

## ШЛЯХИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ (ЕМС) МОСТОВОГО КРАНУ НА ПІДСТАВІ ПІДВИЩЕННЯ СТУПЕНЮ АВТОМАТИЗАЦІЇ

Тімошенко Б. О., Філатов С. Ю., Клімченков А. Г., Івченков М. В.

У статті представлений лабораторний комплекс мостового крану, призначений для вивчення принципів побудови сучасного асинхронного електроприводу і систем управління технологічним об'єктом, вирішення завдань лабораторного практикуму дисциплін електро-механічних спеціальностей і апробації рішень наукових завдань, пов'язаних з проблемами кранового електроприводу, реалізований на базі вбудованих систем. Основною метою є розробка рекомендацій щодо вдосконалення електромеханічної системи мостового крана для розширення її функціональних можливостей на підставі підвищення ступеня автоматизації.

В статье представлен лабораторный комплекс мостового крана, предназначенный для изучения принципов построения современного асинхронного электропривода и систем управления технологическим объектом, решения задач лабораторного практикума дисциплин электромеханических специальностей и апробации решений научных задач, связанных с проблемами кранового электропривода, реализованный на базе встраиваемых систем. Основной целью является разработка рекомендаций по усовершенствованию электромеханической системы мостового крана для расширения её функциональных возможностей на основании повышения степени автоматизации.

This paper describes a laboratory complex of the overhead crane intended for studying principles of modern asynchronous electric drive's creation and control systems of a technological object, intended for solving lab exercises in electromechanical disciplines and approbation of scientific problems' solutions in the sphere of the crane electric drive, which is realized on the basis of embedded systems. The main objective of the article is to develop recommendations on enhancement of electromechanical systems of the overhead crane for the extension of its functional capabilities with the help of increasing automation degree.

Тімошенко Б. О.

студент ДДМА

Філатов С. Ю.

студент ДДМА

Клімченков А. Г.

студент ДДМА

Івченков М. В.

канд. техн. наук, доц. каф. ЕСА ДДМА  
ket@dgma.donetsk.ua

ДДМА – Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ.

УДК 621.313

Тімошенко Б. О., Філатов С. Ю., Клімченков А. Г., Івченков М. В.

### ШЛЯХИ ВДОСКОНАЛЕННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ (ЕМС) МОСТОВОГО КРАНУ НА ПІДСТАВІ ПІДВИЩЕННЯ СТУПЕНЮ АВТОМАТИЗАЦІЇ

Переміщення вантажів супроводжується коливаннями підвішеного вантажу в поперечних напрямках з певною амплітудою та зміною більшості параметрів електромеханічної системи мостового крану. Це утворює додаткові навантаження в ланках кінематичного ланцюга, знижує якість виконання технологічних операцій по переміщенню вантажів та призводить до помітного подовження виробничого циклу.

Рішення проблеми лежить в підвищенні ступеню автоматизації електромеханічної системи мостового крану, що потребує вдосконалення технологічних операцій по переміщенню вантажів.

В якості об'єкту дослідження обрана електромеханічна система мостового крану. Технічні данні двигуна: двигун АД – 4МТН ; потужність двигуна  $P=15$  кВт; частота обертання –  $n=925$  хв<sup>-1</sup>; момент двигуна –  $M=154.8$  Н·м; момент інерції двигуна –  $J_{дв}=0.371$  кг·м<sup>2</sup>; механізм підйому – маса  $m_1=1.9$  т; швидкість підйому –  $V_{зад}=0.2$  м/с; момент інерції –  $J_m=0.096$  кг·м<sup>2</sup>; система електропривода – тиристорний перетворювач частоти – асинхронний двигун (ТПЧ – АД). Предмет дослідження – параметри руху вантажу на окремих етапах шляху пересування вантажу та автоматичне керування цими параметрами.

