

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

факультет електроніки
(повна назва інституту/факультету)

кафедра мікроелектроніки
(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

В.о.завідувача кафедри

_____ **Анатолій ОРЛОВ**
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ ” _____ 2021 р.

**Дипломна робота
на здобуття ступеня бакалавра
за спеціальністю 153 Мікро-та наносистемна техніка**
(код і назва)

на тему: Система аналізу напруженого стану металевих багатогранних опор

Виконав (-ла): студент (-ка) IV курсу, групи ДП-72
(шифр групи)

_____ **Ярмоленко Олександр Андрійович** _____
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Керівник _____ **Ст.викл. Осінов С.М** _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант з нормоконтролю _____ **доц., к.ф.-м.н., с.н.с.**
_____ **Георгій СВЄЧНІКОВ** _____

Консультант з інформаційних питань _____ **доц., к.т.н., Юрій ДІДЕНКО** _____

Рецензент _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає
запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____

(підпис)

Київ – 2021 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Інститут/факультет _____ факультет електроніки
(повна назва)

Кафедра _____ кафедра мікроелектроніки
(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність (спеціалізація) _____ 153 Мікро- і наносистемна техніка
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
В.о.завідувача кафедри
_____ Анатолій ОРЛОВ
(підпис) (ініціали, прізвище)
«__» _____ 2020 р

**ЗАВДАННЯ
на дипломний проект (роботу) студенту**

_____ Ярмоленко Олександр Андрійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Система аналізу напруженого стану металевих багатогранних опор
керівник проекту (роботи) Осінов С.М., ст.вик.,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «__» _____ 20__ р. № _____

2. Строк подання студентом проекту (роботи) _____

3. Вихідні дані до проекту (роботи): Система аналізу напруженого стану багатогранних металевих опор, яка:

- Виконує збір даних з датчиків;
- Виконує розрахунки потрібних параметрів;
- Забезпечує зручний перегляд даних;

4. Зміст (дипломної роботи) пояснювальної записки (перелік завдань, які потрібно розробити): 1) Огляд існуючих систем та методів аналізу напруженого стану; 2) Опис поведінки опор диференційними рівняннями та розв'язання їх; 3) Вибір обладнання та програмного забезпечення; 4) Реалізація та дослідження системи.

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) _____

6. Консультанти розділів проекту (роботи)*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 04.02.2020

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Підпис керівника
1.	Огляд літератури	02.03.2021	
2.	Ознайомлення з методами дослідження напруженого стану	14.03.2021	
3.	Ознайомлення з програмним забезпеченням та обладнанням	14.04.2021	
4.	Створення системи аналізу напруженого стану	14.05.2021	
7.	Оформлення дипломної роботи	01.06.2021	

Студент

_____ (підпис)

_____ **Ярмоленко О.А.**
(ініціали, прізвище)

Керівник проекту (роботи)

_____ (підпис)

_____ **Осінов С.М.**
(ініціали, прізвище)

* Консультантом не може бути зазначено керівника дипломного проекту (роботи)

РЕФЕРАТ

Роботу викладено на 62 сторінках, вона містить 4 розділи, 24 ілюстрацій, 5 таблиць і 19 джерел в переліку посилань.

Об'єктом дослідження є система дослідження напруженого стану багатогранних металевих опор.

Предмет роботи – дослідження реакції багатогранних металевих опор на силові впливи системою аналізу напруженого стану.

Мета роботи – розробка системи за допомогою якої можна досліджувати багатогранні опори, згинальні моменти вздовж опори, знаходити прогини балки за допомогою метода кінцевих різниць.

В першому розділі подано огляд літератури, в якому розглядається інформація про самі багатогранні металеві опори, фактори впливу на напружений стан, методи та засоби досліджень.

В другому розділі роботи зроблений математичний опис поведінки опори, розглянуто метод кінцевих різниць для подальшого його застосування в програмі.

В третьому розділі роботи подано синтез самої системи, підбір обладнання та програмного забезпечення, побудовано принципові схеми підключення датчиків, описано створення самої системи в програмі NI LabView.

В четвертому розділі роботи подано дослідження системи, перевірка її роботи.

ABSTRACT

The work is presented on 62 pages, it contains 4 sections, 24 illustrations, 5 tables and 19 sources in the list of references.

The object of the study is a system for studying the stress state of polyhedral metal supports.

The subject of the work is the study of the reaction of multifaceted metal supports to force influences by the stress state analysis system.

The purpose of the work is to develop a system with the help of which it is possible to investigate multifaceted supports, bending moments along the support, to find the deflections of the beam using the method of finite differences.

The first section presents a review of the literature, which discusses information about the most multifaceted metal supports, stress factors, methods and research tools.

In the second section of the work a mathematical description of the behavior of the support is made, the method of finite differences for its further application in the program is considered.

The third section presents the synthesis of the system itself, the selection of equipment and software, the basic schemes of connection of sensors, describes the creation of the system itself in the program NI LabView.

