

УДК 621.647.1

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ГРУПОВОГО ВИБІГУ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ СПОЖИВАЧІВ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ДІЛЬНИЦІ ШАХТИ

Сивокобиленко В.Ф., докт. техн. наук, проф.;

Маренич К.М., канд. техн. наук, доц.;

Василець С.В. магістрант,

Донецький національний технічний університет

Складена та проаналізована математична модель електротехнічного комплексу дільниці шахти під час групового вибігу асинхронних двигунів після захисного відключення.

The mathematical model of the mines local electrotechnical system during a free movement of asynchronous engines after its switching-off was made up and analysed.

Актуальність проблеми та її зв'язок з прикладними задачами. Електротехнічний комплекс дільниці вугільної шахти являє собою сукупність асинхронних двигунів (АД) споживачів, кабельних ліній та комутаційної апаратури. Специфічні умови експлуатації підземного електрообладнання та кабелів є причиною частих аварій, які призводять до ураження людей електричним струмом, пожеж та вибухів [1,2]. З метою забезпечення високого рівня безпеки підземних електроустановок використовуються різноманітні пристрої автоматичного захисту [1], які забезпечують відключення мережі за визначений Правилами безпеки час. Однак, характерною рисою АД є генерування ЕРС обертання впродовж деякого часу після відключення [1, 3], що негативно впливає на забезпечення електробезпеки у разі виникнення аварійної ситуації.

У зв'язку з цим актуальним є дослідження процесів у електротехнічному комплексі дільниці шахти під час групового вибігу АД споживачів після захисного відключення мережі, оскільки це дозволить обґрунтувати вимоги та структуру перспективного автоматичного захисту від негативного впливу ЕРС обертання на аварійну точку електромережі.

Аналіз досліджень та публікацій. Загальний підхід до математичного описання групового вибігу АД викладений в [3], однак наведені залежності не враховують, по-перше, зміну швидкості обертання

роторів АД з часом, по-друге, наявність кабельних ліній, що з'єднують елементи електромережі. В [1] вказується негативний вплив ЕРС обертання двигунів на дотримання параметрів електробезпеки під час виникнення аварійних ситуацій.

Постановка задачі. Задачею досліджень є обґрунтування математичної моделі, що описує процеси в електротехнічному комплексі технологічної дільниці шахти під час групового вибігу АД споживачів різної потужності.

Основний матеріал та результати досліджень. Схема електро-

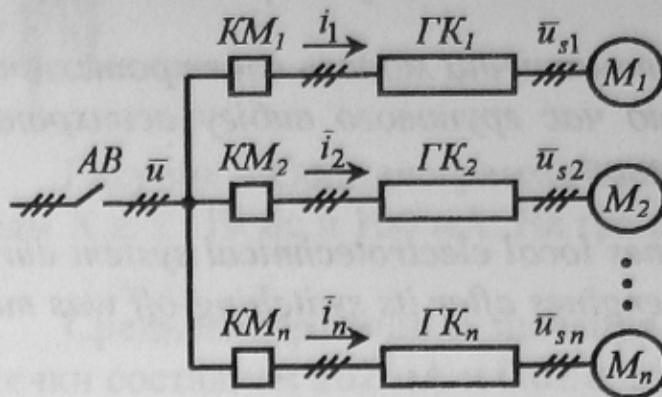


Рис.1. Схема електромеханічного комплексу дільниці шахти під час групового вибігу АД

ромеханічного комплексу дільниці шахти під час групового вибігу АД наведена на рис. 1. Прийняті наступні позначення: AB - автоматичний вимикач; KM_1, \dots, KM_n - контактори магнітних пускатів; $ГК_1, \dots, ГК_n$ - гнучкі кабелі. На рис. 1 також вказані такі просторові вектори: \bar{u} - напруги у загальній частині мережі; $\bar{u}_{s1}, \dots, \bar{u}_{sn}$ - на-

пруги на затискачах двигунів M_1, \dots, M_n відповідно; $\bar{i}_1, \dots, \bar{i}_n$ - зрівнювальні струми у ланцюгах АД споживачів.