Більшість робіт, спрямованих на рішення означеної проблеми, стосується ефективності різноманітних варіантів ліквідації розгойдування вантажу при керуванні електромеханічною системою за різними законами [1, 2]. При цьому не розглядаються питання розширення функціональних можливостей електромеханічної системи крану і забезпечення безпеки переміщення вантажів мостовими кранами.

Основною метою є розробка рекомендацій по вдосконаленню електромеханічної системи мостового крану заради розширення її функціональних можливостей на підґрунті підвищення ступеню автоматизації. Для цього слід виконати ряд задач: проаналізувати способи ліквідації розгойдування вантажу при його переміщенні краном; виявити закономірності виконання технологічних операцій; ввести до системи керування додатковий сигнал про вибір слабину канатів та люфтів в кінематичній передачі механізму підйому та про кут відхилення канату з вантажем при переміщенні візка.

Одним з ефективних засобів автоматизації є роботизація. Досить вдало проводиться на спеціальних технологічних кранах (кран-штабелерах і др.), що пояснюється їх експлуатаційними умовами: невелика площа обслуговування, відсутність небезпечних робочих зон, відповідний тип вантажозахватного пристрою.

Принципи побудови електромеханічних систем загальнотехнологічних вантажних кранів та їх технічні характеристики, до яких належать мостові крани, відповідають напівавтоматичним системам, де без участі людини не обійтись. Це підтверджує структурний, динамічний, позиційно-точносний та функціонально-вартісний аналіз електромеханічних систем мостових кранів.

Автоматизована електромеханічна система мостового крану, орієнтована на програмне керування від мікроконтролерів, зробить процес позиціонування вантажу керованим і потребує вдосконалення як технологічних способів переміщення вантажів, так і розрахунків параметрів ЕМС. В технологічному процесі переміщення вантажу виділяють операції підйому та опускання вантажу й гака, переміщення візка та мосту.

Основні технологічні операції по переміщенню вантажу проводять в декілька етапів.

На першому вмикають електродвигун механізму підйому на низьку частоту (повзучу) обертання ротору (близько 15–30 об/хв). Станеться вибір люфту в кінематичній передачі механізму підйому, слабину канату та строп практично без механічного навантаження валу двигуна та нерухомому вантажу [3]. Після чого здійснюють підйом вантажу на 200–300 мм і за допомогою датчика вимірюють масу вантажу. Інформація про вагу вантажу буде використана для вибору програми переміщення вантажу з урахуванням впливу на вантаж інерційних сил, що призводять до розгойдування і зниження точності позиціонування вантажу. Наприкінці першого етапу отримаємо достатній натяг канату під дією ваги вантажу, якій підіймається. Про це можна судити по моменту збільшення електричного струму, який споживає двигун, та буде відмічено на шкалі амперметра.

Після цього проводять другий етап технологічної операції шляхом плавного підвищення частоти обертання ротору до номінальної (розрахункової). Команди до переходу на другий етап крановщику може передавати строповщик, який знаходиться поблизу закріпленого вантажу.

Наступні технологічні операції по горизонтальному переміщенню вантажу в задане місце здійснюють після визначення кута відхилення канату з вантажем та наданні команди по переміщенню візку на відповідну величину протилежно своєму руху. Це надасть можливість доставити вантаж без розгойдування.

Відомо, що ЕМС мостового крану слід розглядати як трьохмасову систему з двома пружними зв'язками (двигун-металоконструкція крану, металоконструкція крану-вантаж) [2]. Поведінка будь-якої ЕМС при переміщенні вантажів (в динаміці) визначається її параметрами, від яких залежить частота коливань, значення моментів та зусиль, які навантажують елементи механічної частини. Змінення параметрів та керуючої дії суттєво впливає на показники якості ЕМС, тому необхідно дати їх кількісну оцінку.

