ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОДИНАМІКИ
НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ

ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ СИСТЕМИ ПІДВИЩЕНОЇ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ДЛЯ ОБ'ЄКТІВ ПРОМИСЛОВОСТІ ТА ТРАНСПОРТУ

ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОДИНАМІКИ НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ

КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ МИХАЙЛА ОСТРОГРАДСЬКОГО МІНІСТЕРСТВА ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Наукова робота
на здобуття Премії Президента України
для молодих учених в 2022 році

ШИХНЕНКО Максим Олегович
РИЖКОВ Олександр Михайлович
НОЖЕНКО Вікторія Юріївна
СЬОМКА Олександр Олександрович

МЕТА, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Мета роботи – розвиток теорії електричних машин та теорії електроприводу за рахунок розробки математичних моделей, методів і принципів керування, побудови, контролю і діагностики для підвищення енергоефективності і надійності електромеханічних систем на основі електричних машин вентильно-індукторного та асинхронного типу при застосуванні в промисловості та транспорті.

Об'єктом дослідження є електромеханічні системи на основі асинхронних та вентильно-індукторних машин.

Предмет дослідження – квазіусталені та перехідні процеси, методи керування, контролю та діагностики електромеханічних систем.

СТРУКТУРА НАУКОВОЇ РОБОТИ

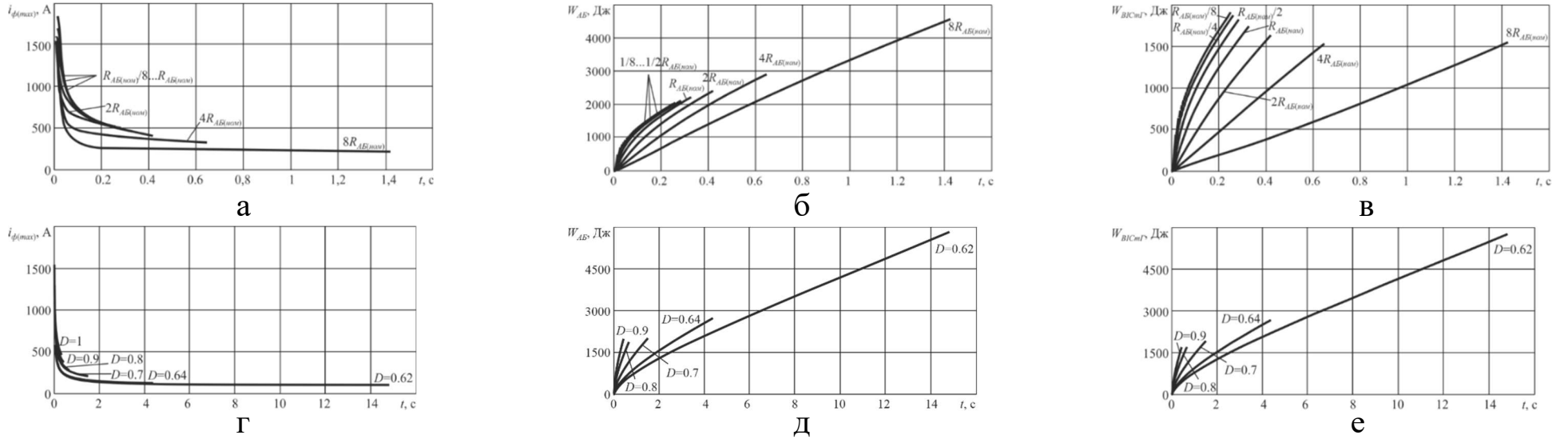
– Математичне моделювання електромеханічних систем об'єктів промисловості та транспорту:
  - розробка математичної моделі вентильно-індукторного стартер-генератора;
  - розробка математичних моделей електроприводу крана-маніпулятора;
  - моделювання зарезонансної вібраційної машини (вібраційної площадки).

– Дослідження процесів в електромеханічних системах об'єктів промисловості та транспорту:
  - дослідження стартерного і генераторного режимів вентильно-індукторного стартер-генератора;
  - апробація запропонованої моделі для аналізу показників якості керування електроприводами крана-маніпулятора;
  - дослідження процесів зарезонансної вібраційної машини;
  - дослідження показників надійності асинхронних двигунів.

Математична модель та стартерний режим вентильно-індукторного стартер-генератора

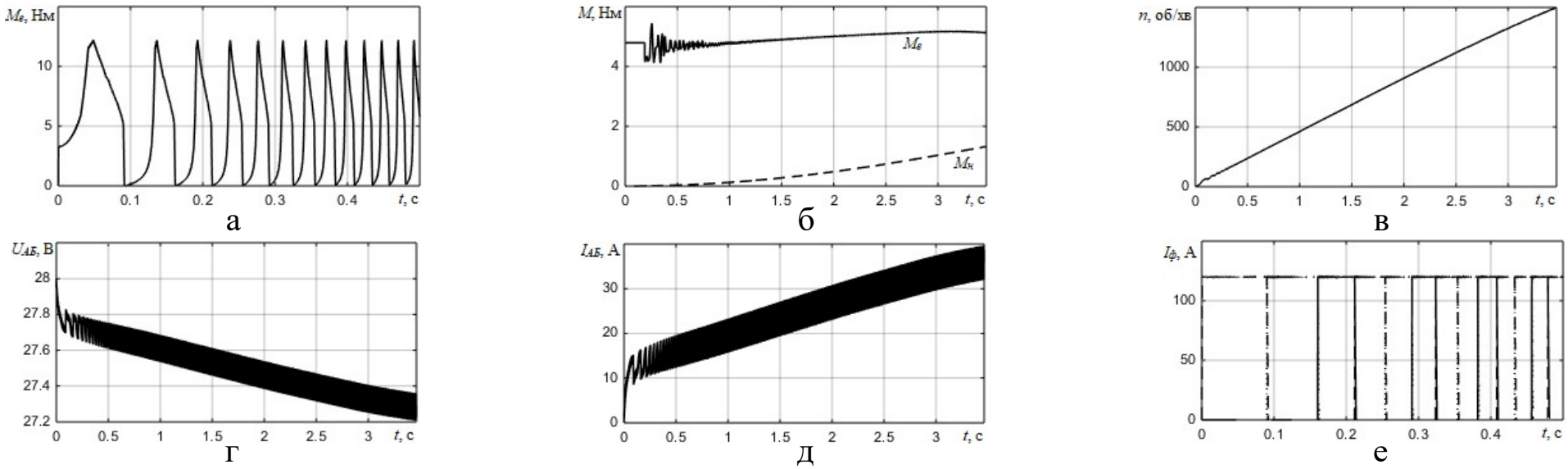
Розроблено математичну модель вентильно-індукторного стартер-генератора (ВІСтГ), яка складається з моделей індукторної машини, вентильного перетворювача, акумуляторної батареї (АБ), навантаження газотурбінного двигуна та системи керування. При цьому прийнято наступні припущення для основних структурних елементів, які дозволяють значно спростити їх математичний опис, але які практично не змінюють якісного характеру процесів при деякому кількісному відхиленні від їх дійсного характеру: напівпровідникові елементи вентильного перетворювача представлено ідеальними безінерційними елементами; конденсатор – таким, що не містить паразитних індуктивностей та ємність якого незмінна; акумуляторна батарея безкінечно великої ємності, внутрішній опір якої незмінний; обмотки індукторної машини ідентичні та симетричні; між фазами індукторної машини відсутня взаємоіндукція; не враховується зміна температури обмотки.

Математична модель індукторної машини представлена рівняннями контурів статора, електромагнітного моменту, руху та кута повороту ротора. Однією з особливостей цієї моделі є врахування нелінійності магнітної системи за рахунок використання залежності індуктивності від фазного струму та кута повороту, яка отримана із розрахунку геометрії машини польовими методами. Математична модель вентильного перетворювача включає рівняння елементів кола постійного струму (конденсатора і, в залежності від режиму роботи, навантаження або акумуляторної батареї) та рівняння зв’язку між ним та індукторною машиною. Математична модель системи керування складається із виразів, котрі визначають керуючі сигнали, за якими встановлюється стан напівпровідникових елементів вентильного перетворювача.



Огинаючі максимальних значень фазних струмів (а, г) та часові залежності загальної (б, д) та корисної (в, е) енергії при пуску ВІСтГ за зміни опору акумуляторної батареї (а-в) та широтно-імпульсного регулювання фазної напруги (г-е)

Стартерний режим вентильно-індукторного стартер-генератора



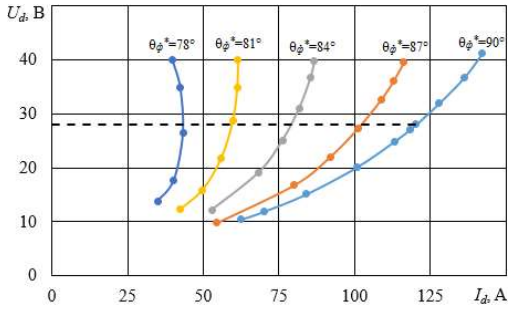
Часові залежності миттєвого (а) та середнього електромагнітного моменту M_e (б), моменту опору $M_н$ (б) та частоти обертання (в), осцилограми напруги (г) і струму акумуляторної батареї (д) та фазного струму (е) вентильно-індукторного стартер-генератора при пуску із обмеженням рівня фазного струму

Узагальнені результати досліджень стартерних режимів за зміни параметрів ВІСтГ та АБ в порівнянні з пуском при номінальних параметрах наведені в таблиці, де $W_{АБ}$ – повні витрати енергії АБ; $W_{ВІСтГ}$ – енергія спожита стартером; $W_{вт}$ – енергія втрат; $P_{АБ}$ – споживана потужність; $W_{АБ(ном)}$=2067 Дж, $W_{ВІСтГ(ном)}$=1708 Дж, $W_{вт(ном)}$=359 Дж; $P_{АБ(ном)}$=5138 Вт – значення енергій та потужності при номінальних параметрах.

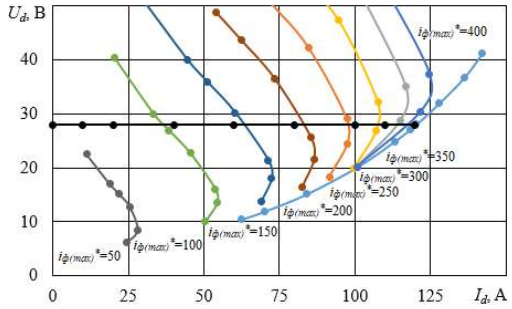
Параметри	Відношення $W_{АБ}/W_{АБ(ном)}$, в.о.	Відношення $W_{ВІСтГ}/W_{ВІСтГ(ном)}$, в.о.	Відношення $W_{вт}/W_{вт(ном)}$, в.о.	Відношення $P_{АБ}/P_{АБ(ном)}$, в.о.
$R_{АБ}=R_{АБ(ном)}/8$	0,927	1,093	0,135	1,414
$R_{АБ}=R_{АБ(ном)}/4$	0,937	1,077	0,269	1,336
$R_{АБ}=R_{АБ(ном)}/2$	0,955	1,045	0,527	1,204
$R_{АБ}=2\cdot R_{АБ(ном)}$	1,1	0,943	1,847	0,739
$R_{АБ}=4\cdot R_{АБ(ном)}$	1,34	0,887	3,5	0,456
$R_{АБ}=8\cdot R_{АБ(ном)}$	2,168	0,914	8,136	0,213
D=0,62, f=20 кГц	2,81	3,366	0,162	0,075
D=0,64, f=20 кГц	1,315	1,566	0,121	0,119
D=0,7, f=20 кГц	0,966	1,129	0,191	0,249
D=0,8, f=20 кГц	0,892	1	0,376	0,498
D=0,9, f=20 кГц	0,935	0,993	0,655	0,766