На рис. 2 наведена схема заміщення ланцюга i -го споживача. На цій схемі, окрім загальноприйнятих позначень Т-подібної схеми заміщення АД, R_{ki} , L_{ki} позначають активний опір та індуктивність фази гнучкого кабелю $ГК_i$ довжиною l_{ki} . Усі подальші розрахунки здійснюватимуться у системі координат статора асинхронного двигуна ($\omega_k = 0$) та для еквівалентних дво полюсних машин.

Диференційне рівняння, що описує перехідні процеси у гнучкому кабелі, згідно позначень схеми заміщення (рис. 2) має вигляд:

$$\bar{u} = \bar{u}_{si} + \bar{i}_i R_{ki} + L_{ki} \frac{d\bar{i}_i}{dt}. \quad (1)$$

Переходячи до потокозчеплення $\bar{\psi}_{ki} = L_{ki} \cdot \bar{i}_i$ та вводячи коефіцієнт затухання $\alpha_{ki} = R_{ki} / L_{ki}$ в операторній формі матимемо:

$$\bar{u} = \bar{u}_{si} + \alpha_{ki} \bar{\psi}_{ki} + p [\bar{\psi}_{ki} - \bar{\psi}_{ki}(0)]. \quad (2)$$

Вектор струму \bar{i}_i зв'язан з потокозчепленнями АД виразом:

$$\bar{i}_i = (\bar{\psi}_{si} - k_{ri}\bar{\psi}_{ri})/L'_{si}. \quad (3)$$

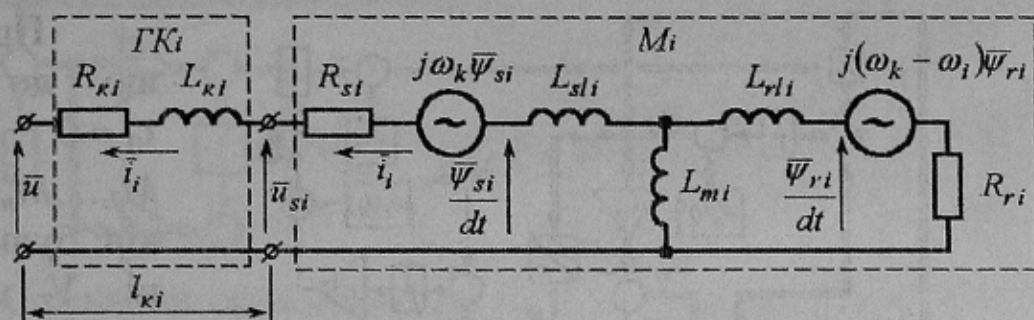


Рис.2. Схема заміщення ланцюга i -го споживача

Для потокозчеплення $\bar{\psi}_{\kappa i}$ виконується співвідношення:

$$\bar{\psi}_{\kappa i} = L_{\kappa i} \cdot \bar{i}_i = L_{\kappa i} (\bar{\psi}_{si} - k_{ri}\bar{\psi}_{ri})/L'_{si}. \quad (4)$$

Приймаються наступні позначення:

$$\begin{aligned} d_{1i} &= R_{si}/L'_{si}; d_{2i} = k_{ri} R_{si}/L'_{si}; d_{3i} = k_{si} R_{ri}/L'_{ri}; d_{4i} = R_{ri}/L'_{ri}; \\ d_{5i} &= 1,5 L_{mi}/(L_{si}L'_{ri}); d_{6i} = L_{\kappa i}/L'_{si}; d_{7i} = k_{ri} L_{\kappa i}/L'_{si}, \end{aligned} \quad (5)$$

де L'_{si} , L'_{ri} , k_{si} , k_{ri} - перехідні індуктивності та коефіцієнти зв'язку відповідно статора і ротора i -го двигуна.