Для опису поведінки електромеханічної трьохмасової системи використовують наступні рівняння:

$$\begin{cases} M = J_1 \frac{d\omega_1}{dt} + \frac{C_{12}}{p}(\omega_1 - \omega_2) + b_{12}(\omega_1 - \omega_2); \\ \frac{C_{12}}{p}(\omega_1 - \omega_2) + b_{12}(\omega_1 - \omega_2) = J_2 \frac{d\omega_2}{dt} + \frac{C_{23}}{p}(\omega_2 - \omega_3) + b_{23}(\omega_2 - \omega_3) \\ \frac{C_{12}}{p}(\omega_2 - \omega_3) + b_{23}(\omega_2 - \omega_3) = J_3 \frac{d\omega_3}{dt} + M_c \end{cases} \quad (1)$$

де  $M$ ,  $M_c$  – момент електродвигуна та опору;  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$  – кутова швидкість ротора двигуна, прольотної будови та вантажу, що переміщується;  $C_{12}, C_{23}$  – жорсткість пружних ланок;

$b_{12}, b_{23}$  – коефіцієнти в'язкого тертя пружних ланок;  $\frac{C_{12}}{p}(\omega_1 - \omega_2) = M_{12}$ ,

$\frac{C_{23}}{p}(\omega_2 - \omega_3) = M_{23}$  – момент пружної деформації канатів та прольотної будови;

$b_{12}(\omega_1 - \omega_2) = M_{n1}$ ,  $b_{23}(\omega_2 - \omega_3) = M_{n2}$  – складові втрат в'язкого тертя пружних ланок (канат-прольотна будова).

Рівнянням (1) відповідає структурна схема на рис 1. Вона відображує зв'язки кутових швидкостей ротору електродвигуна  $\omega_1$ , прольотної будови зі швидкістю  $\omega_2$  з миттєвим значенням електромагнітного моменту  $M$  та швидкістю вантажу, що переміщується,  $\omega_3$ . Пружні властивості механічних передач враховані коефіцієнтами жорсткості  $C_{12}, C_{23}$ , залежностями пружних моментів  $M_{12}, M_{23}$  від різниці швидкостей. Введення додаткових зв'язків дає можливість для врахування внутрішнього демпфування на пружних зв'язках впливу тертя кінематичній передачі [1, 2, 3]. Електрична частина представлена у вигляді

передатної функції  $H_M(p)$  та коефіцієнтом  $K_M$  (відображує зв'язок моменту та напруги  $M=U^2 \cdot K$ ),  $K_D$  дозволяє забезпечити характер зростання моменту.

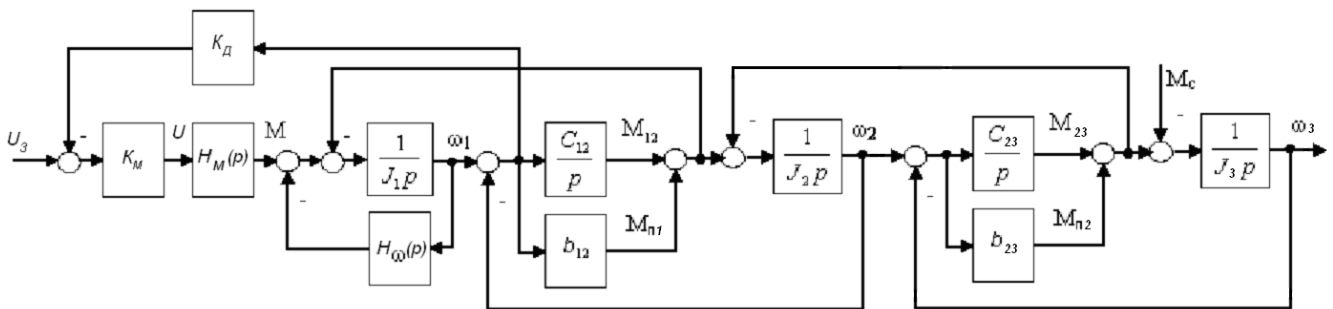


Рис. 1. Трьохмасова система без задатчика інтенсивності

На рис. 2, 3 показані результати дослідження параметрів ЕМС, отриманих за допомогою пакету Matlab Simulink. На графіках перехідних процесів помітні значні коливання параметрів ЕМС.