Параметри	Відношення $W_{АБ}/W_{АБ(ном)}$, в.о.	Відношення $W_{ВІСтГ}/W_{ВІСтГ(ном)}$, в.о.	Відношення $W_{вт}/W_{вт(ном)}$, в.о.	Відношення $P_{АБ}/P_{АБ(ном)}$, в.о.
$i_{ф(max)}$=60 А	3,768	4,53	0,144	0,05
$i_{ф(max)}$=70 А	2,015	2,42	0,09	0,058
$i_{ф(max)}$=80 А	1,613	1,931	0,1	0,081
$i_{ф(max)}$=100 А	1,289	1,538	0,103	0,104
$i_{ф(max)}$=140 А	1,045	1,238	0,125	0,154
$i_{ф(max)}$=160 А	0,987	1,166	0,136	0,177
$i_{ф(max)}$=180 А	0,948	1,117	0,148	0,2
$i_{ф(max)}$=200 А	0,922	1,082	0,162	0,224
$i_{ф(max)}$=300 А	0,865	0,996	0,242	0,35
$i_{ф(max)}$=400 А	0,862	0,97	0,346	0,492
$i_{ф(max)}$=500 А	0,88	0,966	0,47	0,636
$i_{ф(max)}$=600 А	0,907	0,974	0,589	0,757

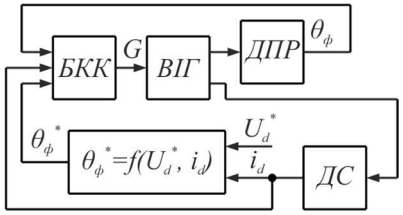
Генераторний режим вентильно-індукторного стартер-генератора



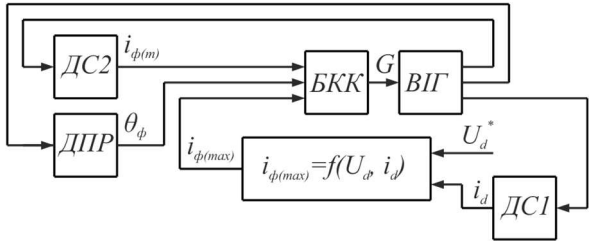
а



б



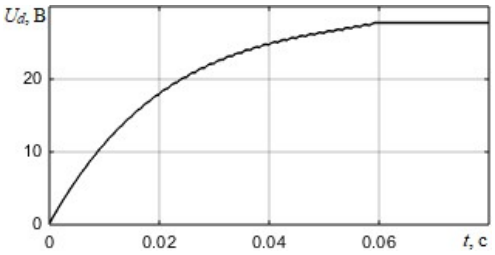
в



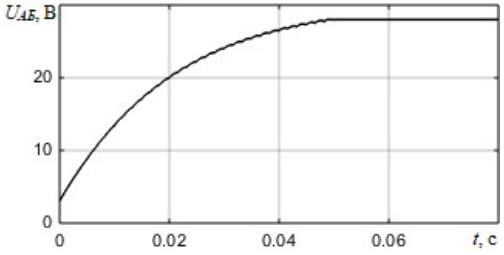
г

Зовнішні характеристики вентильно-індукторної машини в генераторному режимі при зміні кутів комутації (а) і рівня обмеження фазного струму (б) та структурні схеми системи керування при стабілізації вихідної напруги зміною кутів комутації (в), та рівнем обмеженням фазного струму (г)

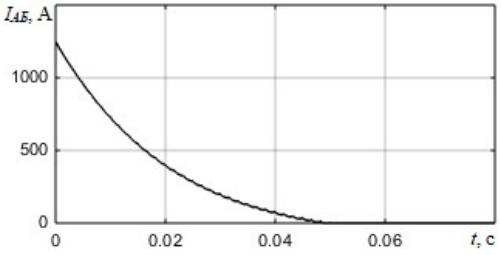
БКК – блок керування комутацією; *ДПР* – датчик положення ротора; *ПІ* – пропорційно-інтегральний регулятор.
ДС – датчик струму; *ДН* – датчик напруги;



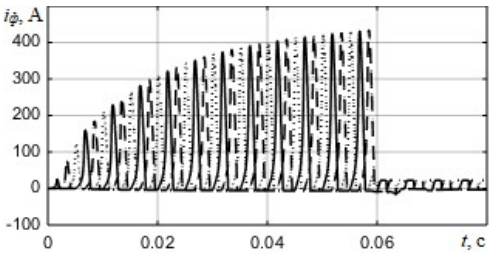
а



б

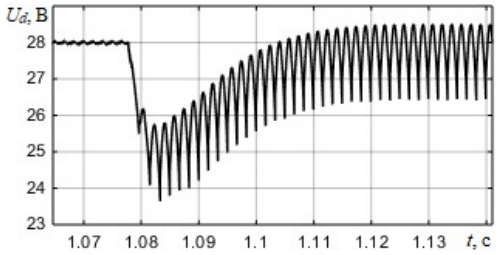


в

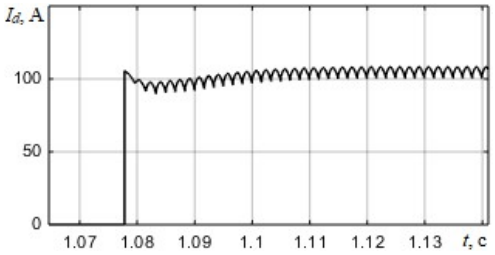


г

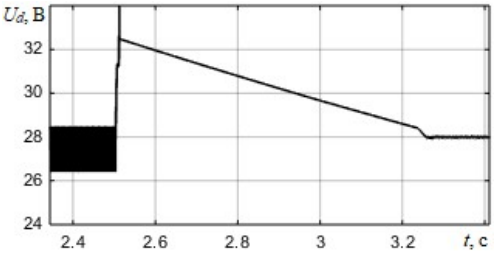
Осцилограми перехідного процесу збудження вентильно-індукторної машини в генераторному режимі від акумуляторної батареї: вихідна напруга (а), напруга (б) і струм акумуляторної батареї (в) та фазний струм (г)



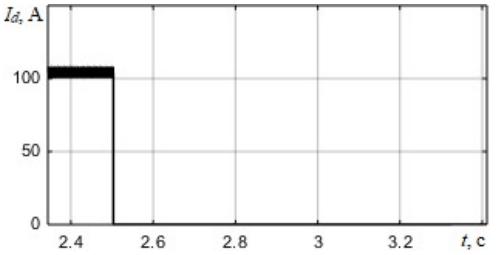
а



б



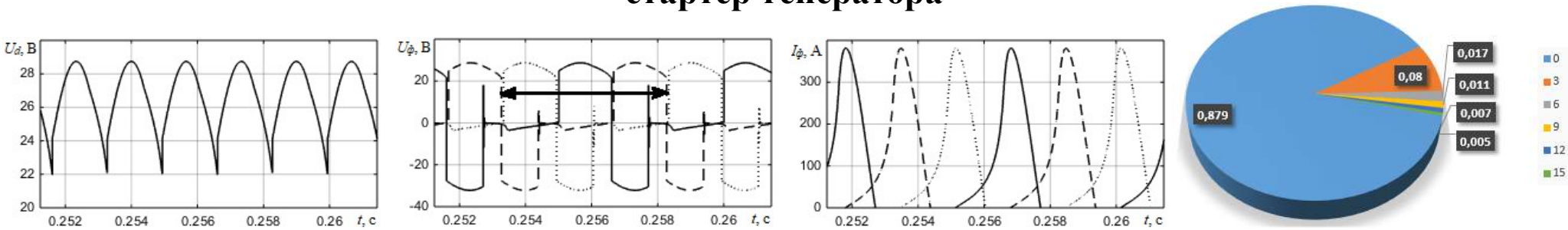
в



г

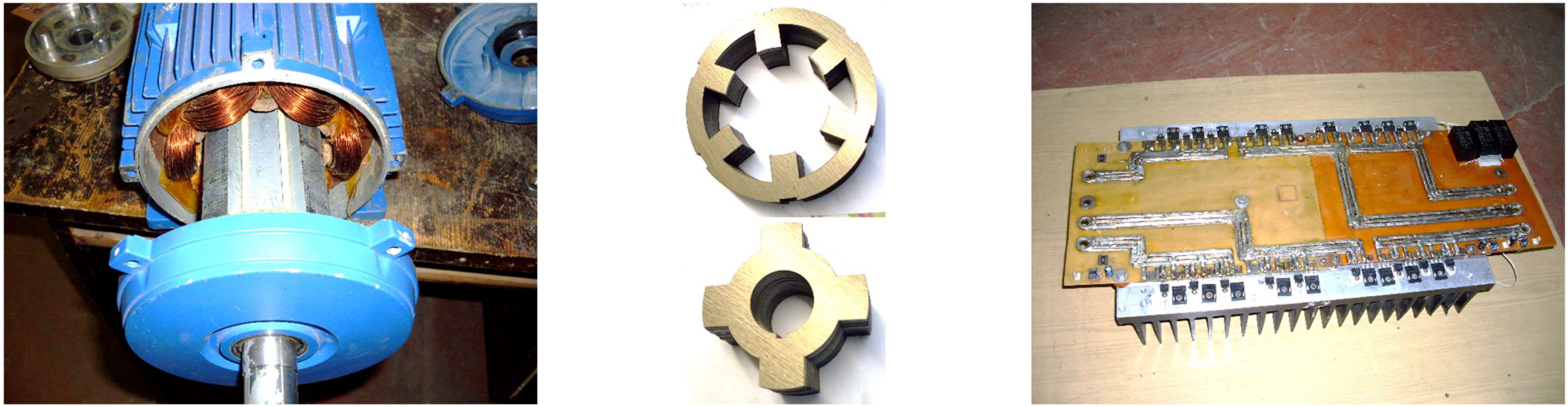
Осцилограма перехідного процесу накидання (а, б) та скидання (в, г) номінального навантаження при ємності конденсатора С=0,1 Ф: напруга (а, в) та струм (б, г) навантаження

Генераторний режим та експериментальний зразок вентильно-індукторного стартер-генератора



а б в г

Осцилограми квазісталих режимів генераторного режиму вентильно-індукторної машини: вихідна напруга (а), фазна напруга (б) та фазний струм (в) та кругова діаграма гармонійного складу вихідної напруги при ємності конденсатора С=0,03 Ф (г)



а б в

Експериментальний зразок вентильно-індукторного стартер-генератора: загальний вигляд (а), фрагменти статорного та роторного пакетів (б), вентильний перетворювач (в)

Технічні характеристики

Номінальні дані: потужність – 3 кВт, напруга - 28 В, частота обертання - 3000 об/хв.