Переходячи до зображень за Лапласом, для схеми заміщення АД, враховуючи (2), (4) і (5), запишемо відомі рівняння [3] в координатах $\bar{\psi}_s - \bar{\psi}_r$:

$$\left\{ \begin{aligned} \bar{u}_{si} &= \bar{u} - \alpha_{\kappa i} \cdot \bar{\psi}_{\kappa i} - p[\bar{\psi}_{\kappa i} - \bar{\psi}_{\kappa i}(0)] ; \\ \bar{\psi}_{si} &= \frac{1}{p}(\bar{u}_{si} - d_{1i} \cdot \bar{\psi}_{si} + d_{2i} \cdot \bar{\psi}_{ri}) + \bar{\psi}_{si}(0); \\ \bar{\psi}_{ri} &= \frac{1}{p}[d_{3i} \cdot \bar{\psi}_{si} - (d_{4i} - j\omega_i)\bar{\psi}_{ri}] + \bar{\psi}_{ri}(0); \\ \bar{\psi}_{\kappa i} &= d_{6i} \cdot \bar{\psi}_{si} - d_{7i} \cdot \bar{\psi}_{ri}; \\ M_i &= d_{5i} \cdot \text{Im}\{\bar{\psi}_{ri} \cdot \bar{\psi}_{si}\}; \\ \omega_i &= \frac{1}{p} \cdot \frac{M_i - M_{mexi}}{J_i} + \omega_i(0). \end{aligned} \right. \quad (6)$$

Отримана система (6) являє собою математичну модель ланцюга i -го АД з урахуванням параметрів відповідного гнучкого кабелю. Структурна схема моделі, що відповідає цій системі рівнянь, наведена на рис. 3. Сукупність таких моделей для всіх n споживачів буде

використана при моделюванні перехідного процесу в електромеханічній системі дільниці, що пов'язаний із вимкненням АВ.

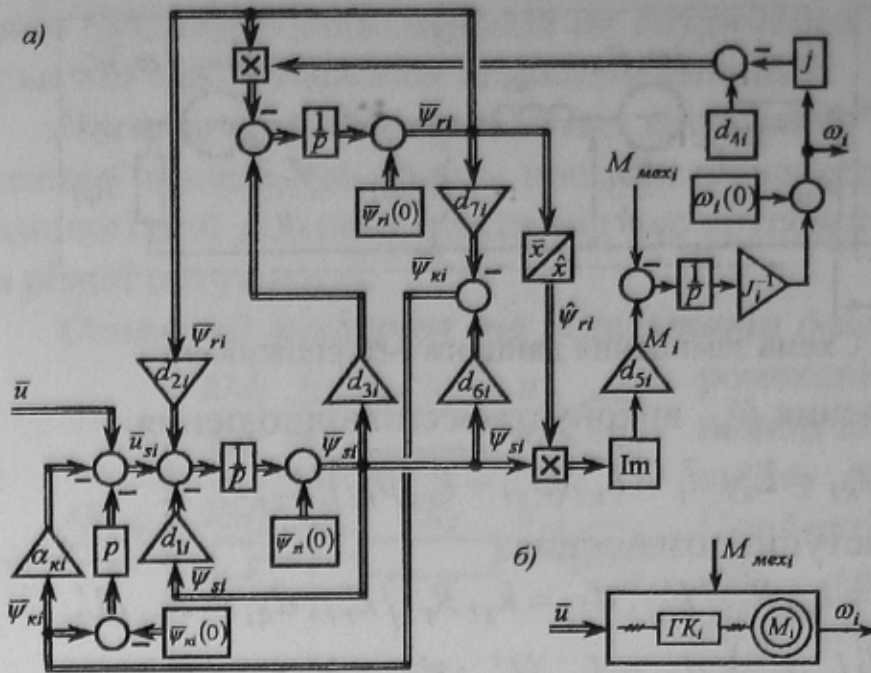


Рис. 3. Структурна схема моделі "ГК – АД": а) розгорнутий вигляд; б) єдиним блоком

Припустимо, що до моменту $t_0 = 0$ двигуни M_1, \dots, M_n споживачів були ввімкнені. У момент t_0 зникає живляча напруга й M_1, \dots, M_n переходять до режиму групового вибігу, який триває до відключення контакторів магнітних пускачів захистом мінімальної напруги.