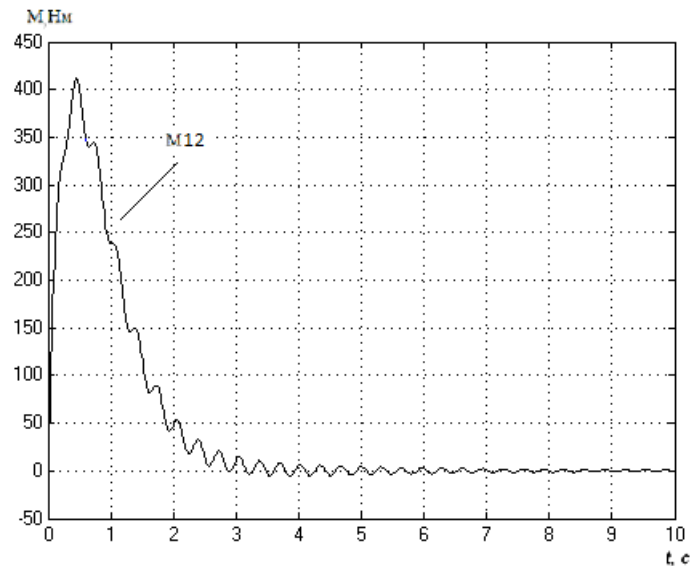


Рис. 2. Графік перехідного процесу без задатчика інтенсивності

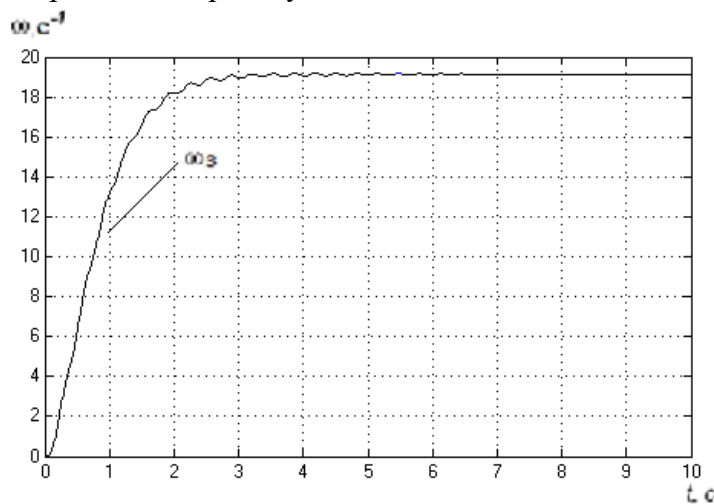


Рис. 3. Графік перехідного процесу без задатчика інтенсивності

На рис. 4 приведена структурна схема трьохмасової пружної електромеханічної системи з урахуванням програмного керування від контролерів та вдосконаленого способу переміщення. Для цього в систему введений задатчик інтенсивності, який в сукупності з коефіцієнтом  $K_d$ , забезпечує монотонне зростання моменту. Характер зростання моменту встановлено дослідженнями [1, 2]. Всі величини приведені до обертового руху вала двигуна.