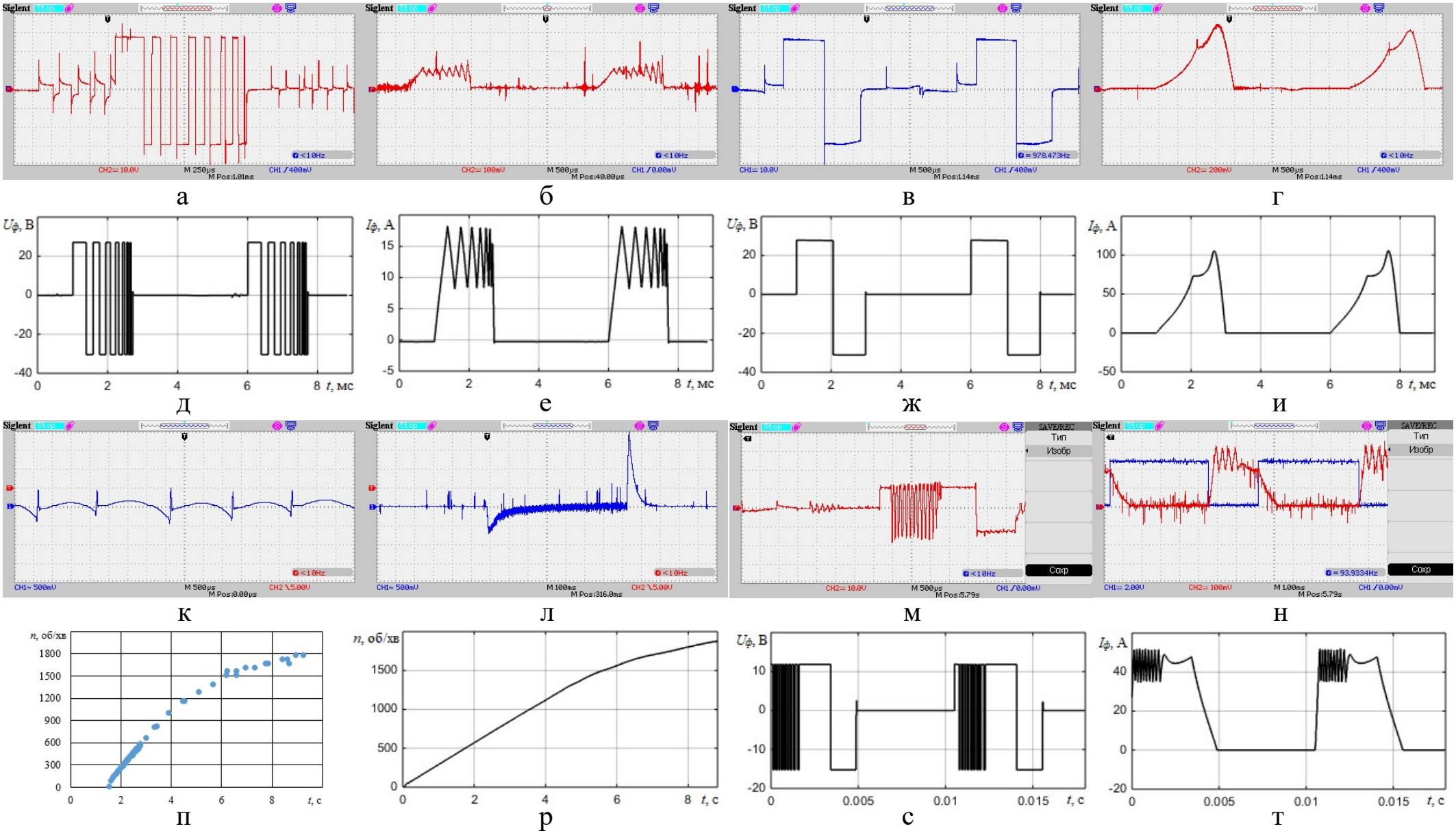
Перехідне відхилення напруги при скиданні/накиданні номінального навантаження ≤ 7%.

Час відновлення після скидання/накидання номінального навантаження ≤ 0,2 с.

Коефіцієнт пульсацій вихідної напруги постійного струму ≤ 1%.

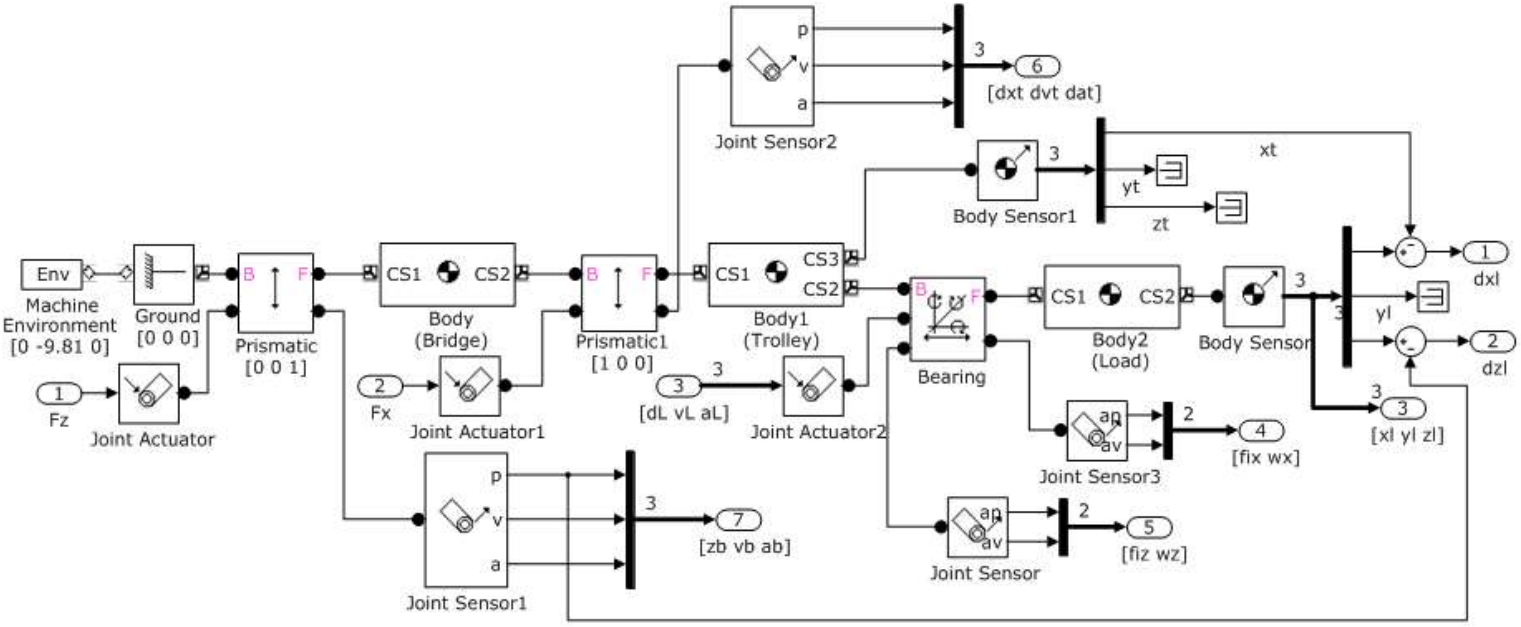
Коефіцієнт корисної дії в генераторному режимі до 77%.

Експериментальні дослідження вентильно-індукторного стартер-генератора

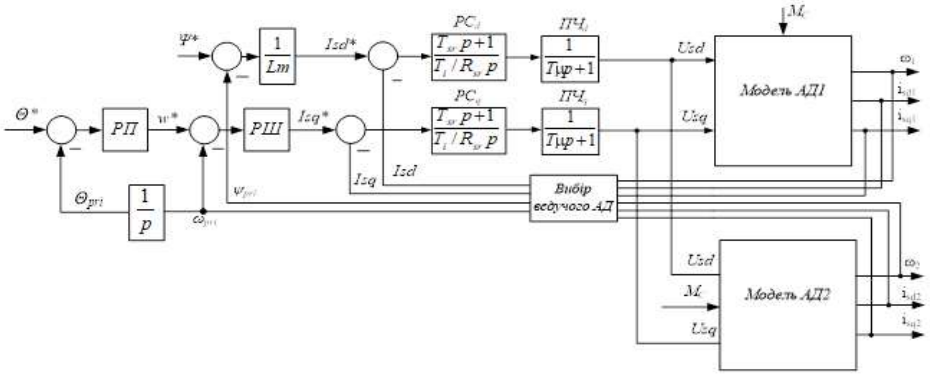


Осцилограми фазних напруг (а, в, д, ж, м, с) і фазних струмів (б, г, е, и, н, т) вентильно-індукторного стартер-генератора в генераторному режимі за навантаження холостого ходу (а, б, д, е) і 0,561 кВт (в, г, ж, и) та вихідної напруги при номінальному навантаженні (к) і при накиданні/скиданні номінального навантаження (л), а також в стартерному режимі за частоти 1742 об/хв (м, н, с, т) та залежності частоти при пуску (п, р): а-г, к-н, п – експериментальні; д-и, р-т – розрахункові. Масштаб осцилограм струму 100 мВ=17,33 А

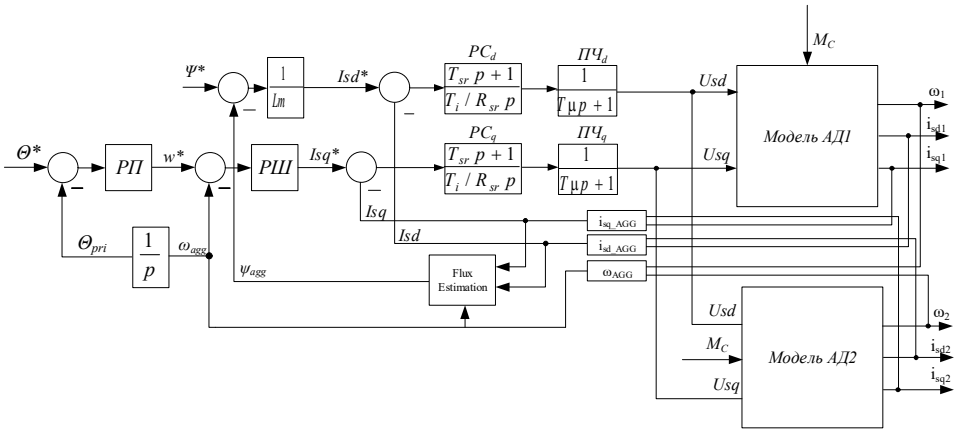
Розробка математичних моделей електроприводу крана-маніпулятора



Віртуальна модель мостового крана

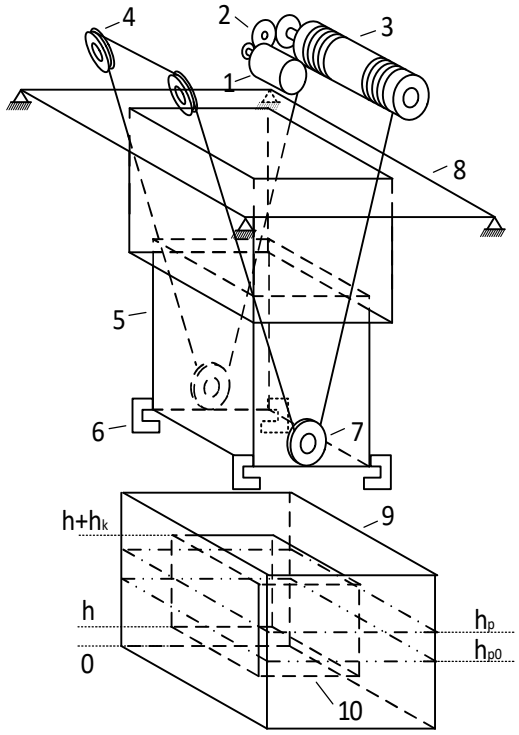


Структурна схема керування «Master–Slave»



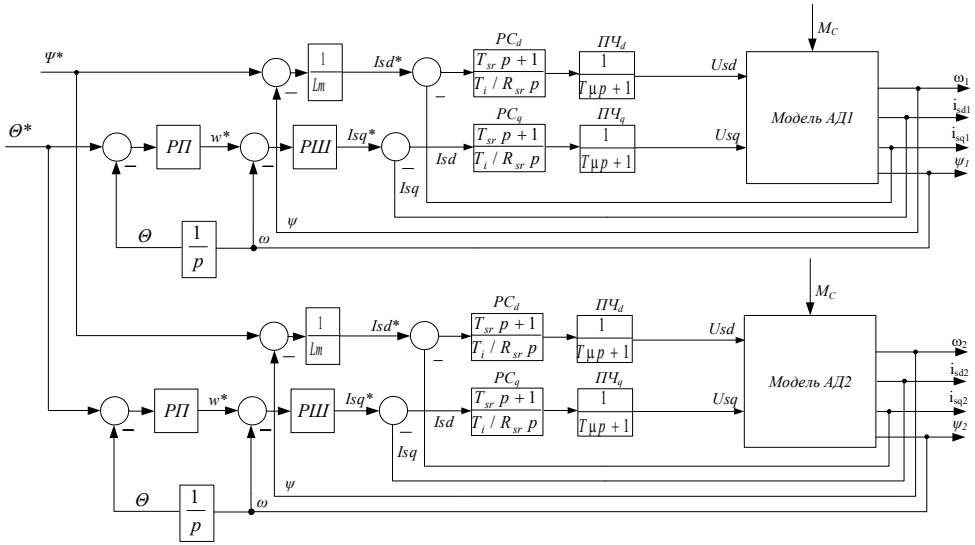
Структурна схема керування «Mean control»

