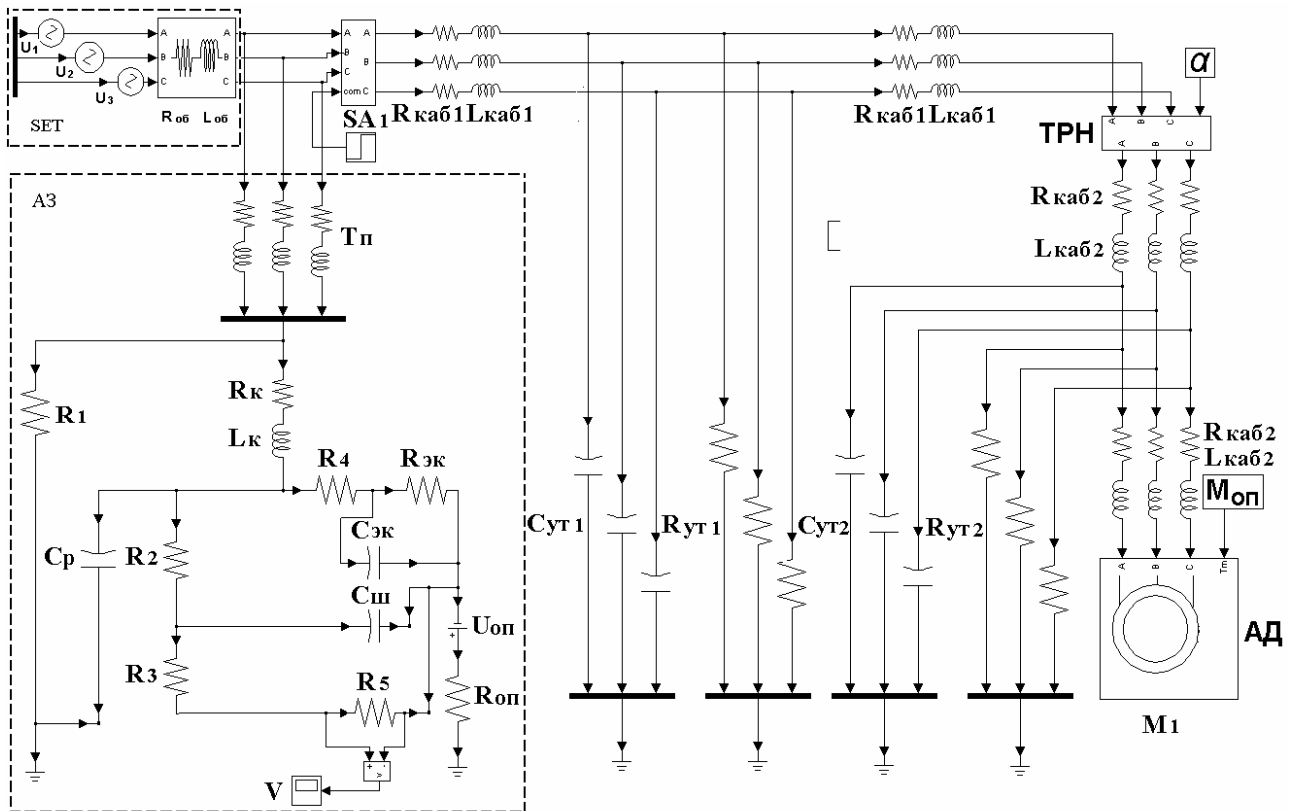


Рис. 7 – Розрахункова модель електротехнічного комплексу дільниці шахти з системою «ТРН-АД»

Моделюванням отримана залежність падіння напруги на реакуючому елементі АЗ (R_5) при двоетапному законі ($Q_I=28$ град./с, при $\alpha > \alpha_{AK}$ і $Q_{II}=150$ ел.

град./с при $\alpha \leq \alpha_{AK}$) зміни інтенсивності кута α відпирання тиристорів (рис. 8). Ці результати повністю узгоджуються з експериментальними даними (рис. 9)

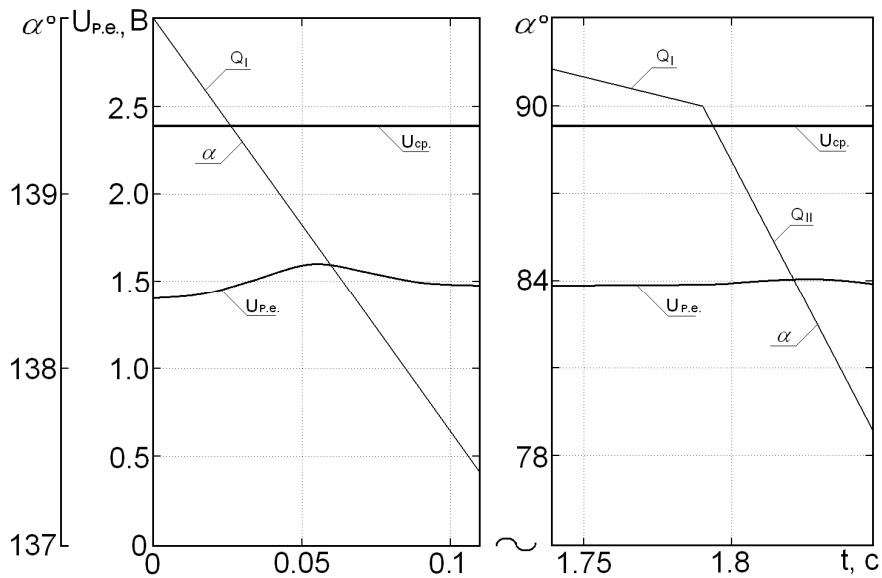


Рис. 8 – Залежність падіння напруги $U_{p.e.}$ на реагуючому елементі АЗ (R_3) при двоетапному зменшенні кута α відпирання тиристорів ТРН під час керування повільним пуском АД