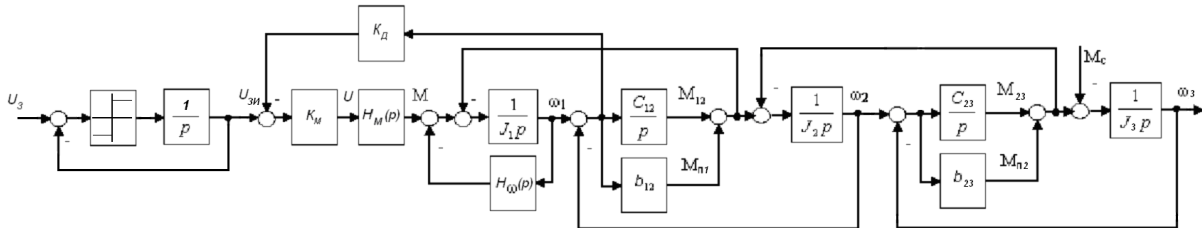


Рис. 4. Трьохмасова система з задатчиком інтенсивності при моделюванні

На рис. 5, 6 приведені результати дослідження параметрів ЕМС з задатчиком інтенсивності. На графіках перехідних процесів коливання параметрів ЕМС майже відсутні. Такі ж самі дані показують експериментальні дослідження, які були проведені на лабораторному стенді. Стенд розроблений на кафедрі електромеханічних систем автоматизації у Донбаській державній машинобудівній академії.

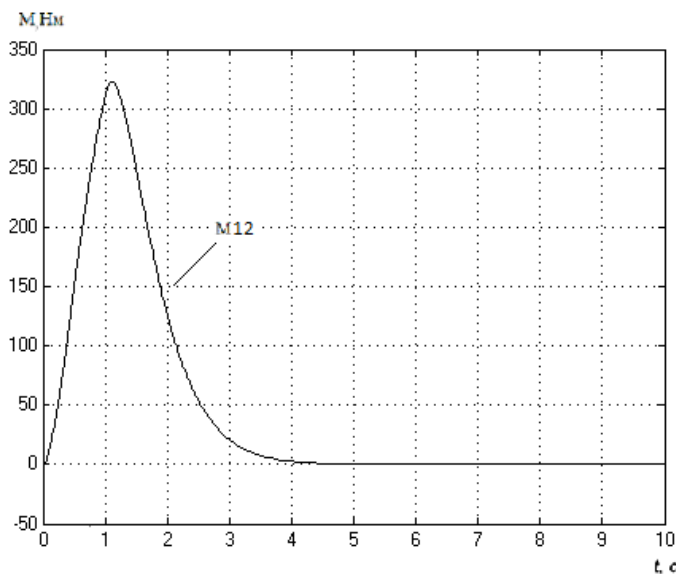


Рис. 5. Графік перехідного процесу з задатчиком інтенсивності

Лабораторний стенд являє собою мостовий кран, що має для кожного робочого руху в трьох площинах, такі самостійні механізми:

- Механізм підйому і опускання вантажу, розташований на візку, і представляє собою лебідку з поліспаком і крюком;
- Механізм пересування крана в горизонтальній площині, що приводиться в рух двома електроприводами лівої і правої частини моста;
- Механізм обслуговування зони роботи крана (пересування візка).

Електропривод всіх механізмів побудований за схемою «перетворювач частоти – асинхронний електродвигун» (ПЧ-АД), який є найбільш поширеним для сучасних кранів.

Електропривод всіх механізмів побудований за схемою «перетворювач частоти – асинхронний електродвигун» (ПЧ-АД), який є найбільш поширеним для сучасних кранів.