Розробка математичних моделей електроприводу крана-маніпулятора

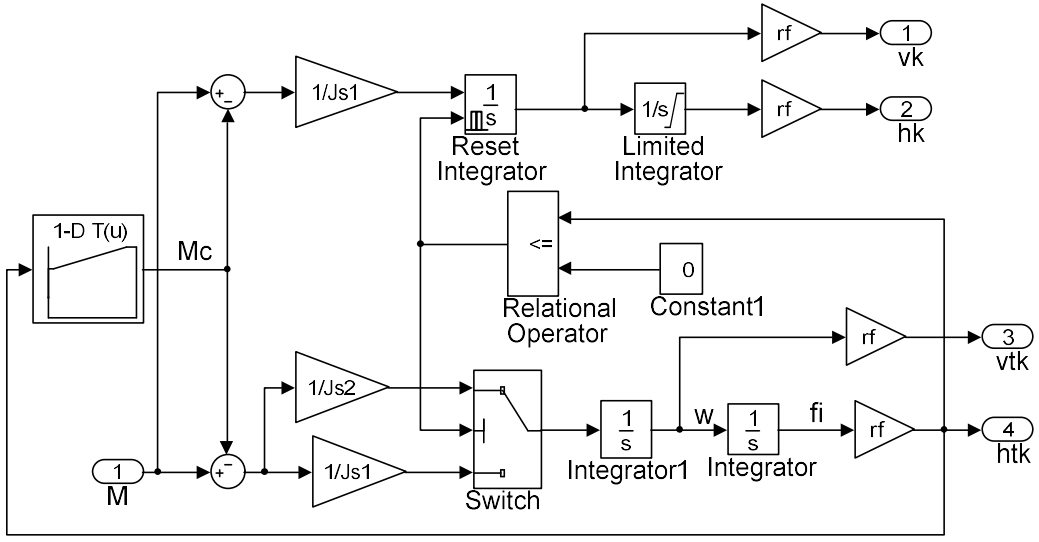


Вантажопідйомний пристрій крана-маніпулятора

1 – двигун; 2 – редуктор; 3 – барабан; 4 – продольний блок; 5 – рухома частина колони; 6 – гачки зачепу кошика; 7 – поперечний блок; 8 – основа телескопічної колони; 9 – ванна; 10 – кошик; – початковий (до занурення кошика); – поточний рівень рідини у ванні; – висота кошика; – позиція нижнього краю колони

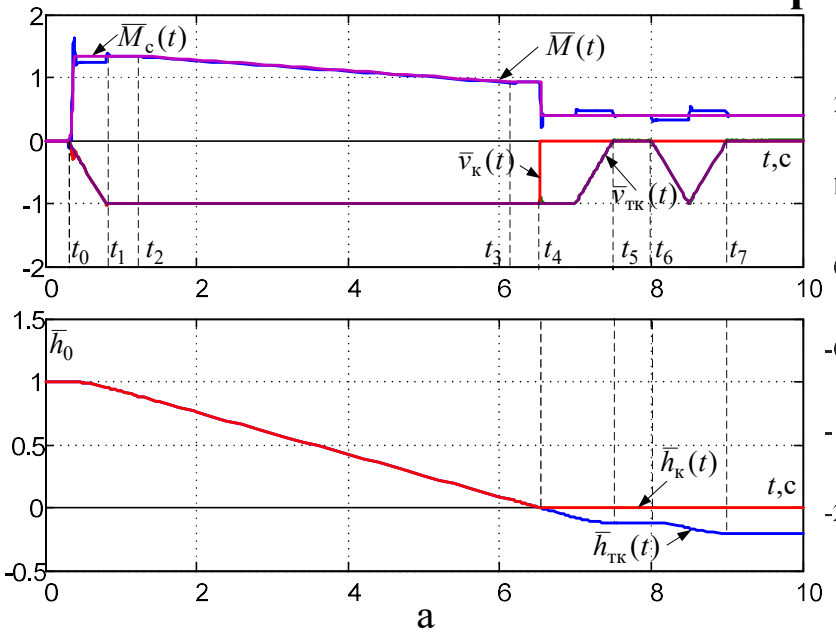


Структурна схема векторного керування двома АД

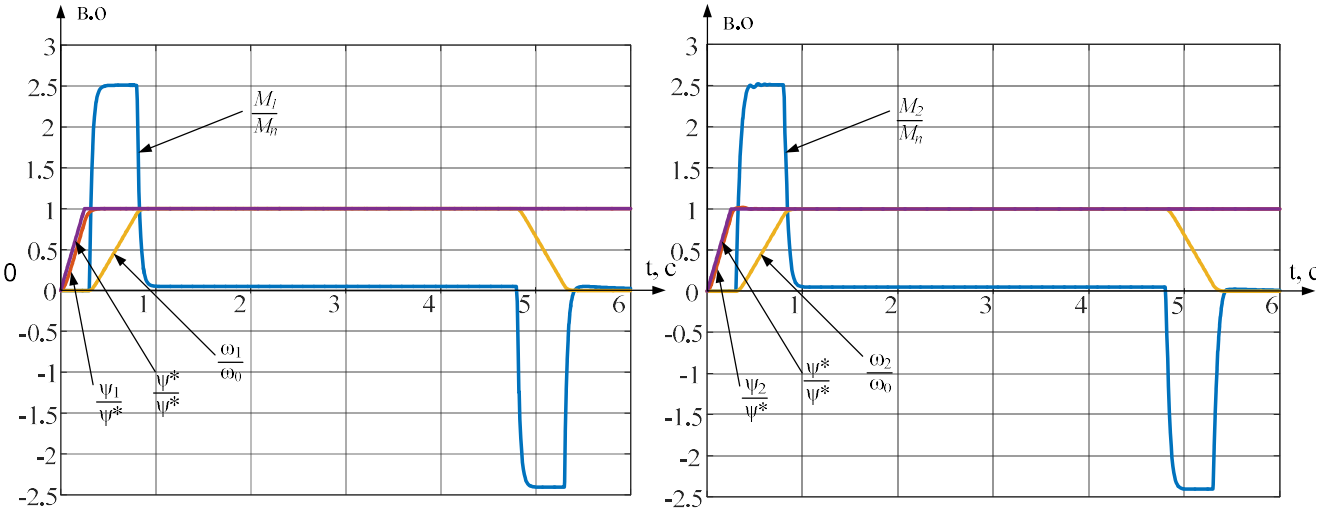


Структурна математична модель механічної системи електроприводу механізму вантажопідйомного пристрою

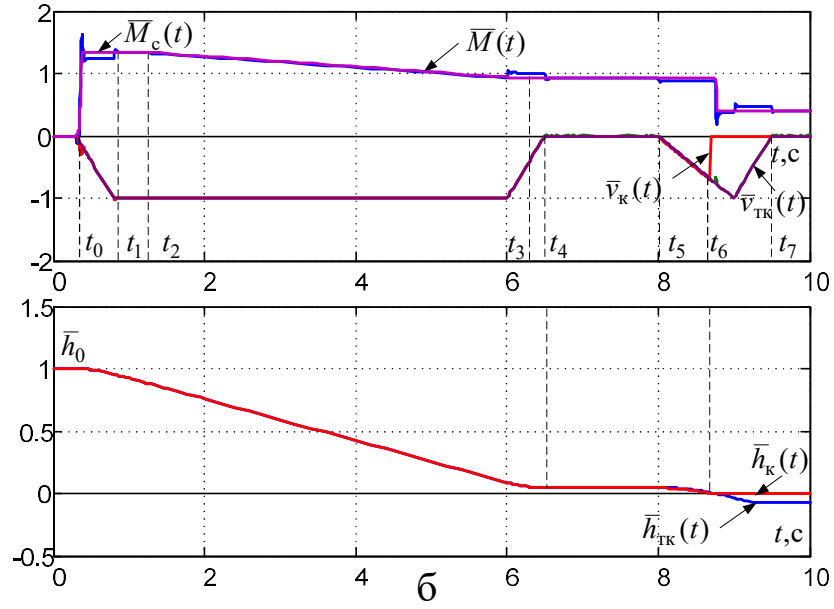
Апробація запропонованої моделі для аналізу показників якості керування електроприводами крана-маніпулятора



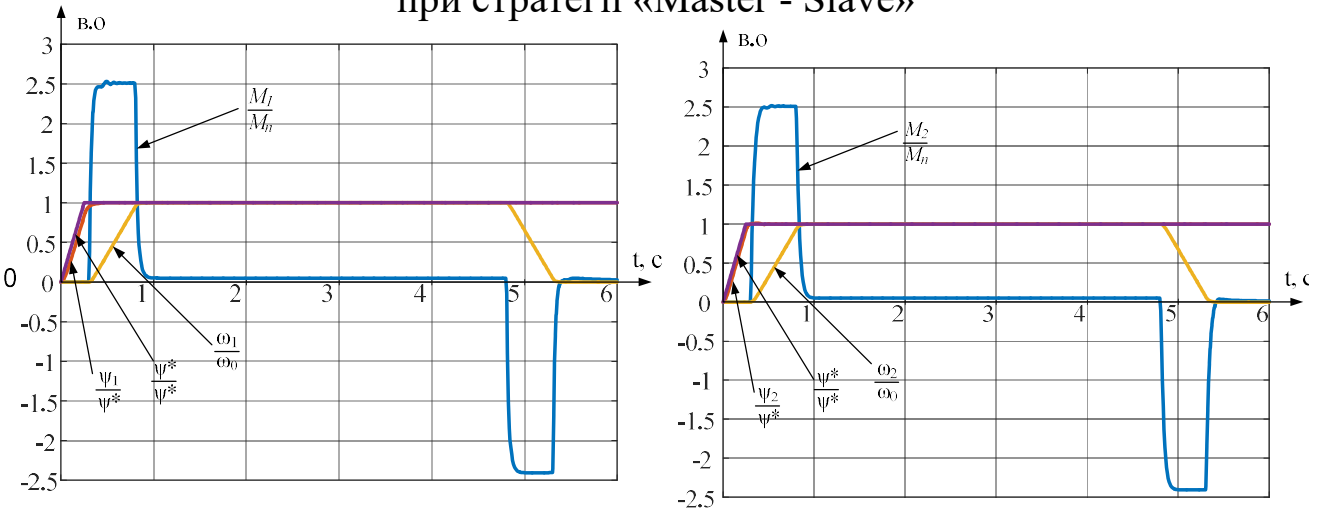
а



Графіки перехідних процесів першого та другого двигуна при стратегії «Master - Slave»