Починаючи з моменту t_0 в електромережі спостерігається примусове зрівняння напруги на затискачах контакторів KM_1, \dots, KM_n , внаслідок чого між двигунами споживачів протікають зрівнювальні струми $\bar{i}_1, \dots, \bar{i}_n$, алгебраїчна сума яких дорівнює нулю:

$$\bar{i} = \sum_{i=1}^n \bar{i}_i = 0. \quad (7)$$

Кожен зрівнювальний струм \bar{i}_i може бути записаний за допомогою операторної провідності ланцюга відповідного двигуна:

$$\bar{i}_i = Y_i(p) \cdot \bar{u}. \quad (8)$$

Оскільки при груповому вибігу $\bar{u} \neq 0$, то згідно (7) запишемо:

$$\sum_{i=1}^n Y_i(p) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{Z_i(p)} = 0, \quad (9)$$

де $Z_i(p) = Z_{\delta vi}(p) + Z_{\kappa i}(p)$ - операторний опір i -го ланцюга мережі; $Z_{\delta vi}(p)$, $Z_{\kappa i}(p)$ - операторні опори відповідно i -го двигуна та ΓK_i .

У нерухомій системі координат ($\omega_k = 0$) операторний опір АД визначається наступним чином [3]:

$$Z_{\delta vi}(p) = R_{si} + pL_{si} \frac{(p - j\omega_i)T'_{ri} + 1}{(p - j\omega_i)T_{r0i} + 1}, \quad (10)$$

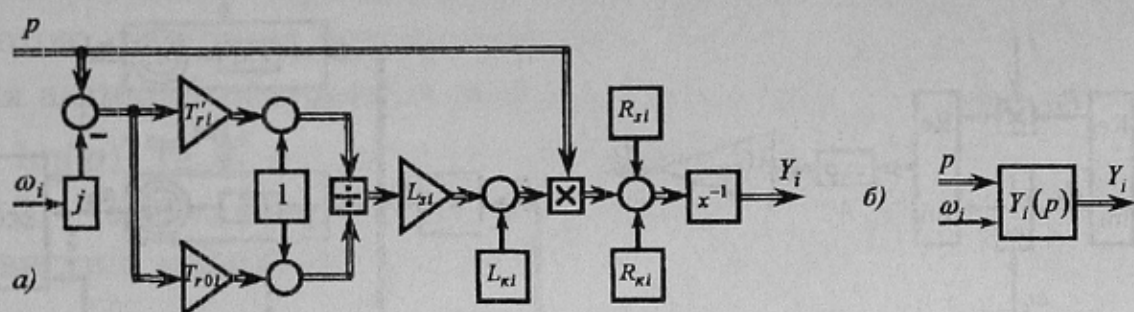


Рис. 4. Структурна схема моделі для визначення операторної провідності i -го ланцюга мережі: а) розгорнутий вигляд; б) єдиним блоком

де T'_{ri} - перехідна стала часу ротора; T'_{roi} - стала часу, що відповідає ідеальному холостому ходу при живленні з ротора.

Операторний опір гнучкого кабеля із зазначеними вище параметрами можна записати:

$$Z_{\kappa i} = R_{\kappa i} + pL_{\kappa i}. \quad (11)$$

З урахуванням наведених залежностей запишемо вираз для відшукування операторної провідності i -го ланцюга мережі:

$$Y_i(p) = \left\{ R_{si} + R_{\kappa i} + p \left[L_{si} \frac{(p - j\omega_i)T'_{ri} + 1}{(p - j\omega_i)T'_{roi} + 1} + L_{\kappa i} \right] \right\}^{-1}. \quad (12)$$

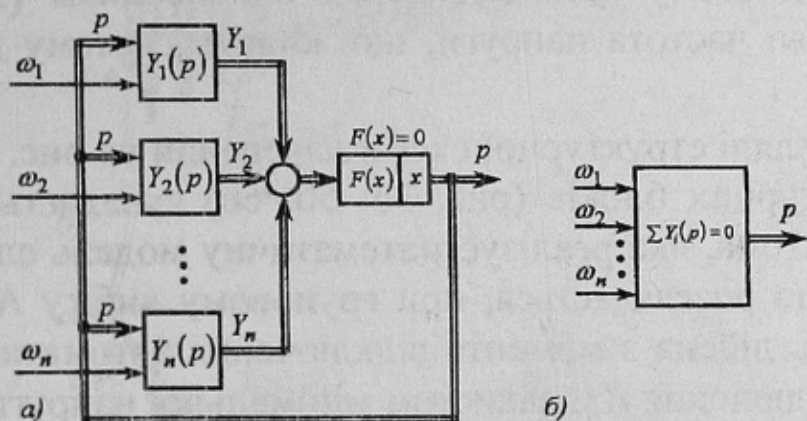


Рис. 5. Структурна схема моделі для визначення p : а) розгорнутий вигляд; б) єдиним блоком