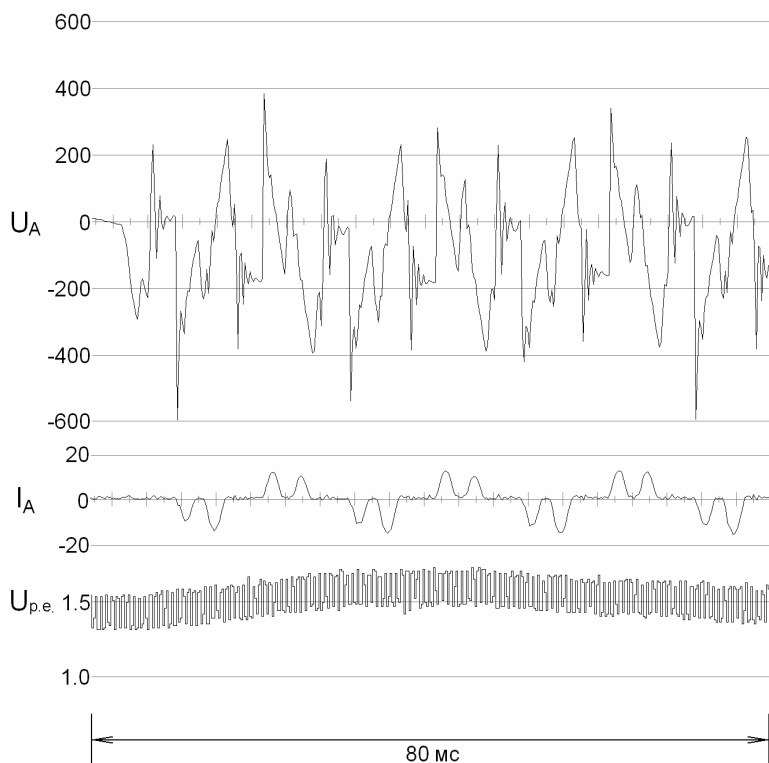


Рис. 9 – Осцилограма параметрів дільничного ЕТК під час керованого відповідно до (4) пуску АД в системі «ТРН-АД»:

U_A ; I_A – напруга і струм фази А; $U_{p.e.}$ – напруга на реагуючому елементі АЗ

Таким чином, застосування тиристорного регулятора напруги для уповільнення пуску АД за умови двоетапного закону зменшення кута α

відпирання тиристорів ТРН (під час розгону АД) не призведе до неприпустимого збільшення напруги (більш 2,4 В) на реагуючому елементі АЗ (серії АЗУР) і не впливатиме на стійкість параметрів цього захисту.

Висновки і напрями подальших досліджень. Дослідженням математичної і комп'ютерної моделей процесів в системі «ТРН-АД» встановлені діапазони параметрів управління та збурення, які обумовлюють наявність автоколивань електричних та електромеханічних параметрів в об'єкті дослідження. Обґрунтовано доцільність застосування двоетапного закону зміни кута α відкривання тиристорів ТРН під час уповільнення пуску АД, а саме підвищення інтенсивності зменшення α в діапазоні: $90 \geq \alpha \geq 0$ (ел. град.) на рівні $Q \geq 50$ ел. град./с. Встановлено, що зазначений спосіб управління ТРН в процесі уповільнення пуску АД не надаватиме впливу на стійкість параметрів апарату захисту від витоків струму на землю в шахтному дільничному електротехнічному комплексі.

Напрямом подальших досліджень слід вважати обґрунтування прийнятних параметрів керованого відключення АД шляхом повільного підвищення кута α відпирання тиристорів ТРН.

Перелік посилань

1. Тиристорные преобразователи напряжения для асинхронного электропривода./ [Петров Л. П., Андрущенко О.А., Капинос В.И., Подзолов Р.Г., Херунцев П.Э].- М.: Энергоатомиздат, 1986.- С. 36-41
2. Маренич К.М. Питання стійкості систем «тиристорний комутаційний апарат - асинхронний мотор» під час фазового регулювання напруги./ Маренич К.М.- К.: Ін-т електродинаміки. НАН України, 1993. - С.35-39 - (Теорія та моделі пристроїв вимірювальної і перетворювальної техніки) (Праці / Ін-т електродинаміки. НАН України)
3. Маренич К.Н. О влиянии параметров участковой электросети шахты на устойчивость работы аппарата АЗУР-4 при включении кабельного ответвления / Маренич К.Н., Руссиян С.А. - Донецьк «Юго-Восток» 2005. – С. 84-88, - (Взрывозащищённое электрооборудование) (Праці / УкрНДІВЕ)
4. Маренич К.Н. Исследование влияния переходных процессов при коммутации присоединения в электротехническом комплексе на устойчивость к ложным срабатываниям аппарата АЗУР-4/ Маренич К.Н., Руссиян С.А. - Луганськ, 2009.- С.52-57, - (Праці / Луганське відділення Міжнародної Академії інформатизації; вип. 1 (18))
5. Колосюк В.П. Защитное отключение рудничных электроустановок / Колосюк В.П. – М.: Недра, 1980.- С. 271-275