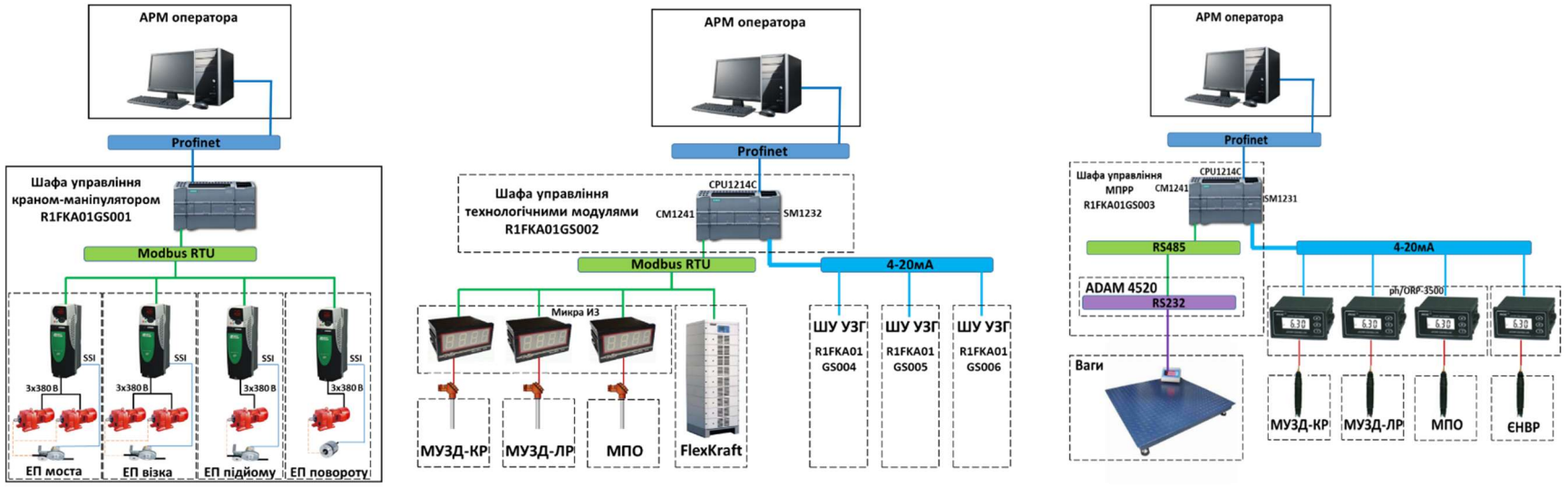
б



Графіки перехідних процесів першого та другого двигуна при стратегії «Mean control»

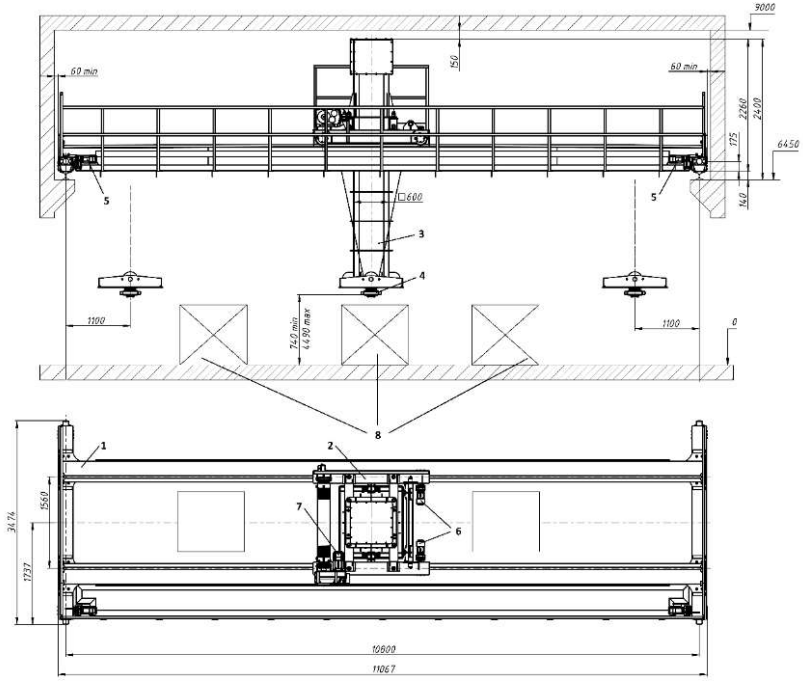
Процес гальмування вантажу підйомним пристроєм а) з запізненням, б) без з випередженням

Апробація запропонованої моделі для аналізу показників якості керування електроприводами крана-маніпулятора

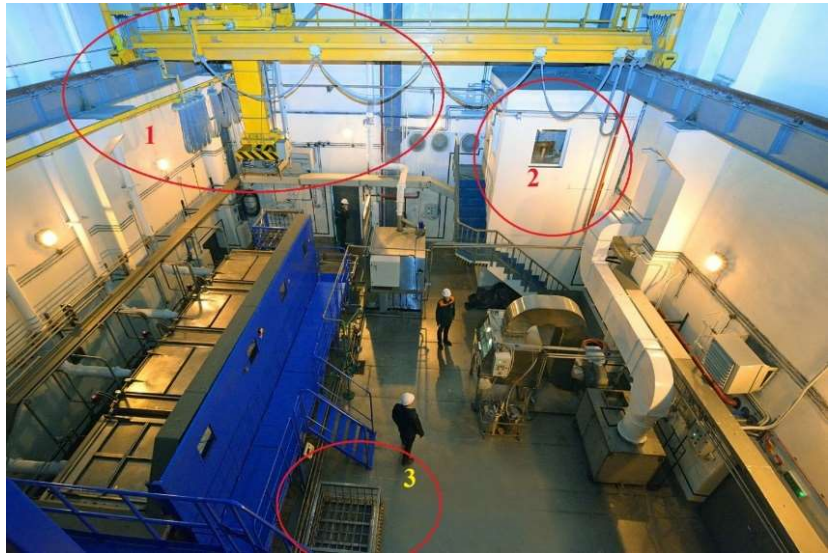


а) б) в)

Функціональна схеми а) автоматичної системи керування краном-маніпулятором, б,в) функціональна схема передачі даних між устаткуванням цеху, де АРМ оператора це один блок та Profinet одна мережа

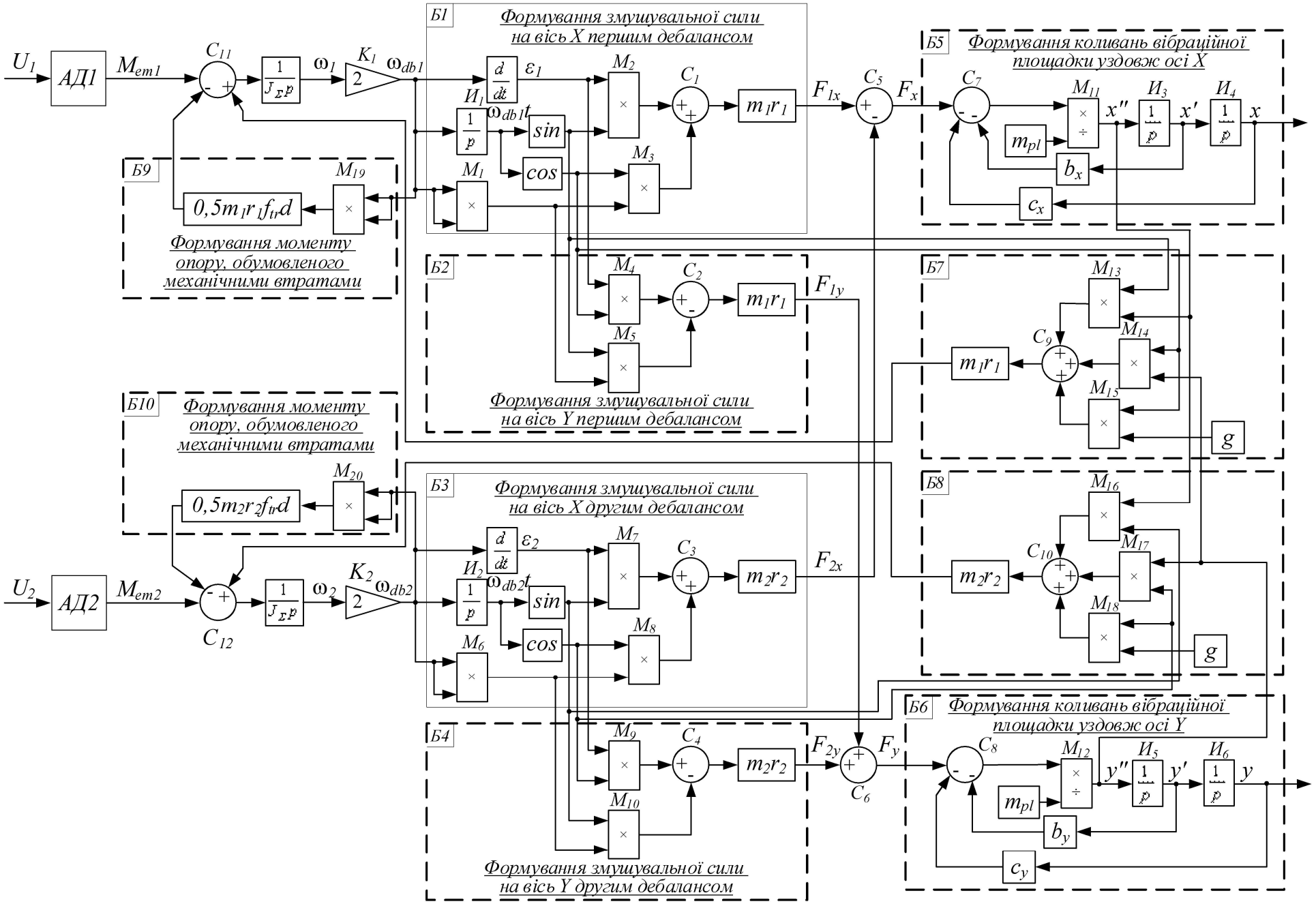


Габаритне креслення крана-маніпулятора



Цех установки дезактивації металів
1 – кран-маніпулятор; 2 –місце розташування оператора; 3 – стіл прийому-видачі з корзиною