всіх n двигунів системи під час вибігу, вихідною – комплексна величина p , тобто блок (рис. 5б) встановлює залежність:

$$p = \varphi(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n). \quad (13)$$

Оскільки частоти обертання роторів під час вибігу змінюються з часом, то величина $p = p_1 + jp_2$ залежить від t : $p = p(t)$. Це свідчить про те, що $p_2(t)$ є модулюючим сигналом для частоти напруги \bar{u} .

Структурна схема моделі, згідно виразу (12), для відшукування операторної провідності $Y_i(p)$, наведена на рис. 4.

На рис. 5 наведена структурна схема моделі, що реалізує залежність (9). Вхідними величинами моделі є частоти обертання роторів

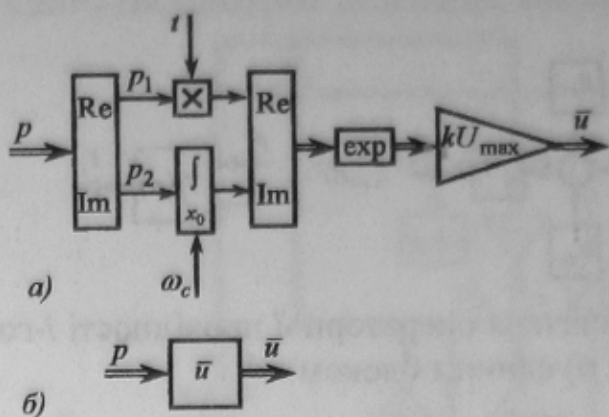


Рис. 6. Структурна схема моделі для визначення \bar{u} : а) розгорнутий вигляд; б) єдиним блоком

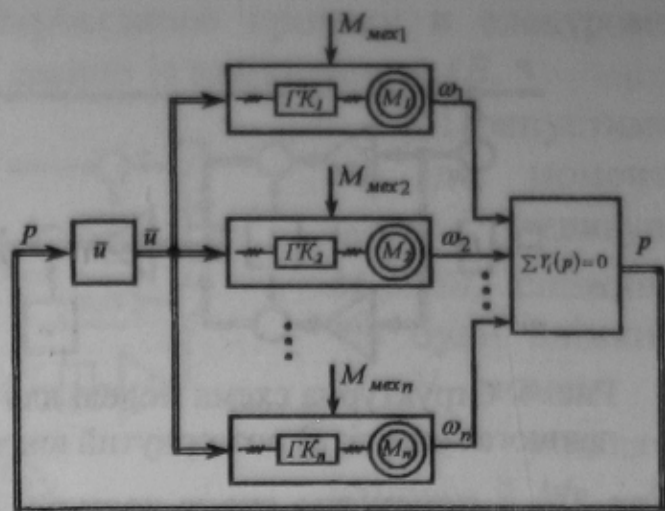


Рис. 7. Узагальнена структурна схема моделі електротехнічної системи дільниці при груповому вибігу АД

Вектор напруги у загальній частині мережі, амплітуда якого зменшується за експоненціальним законом, враховуючи частотну модуляцію, визначається наступним співвідношенням:

$$\bar{u} = kU_{\max} \exp \left[p_1 t + j \int_0^t p_2 dt \right] = f(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_i, \dots, \omega_n), \quad (14)$$

де k - коефіцієнт, що змінюється від 0,83 при номінальному навантаженні до 0,95 при холостому ході АД перед відключенням [3]; $p_2(t_0) = p_2(0) = \omega_c$ - колова частота напруги, що живить систему до момента відключення.

Останній вираз у вигляді структурної схеми наведений на рис. 6.