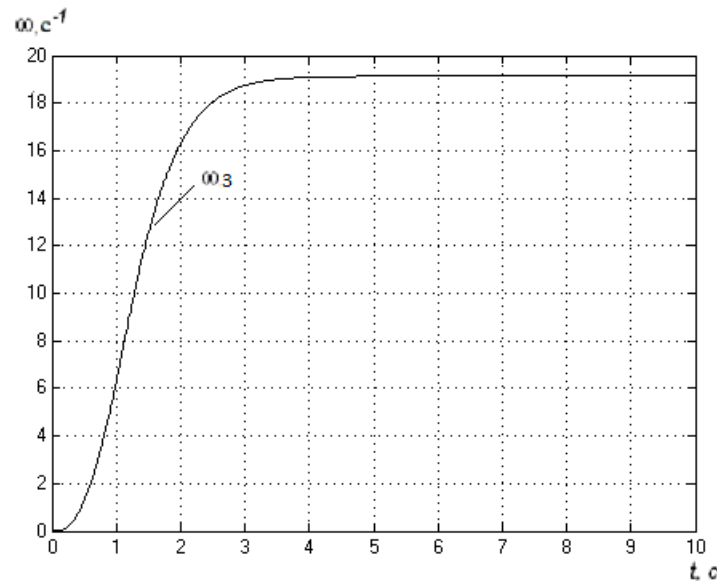


Рис. 6. Графік переходного процесу з задатчиком інтенсивності

Силова частина включає асинхронні трифазні електродвигуни (М1 М4) і інтелектуальні трифазні IGBT-модулі (АІН1 АІН4) з вбудованими датчиками струму і напруги, що реалізують зворотні зв'язки в замкнутих системах управління. Для реалізації систем управління електроприводами стенду використовуються мікропроцесорні комплекти на основі вбудованих сигнальних контролерів (DSC) серії TMS320F28xxx фірми Texas Instruments. Обчислювальна потужність комплектів і їх розвинена периферія дозволяє реалізувати як скалярні, так і векторні цифрові системи керування електроприводами стенду. Для реалізації найбільш ресурсоемнісного способу керування електроприводом (бездатчикове векторне управління) витрачається не більше 10–26% обчислювальної потужності [4, 5]. Таким чином, можливо додатково здійснювати управління технологічним процесом переміщення вантажу, не вдаючись до розширення числа обчислювальних пристроїв стенду. Управління силовою частиною АІН здійснюється за технологією ШІМ, з використанням виходів ePWM комплектів. Аналогові сигнали датчиків струму і напруги оцифровуються модулями ADC. Сигнали кінцевих вимикачів (SQ1\_1 – SQ3\_2) і пристроїв з дискретними входами або виходами обробляються пристроями введення-виведення загального призначення GPIO. Для зв'язку комплектів між собою і керуючим пристроєм верхнього рівня пропонується використовувати мережу, реалізовану засобами комплектів (CAN, SPI, SCI, I2C). Опціонально, комплекти дозволяють використовувати імпульсні енкодери (G1-G4) з підключенням до інтерфейсу eQEP.

Стенд є універсальним по відношенню до системи управління. При незмінній силовій частині, передбачено підключення різних пристроїв, що управляють, крім розглянутих комплектів (TI TMS320F2xxx), таких, як одноплатні комп'ютери RASPBERRY PI2 і подібних.

При програмуванні мікроконтролерів, програмні модулі можуть бути написані на мові Асемблер конкретного процесора або на мові високого рівня C / C ++.

Крім стандартних завдань управління технологічним процесом переміщення вантажів, в лабораторному комплексі пропонується рішення задачі демпфірування коливань вантажу, що погіршують стійкість конструкції і негативно впливають на позиціонування вантажу.

На рис.7 приведена структурна схема лабораторного комплексу.

Аналізуючи результати проведених досліджень, можна зробити наступні висновки та рекомендації:

– процес обору слабини канатів та люфту в передачі потребує розділення часу пуску двигуна на два етапи з подачею додаткового сигналу в систему керування;

- необхідно розробити задатчик інтенсивності, який буде відображати технологічні зміни, які будуть потрібні при програмованому керуванні переміщенням вантажів, наприклад, етапи розгону двигуна за новим способом підйому вантажу [3];
- необхідно ввести у електромеханічну систему крану датчик ваги вантажу з урахуванням програмованого керування процесом переміщення;
- не слід розглядати окремо електромеханічні системи підйому та переміщення вантажів;
- напрямом подальших досліджень є введення системи мікропроцесорного керування з програмним забезпеченням, що підніме ступень автоматизації в роботі механізмів мостового крану.