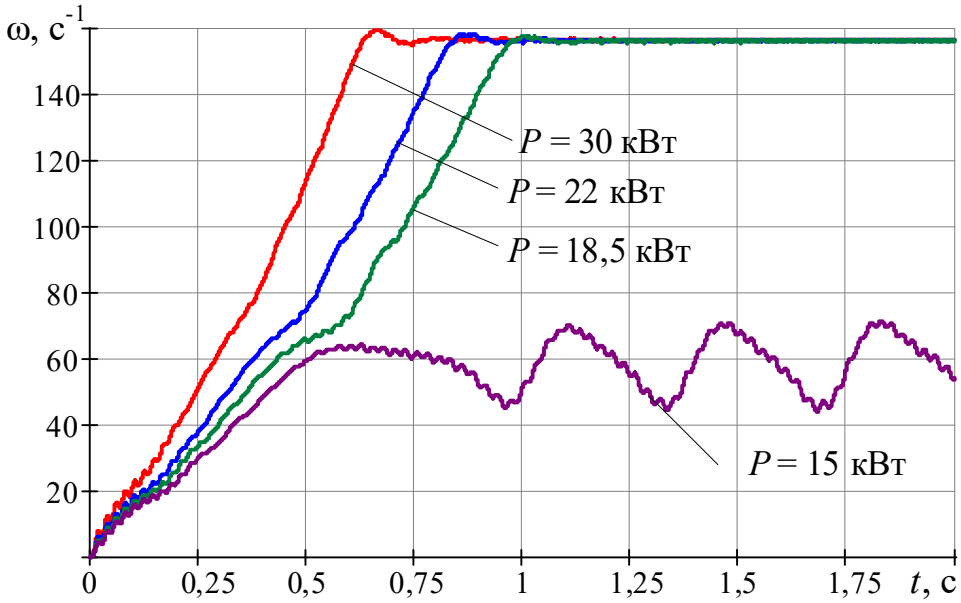
МОДЕЛЬ МЕХАНІЧНОЇ ЧАСТИНИ ВІБРОМАШИНИ



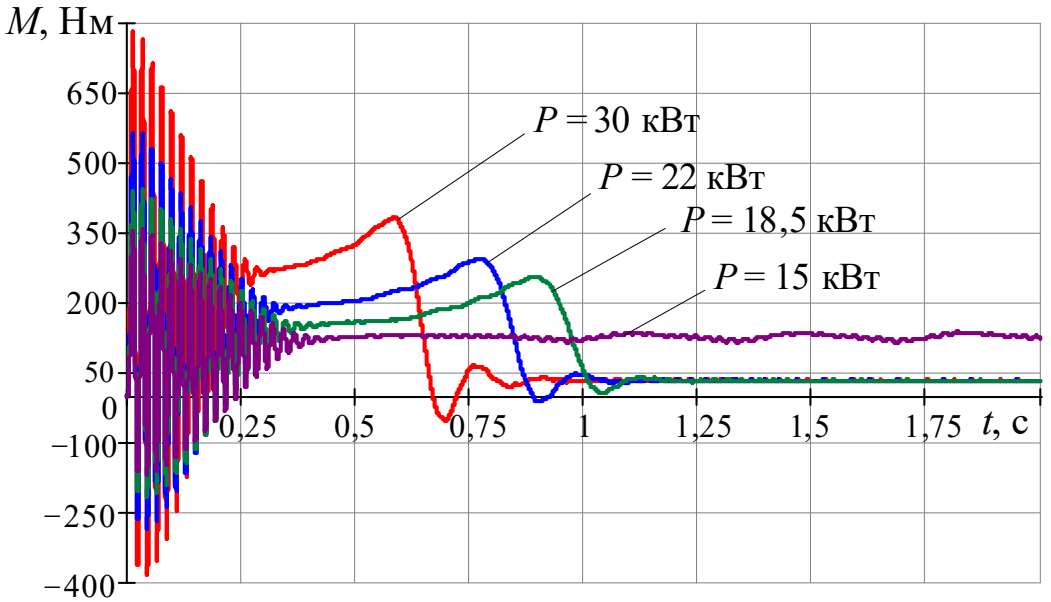
ВПЛИВ ПОТУЖНОСТІ ПРИВОДНИХ ДВИГУНІВ НА ПРОЦЕС ПУСКУ ВІБРАЦІЙНОЇ МАШИНИ

Паспортні дані асинхронних двигунів серії 4А

Двигун	P_n, кВт	n_0, об/хв	λ_p	λ_k	s_n, %	s_k, %	k_i	η, %	J_d, кг·м²
4А180М4У3	30	1500	1,4	2,3	1,9	14,0	6,5	0,91	0,23
4А180S4У3	22	1500	1,4	2,3	2,0	14,0	6,5	0,9	0,19
4А160М4У3	18,5	1500	1,4	2,3	2,2	16,0	7,0	0,895	0,13
4А160S4У3	15	1500	1,4	2,3	2,3	16,0	7,5	0,885	0,1

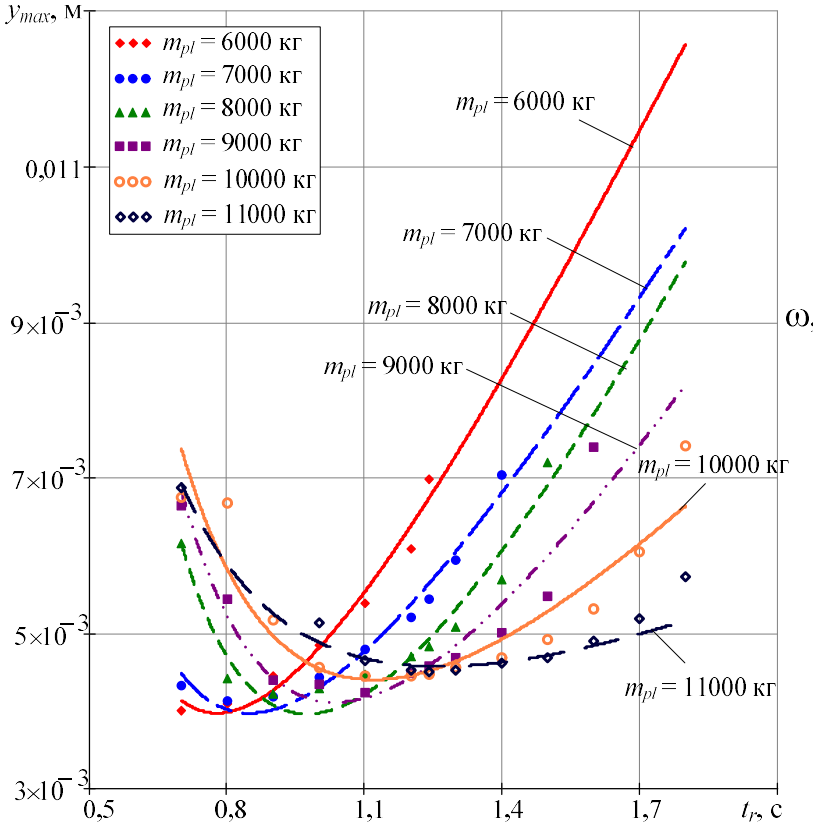


Криві кутових швидкостей обертання двигунів різної потужності



Криві моментів двигунів різної потужності

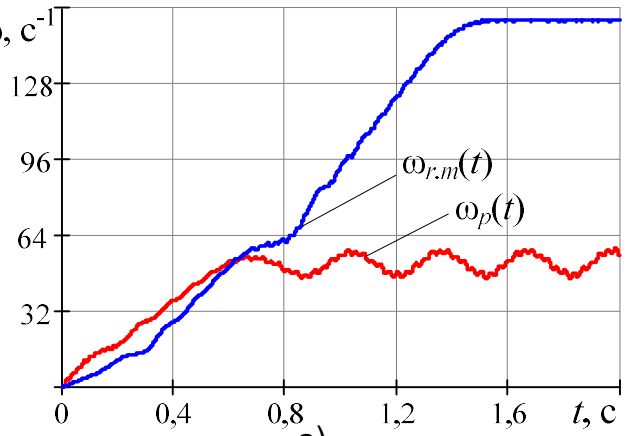
РЕГУЛЬОВАНИЙ ПУСК ЗАРЕЗОНАНСНОЇ ВІБРОМАШИНИ



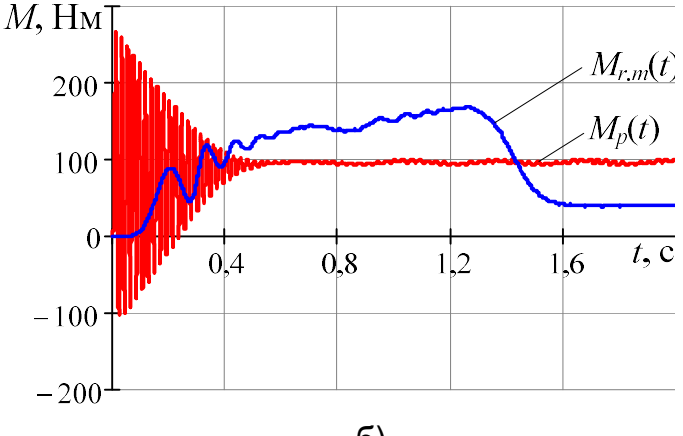
Залежність максимального переміщення ВМ від часу розгортки частоти

Залежність часу розгортки від повної приведеної маси коливних частин ВМ:

$$t_{r.m}(m_{pl}) = 3\sqrt{\frac{2\left(v_0 + v_1 m_{pl} + v_2 m_{pl}^2\right)}{u_0 + u_1 m_{pl} + u_2 m_{pl}^2}}$$

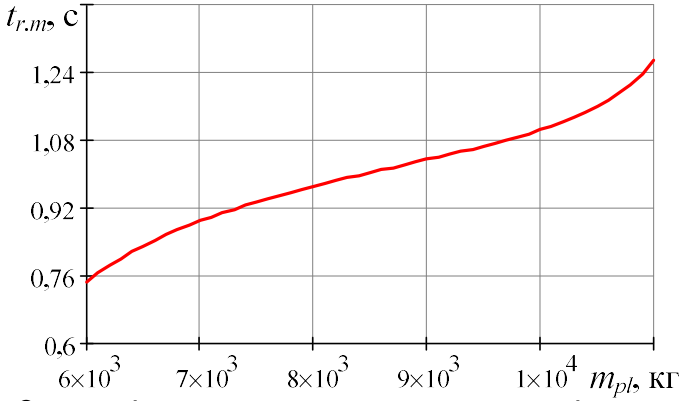


а)

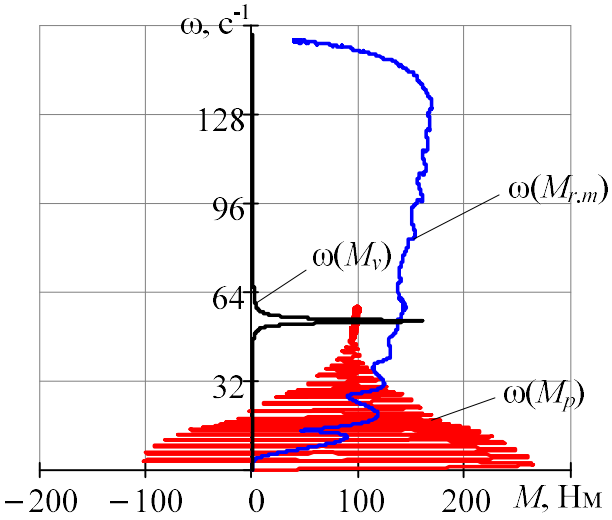


б)

Часові залежності: а) кутової швидкості обертання АД ВМ; б) моменту двигуна ВМ

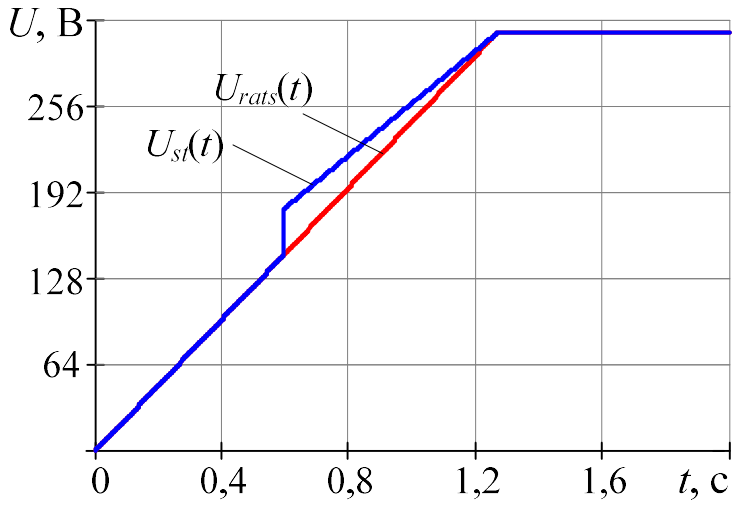


Залежність часу розгортки частоти від повної приведеної маси коливних частин ВМ

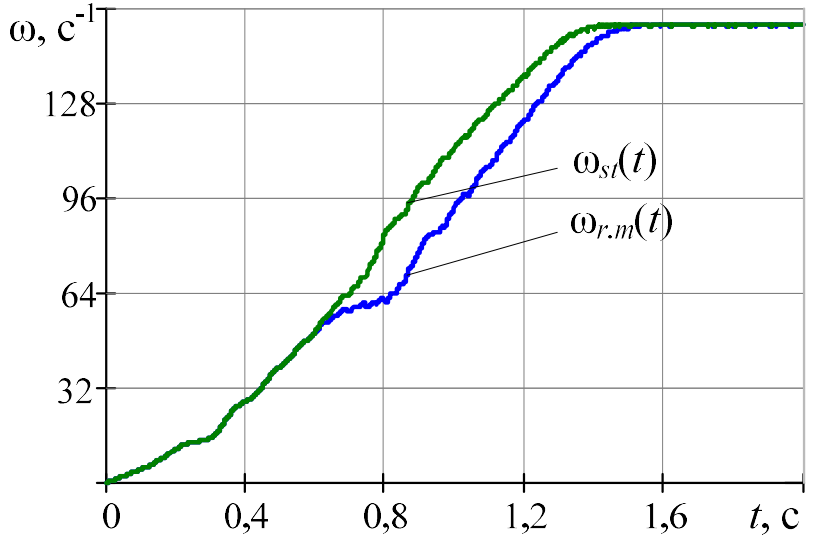


Динамічні характеристики АД та статична характеристика вібраційного моменту

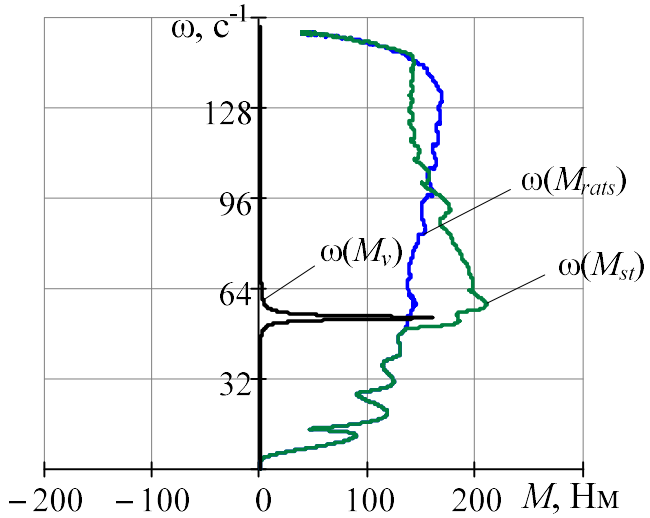
РЕГУЛЬОВАНИЙ ПУСК ЗАРЕЗОНАНСНОЇ ВІБРОМАШИНИ (продовження)