З отриманих структурних блоків (рис. 3б, 5б, 6б) складається узагальнена структурна схема, яка реалізує математичну модель електротехнічної системи, що розглядається, при груповому вибігу АД (рис. 7). Наведена модель дійсна з моменту відключення автоматичного вимикача АВ до відключення КМ захистом мінімальної напруги.

Згідно розробленої моделі для конкретних параметрів елементів системи (табл. 1) за допомогою обчислювальної техніки були проведені три досліди за умови різної кількості ланцюгів та різних потужностей АД. Заради спрощення розрахунків приймається, що КМ залишаються ввімкнені до повної зупинки всіх АД. В результаті моделювання були отримані діаграми (рис. 8) у відносних одиницях (в.о.).

Аналіз отриманих діаграм дозволяє встановити наступне.

1. При груповому вибігу один (або кілька) двигунів переходять до генераторного режиму роботи (ГР), інші знаходяться у руховому

режимі (РР). Про перехід АД до ГР свідчить, по-перше, перевищення частотою обертання ротора величини $\text{Im}(p)$, по-друге, від'ємне значення активної потужності двигуна. Наприклад, у випадку рис. 8, а: $\omega_2^* > \text{Im}(p)^*$ та $P_2^* < 0$, отже M_2 знаходиться у ГР.

2. Частота напруги, що обумовлена спільною дією ЕРС обертання двигунів мережі під час вибігу, визначається сукупною дією час-