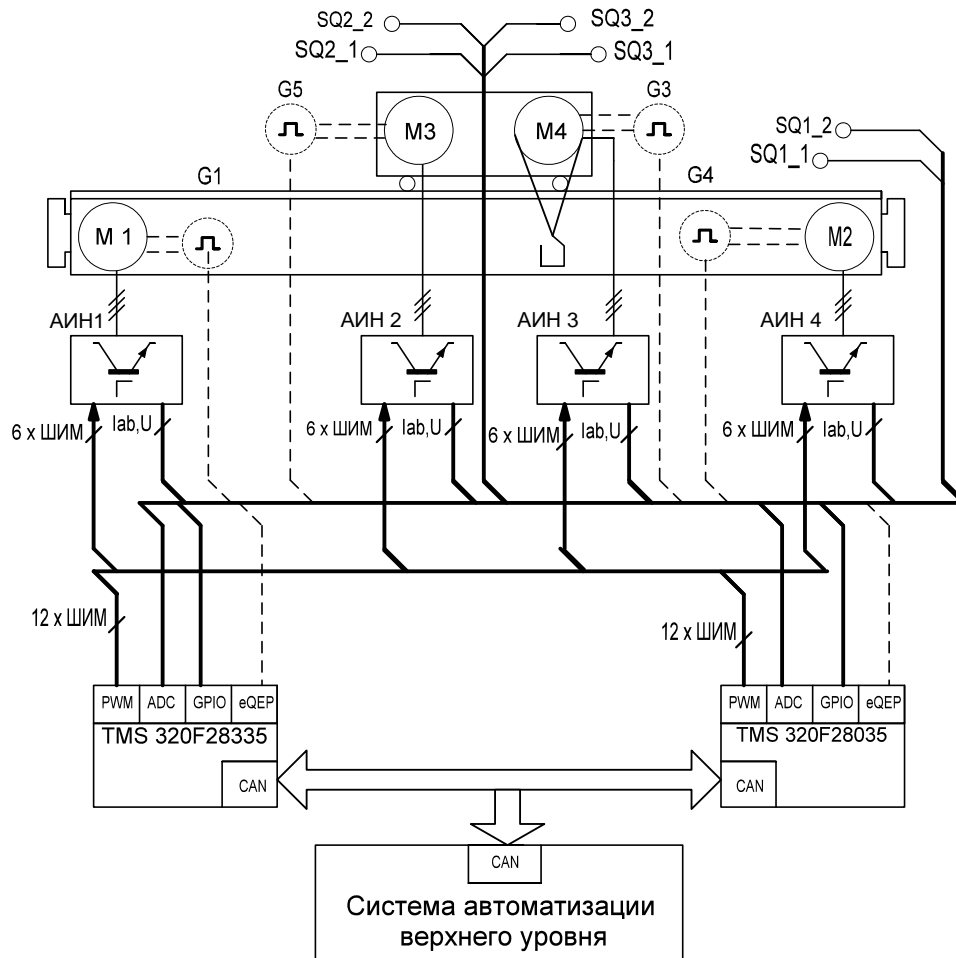


Рис. 7. Структурна схема лабораторного комплексу

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Герасимьяк Р.П. Синтез коррекции трёхмассовых электромеханических систем подъёмных механизмов / Р.П. Герасимьяк, Е.С. Пуртова // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. – Херсон: Изд.ХПУ, 2002. – №1(6). – С. 65–72.
2. Герасимьяк Р.П. Анализ и синтез крановых электромеханических систем / Р.П. Герасимьяк, А.А. Лецев. – Одесса: СМІЛ, 2008. – 192 с.
3. Патент №27558 В66F 19/00. Способ вертикального перемещения вантажів краном / Н.В. Клімченко, А.М. Спаська(Україна). – Заяв.23.05.2007. – Бюл. №18.
4. Sensorless Field Oriented Control of 3-Phase Induction Motors Using F2833x [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ti.com/>.
5. Практический курс разработки и отладки программного обеспечения сигнальных микроконтроллеров TMS320x28xxx в интегрированной среде Code Composer Studio: учеб. пособие / А. С. Анучин, Д. И. Алякин, А. В. Дроздов и др.; под общ. ред. В. Ф. Козаченко. – М.: Издательский дом МЭИ, 2010. – 270 с