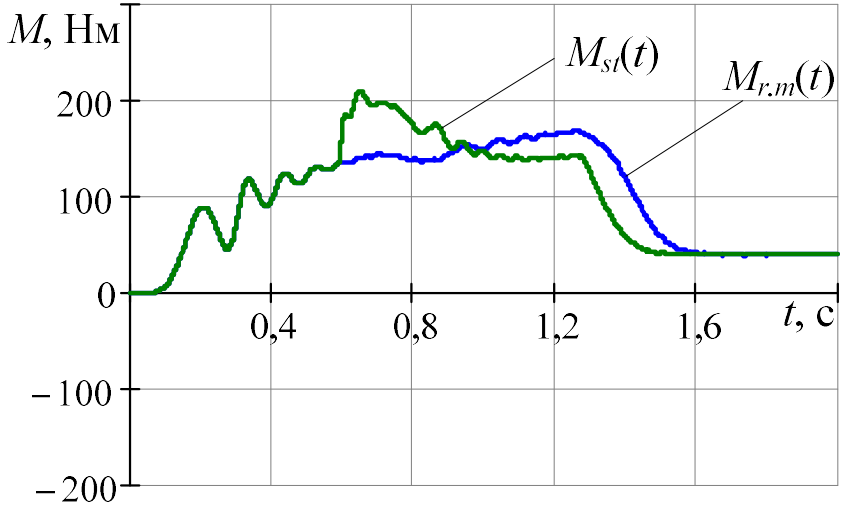
Часові залежності напруги живлення двигунів ВМ



Часові залежності кутової швидкості обертання двигуна ВМ

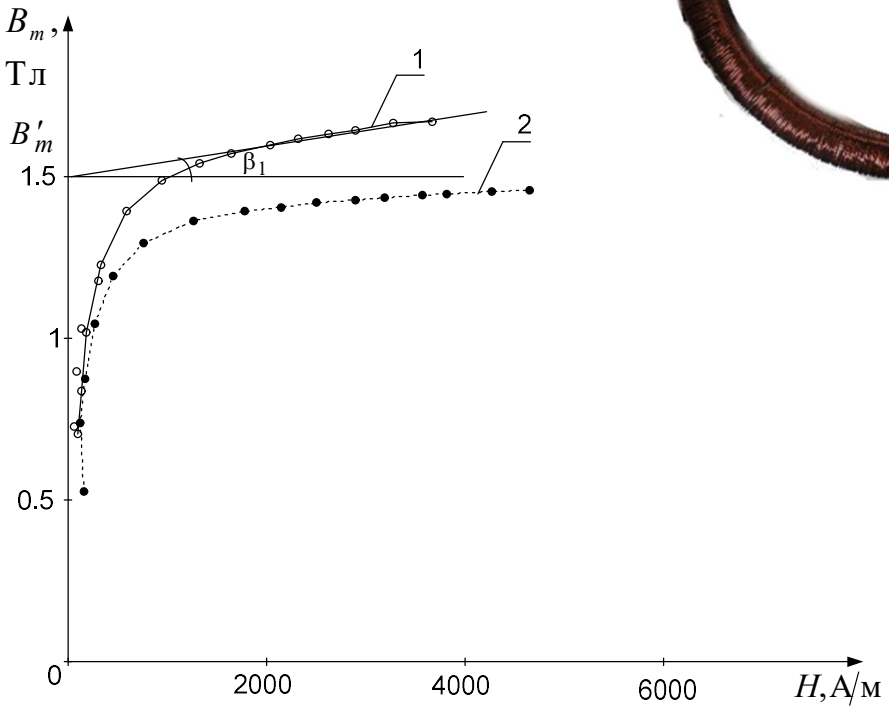


Динамічні характеристики АД і статична характеристика вібраційного момену

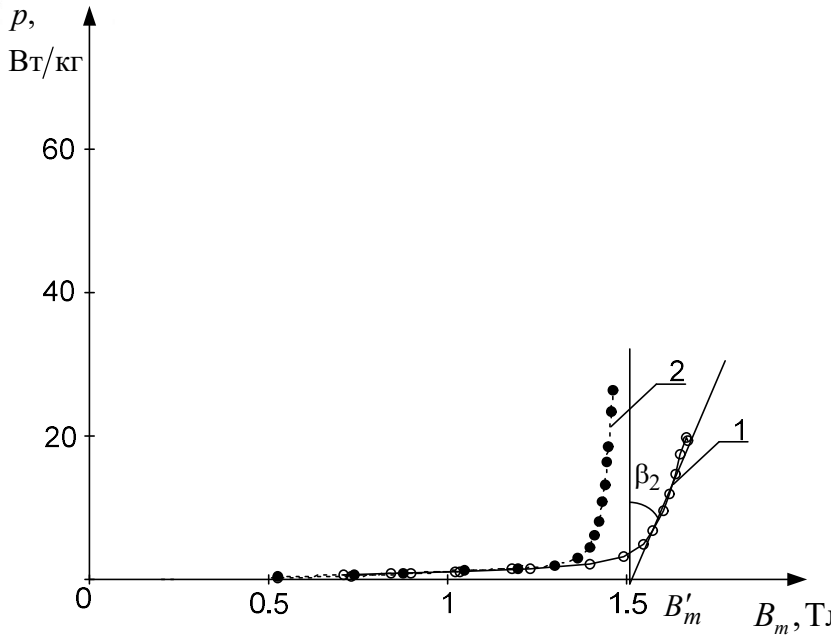


Часові залежності моменту двигуна ВМ

ВИЗНАЧЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ТА ІНТЕНСИВНОСТІ СТАРІННЯ ШИХТОВАНОЇ СТАЛІ ОСЕРДЬ МАГНІТОПРОВОДІВ



Залежності магнітної індукції від напруженості магнітного поля

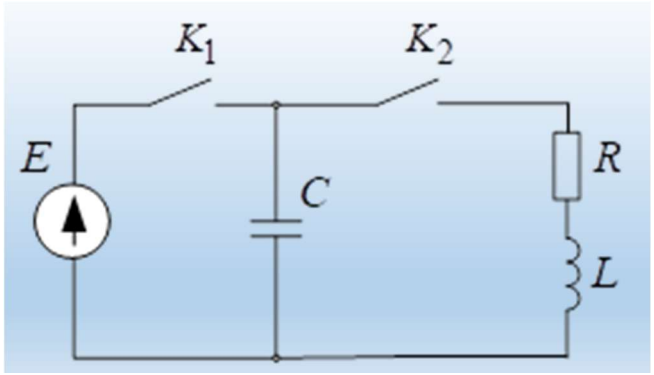


Залежності питомих втрат від магнітної індукції

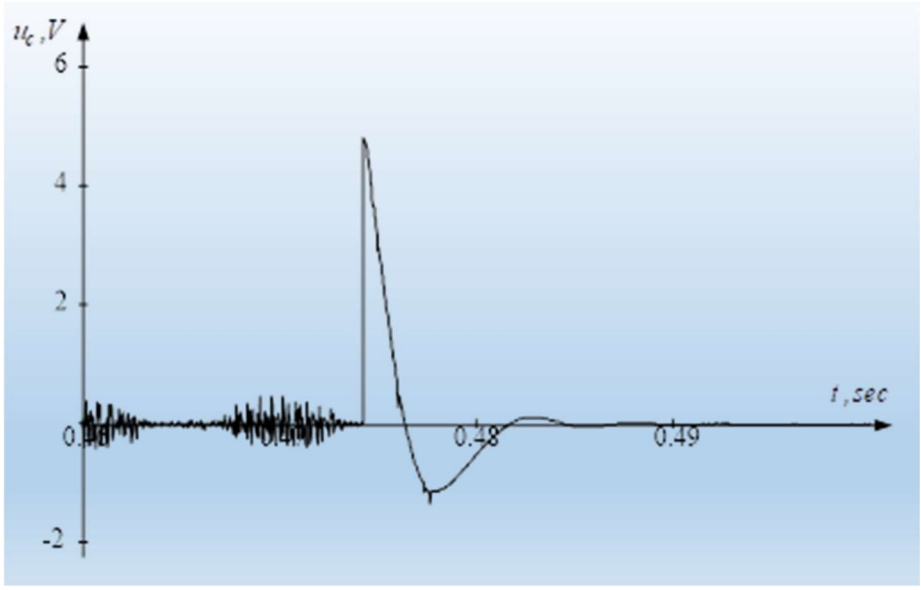
$$T = 10673\ .48 + 2017\ .46\ \frac{B'_m}{B'_{mn}} + 1239\ .34\ \frac{\beta_1}{\beta_{1n}} + 2546\ .73\ \frac{\beta_2}{\beta_{2n}} + 670\ .09\ \frac{B'_m}{B'_{mn}}\ \frac{\beta_1}{\beta_{1n}} + 1137\ .11\ \frac{B'_m}{B'_{mn}}\ \frac{\beta_2}{\beta_{2n}} +$$

$$+ 1029\ .46\ \frac{\beta_1}{\beta_{1n}}\ \frac{\beta_2}{\beta_{2n}} + 825\ .273\ \frac{B'_m}{B'_{mn}}\ \frac{\beta_1}{\beta_{1n}}\ \frac{\beta_2}{\beta_{2n}},$$

ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ІМПУЛЬСНОГО МЕТОДУ ДОСЛІДЖЕННЯ ОБМОТОК СТАТОРА АД



Схеми реалізації модефікованого імпульсного

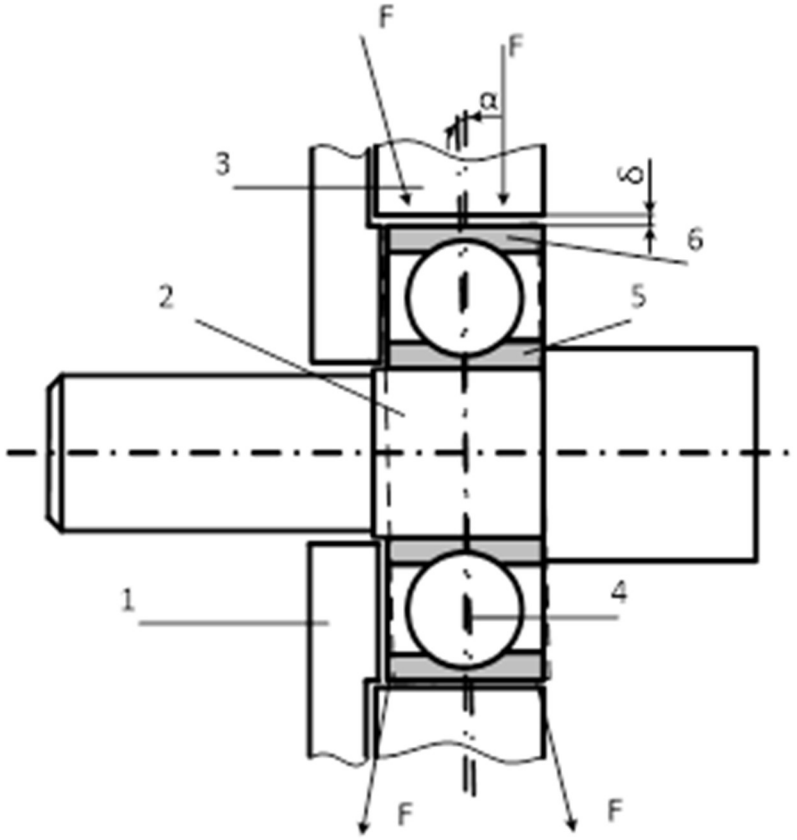


Результати використання модифікованого імпульсного методу

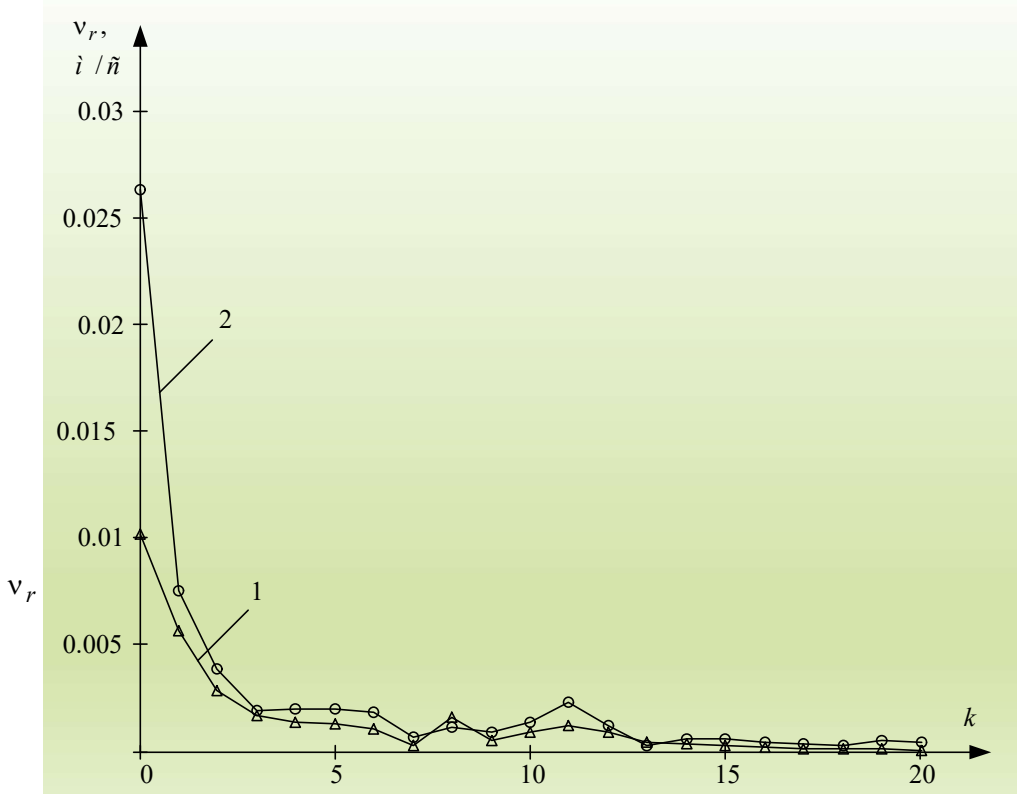
За результатами проведеної роботи було апробовано математичну модель надійності виду:

$$T_w = 2583244 - 20123.57\frac{\theta_1 - \theta_{1n}}{\theta_{1n}} + 11017.46\frac{W_1}{W_1 - nv} - 46963.56\frac{(\theta_1 - \theta_{1n})}{\theta_{1n}}\frac{W_1}{(W_1 - nv)},$$

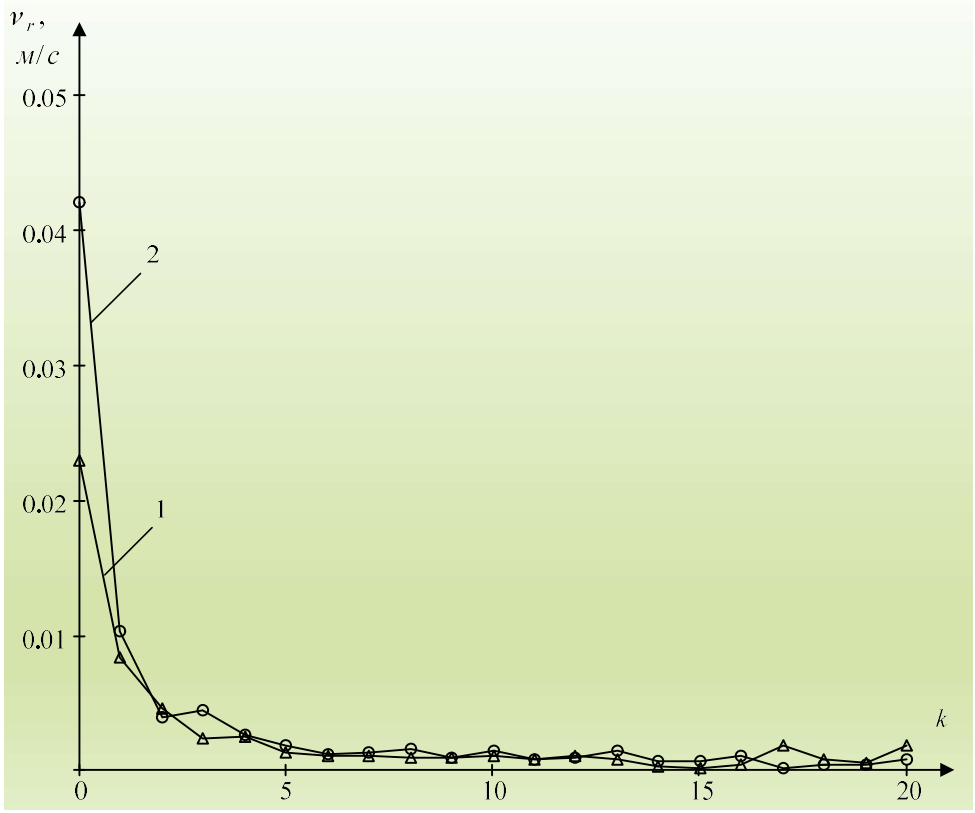
ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЗМІНИ СТАНУ ПІДШИПНИКОВИХ ВУЗЛІВ АД



РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЗМІНИ СТАНУ ПІДШИПНИКОВИХ ВУЗЛІВ АД



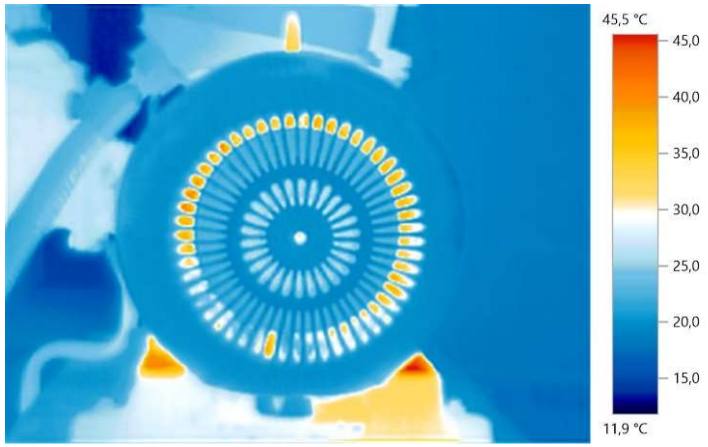
Спектральний аналіз радіальної ν_r складової вібрації відносно частоти живлення (1 – АД без дефекту; 2 – АД зі штучно внесеним дефектом)



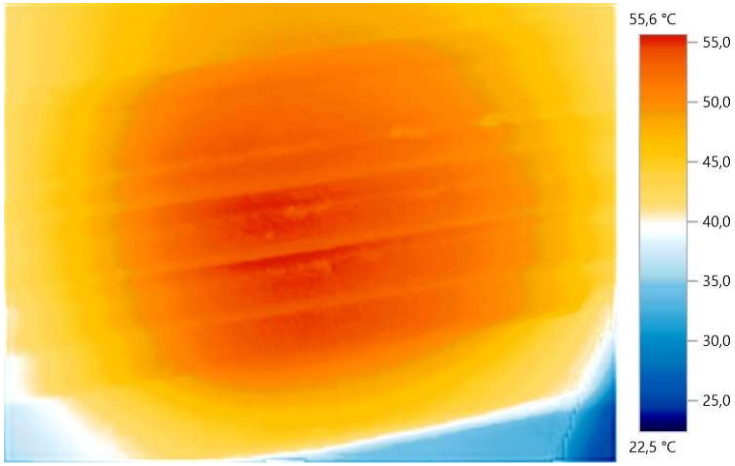
Спектральний аналіз радіальної ν_r складової вібрації відносно частоти обертання (1 – АД без дефекту; 2 – АД зі штучно внесеним дефектом)

$$T_{bea} = 4173217 - 8397.587\frac{\theta_{1bea}}{\theta_{0bea}} + 141.321\frac{F_{1bea}}{F_{0bea}} - 11866574\frac{\theta_{1bea}}{\theta_{0bea}}\frac{F_{1bea}}{F_{0bea}},$$

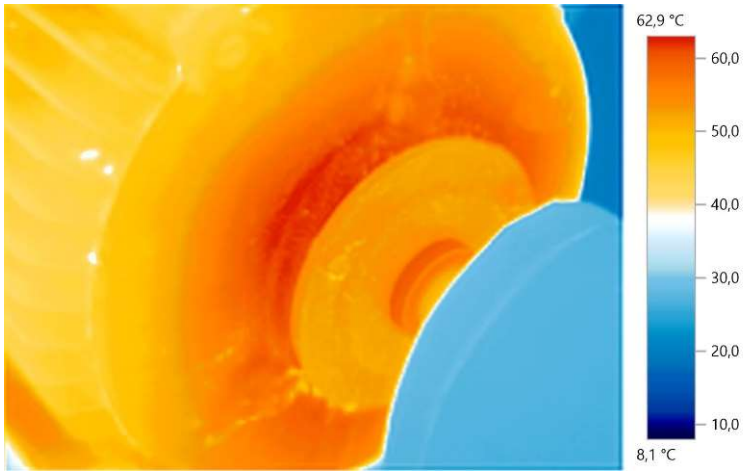
РЕЗУЛЬТАТИ ТЕПЛОВІЗІЙНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ АД В УМОВАХ ВИРОБНИЦТВА



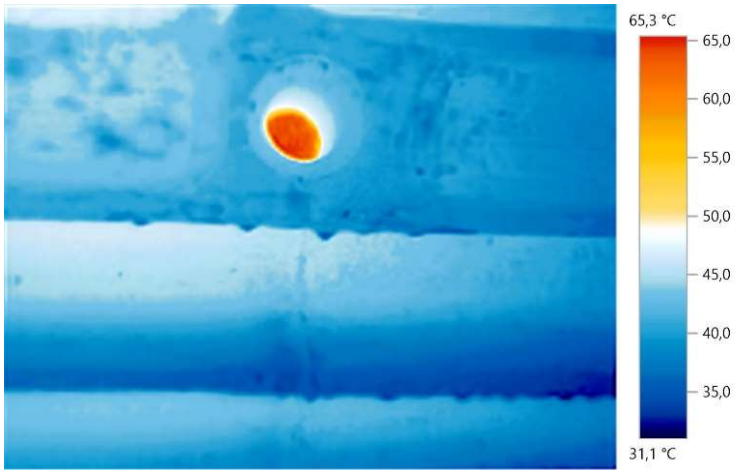
а)



б)



в)



г)

Термограми досліджуваних АД
а) погане кріплення АД до основи; б) перегрів сердечника статора АД;
в) пошкодження переднього підшипника АД; г) перегрів внутрішнього повітря неправильно спроектованого АД великої потужності