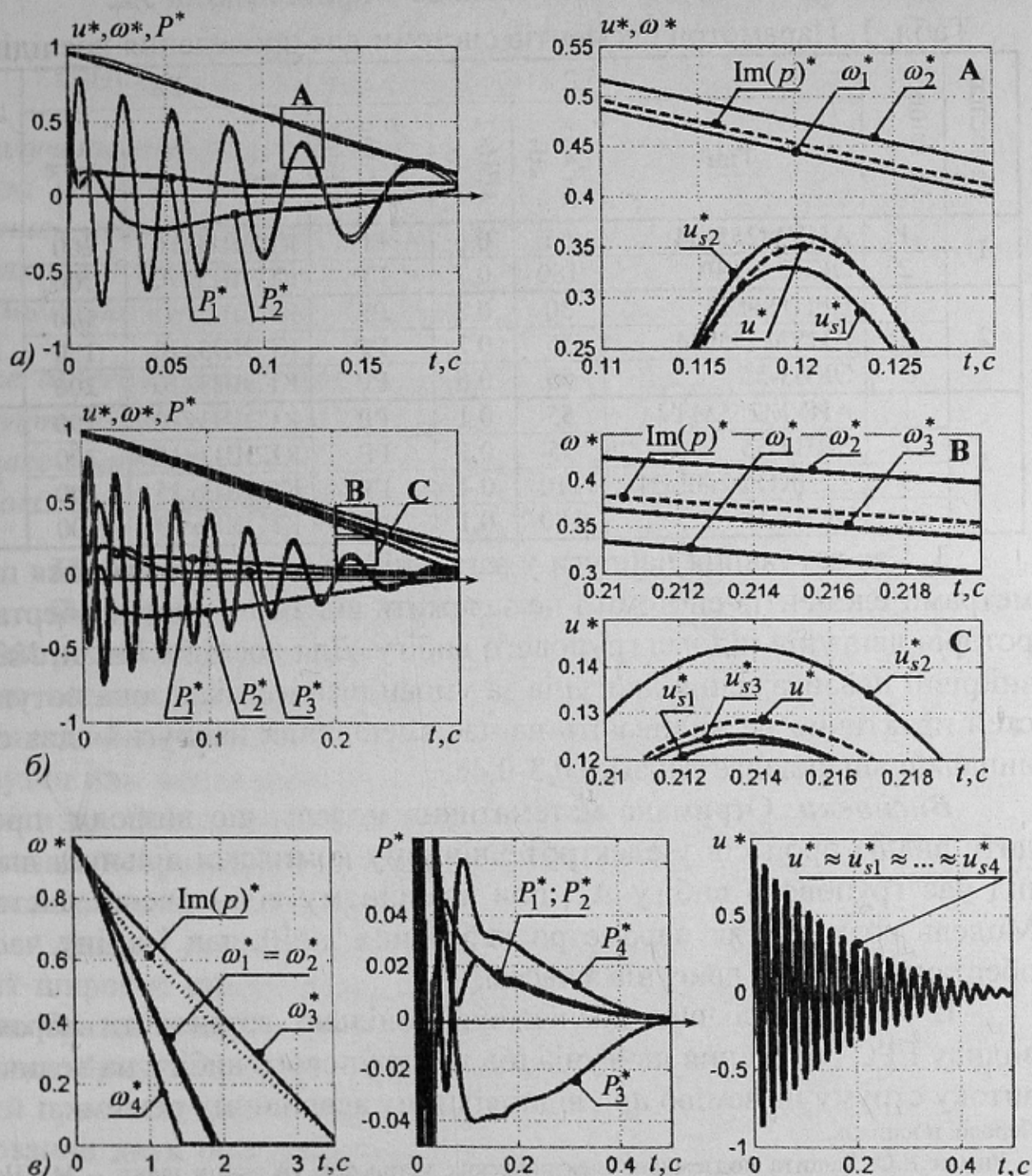


Рис. 8. Діаграми, отримані за допомогою розробленої моделі, що характеризують вибіг 2х (а), 3х (б) та 4х (в) АД з урахуванням параметрів ГК: u^* - напруга, в.о.; ω^* - частота обертання, в.о.; P^* - активна потужність двигуна, в.о.

тот обертання роторів усіх вказаних АД. Характер зміни ω_i^* , в свою чергу, залежить від навантаження та узагальненого коефіцієнту інерції двигунів системи. Наприклад, у випадку дослідів №2 (рис. 8, б) величина $\text{Im}(p)^*$ знижується до 0 за 0,3 с при навантаженні двигунів $0,5 \div 0,7M_n$, а у випадку дослідів №3 (рис. 8, в) навантаження АД складає $0,1M_n$ і $\text{Im}(p)^*$ зменшується до 0 приблизно за 3 с.

Табл. 1. Параметри елементів системи для проведення дослідів

№ дослідів	№ ланцюга	АД				ГК		Рисунок
		Тип	P_n , кВт	M/M_n , в.о.	Режим під час вибігу	Тип	lk , м	
1	1	АИУМ255М4	55	0,6	РР	КГЭШЗх10	200	8,а
	2	ЭКВЗ,5-180	180	0,7	ГР	КГЭШЗх70	300	
2	1	ВРП180М4	30	0,5	РР	КГЭШЗх6	100	8,б
	2	АИУМ255М4	55	0,7	ГР	КГЭШЗх10	150	
	3	ЭКВЗ-55	55	0,6	РР	КГЭШЗх10	200	
3	1	АИУМ255М4	55	0,1	РР	КГЭШЗх10	150	8,в
	2	ЭКВЗ-55	55	0,1	РР	КГЭШЗх10	200	
	3	2ЭДКОФ250LB4	110	0,1	ГР	КГЭШЗх25	100	
	4	ЭКВЗ-180	180	0,1	РР	КГЭШЗх70	300	

3. Час затухання напруги у загальній мережі визначається параметрами елементів системи і не залежить від зміни частот обертання роторів двигунів під час групового вибігу. Для дослідів №2 та №3 різні рівні навантаження двигунів за умови різного діапазона потужностей практично не впливають на час зменшення напруги – для обох випадків він складає близько 0,3-0,4с.

Висновки. Отримана математична модель, що дозволяє проводити аналіз процесів у електротехнічному комплексі дільниці шахти під час групового вибігу АД при аварійному відключенні системи. Модель враховує як параметри кабельних ліній, так і зміну частот обертання роторів двигунів з часом.

В ході подальших досліджень доцільно встановити характер впливу ЕРС обертання двигунів під час групового вибігу на величину витоку струму на землю при відповідному аварійному режимі.

Перелік посилань.

1. Риман Я.С. Защита подземных электрических установок угольных шахт. – М.: Недра, 1977, 206с.
2. Полесин Я.Л. Причины аварий и травматизма в горной промышленности. М., Недра, 1969.
3. Ковач К.П., Рац. И. Переходные процессы в машинах переменного тока. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1963.- 744 с.