The fourth section of the work presents a study of the system, checking its operation.

**ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,
УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ**

БГС – багатогранні гнуті стійки;

ПЛ – повітряні лінії;

НДС – напружено-деформаційний стан;

ЛЕП – Лінії електропередач;

АЦП – аналогово-цифровий перетворювач;

ПК – персональний комп'ютер;

МКР – метод кінцевих різниць;

LV- LabVIEW;

ШІМ – Широтно-імпульсна модуляція;

СЛАР – Система лінійних алгебраїчних рівнянь;

ЗМІСТ

ВСТУП	9
1. ТЕОРЕТИЧНІ ПОНЯТТЯ ПРО БАГАТОГРАННІ ОПОРИ	10
1.1. Металеві багатогранні опори	10
1.2. Перспективи виготовлення і застосування БГС	12
1.3. Огляд літератури	13
1.4. Фактори які впливають на напружений стан конструкції	14
1.5. Методи та засоби визначення напруженого стану	15
1.6. Випробовування багатогранних металевих конструкцій.	16
2. МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС ОБ'ЄКТА	19
2.1. Опис поведінки балки диферинційними рівняннями	19
2.2. Метод безпосереднього інтегрування	23
2.3 Метод кінцевих різниць	26
3. СТВОРЕННЯ СИСТЕМИ АНАЛІЗУ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ МЕТАЛЕВИХ БАГАТОГРАННИХ ОПОР	31
3.1. Вибір обладнання	31
3.1.1. Двовісні датчики нахилу з IO-Link JN2201	31
3.1.2. Датчик тиску з дисплеєм PN2021	33
3.2. Мікроконтролер Arduino	37
3.2.1. Arduino Nano	39
3.3. Програмне забезпечення	41
3.3.1. Ni LabView для візуалізації вимірювань та розрахунків	41
3.3.2. Arduino IDE для програмування мікроконтролера	42
3.4. Підключення датчиків	42
3.5. Розробка системи в LabVIEW	45
3.5.1. Реалізація збору даних з датчиків	46
3.5.2. Розрахунок параметрів	47

	8
3.6. Розробка друкованої плати	50
4. ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ	52
ВИСНОВОК	54
СПИСЛІК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ	55
Додаток А	56
Додаток Б	57
Додаток В	60
Додаток Г	61
Додаток Д	62

ВСТУП

Довговічність будівельних конструкцій міських інженерних споруд безпосередньо залежить від силових впливів і впливу середовища під час експлуатації. У теперішній час поряд з новим будівництвом широко застосовуються багатогранні металеві опори. Очевидно, що стабільний і безаварійний розвиток конструкцій з використанням таких опор неможливий без налагодженої системи їх досліджень

Одним зі складових системи моніторингу може бути аналіз прогинів в залежності від силових впливів, утворення деформацій, проведення динамічних випробувань. В даний час розробка нових ефективних приладів та обладнання сприяє розвитку експериментальних методів визначення напружено-деформованого стану таких конструкцій. В процесі експлуатації об'єктів і при підготовці їх до реконструкції виникає необхідність у визначенні стійкості тких опор при навантаженнях для найбільш ефективного їх подальшого використання.

Конструкції багатогранних гнутих стійок (БГС), незалежно від свого призначення в якості будівельних конструкцій, є новими на території СНД. Вивчення дійсної роботи БГС під навантаженням, а внаслідок і напружено-деформованого стану (НДС), безсумнівно, є важливим аспектом для їх широкого поширення не тільки в нашій країні, а й за кордоном.

1. ТЕОРЕТИЧНІ ПОНЯТТЯ ПРО БАГАТОГРАННІ ОПОРИ

1.1. Металеві багатогранні опори

Сталеві багатогранні стійки (рис.1.1) являють собою конічні труби коробчатого багатогранного перетину, що виготовляються вигином сталевих листів з подальшим зварюванням його країв на ребрі або межі. Висота стійки h досягає 80м з товщиною стінки до 20мм, діаметр стійки d_k варіюється в межах 250 ... 3000мм, діаметр верху стійки - в межах 200 ... 500мм [2,3].

Для багатогранних опор характерно особливий перетин профілю, як правило, у формі шестикутника. Головною відмінністю виступає наявність граней ствола. У виробництві опор використовується листові сталь, якій методом гнуття надають потрібну форму.

У світовій практиці досвід застосування опор на основі металевих багатогранних гнутих стійок (БГС) налічує близько 40 років. Основна область їх застосування - опори повітряних ліній електропередачі (ПЛ). Опори на основі БГС широко використовуються в ланцюгах всіх класів напруг в якості проміжних і анкерних опор, порталів розподільних пристроїв, стійок під електрообладнання електричних підстанцій.

Крім цього, БГС можуть застосовуватися як в'їзні знаки, опори зовнішнього освітлення вулиць, рекреаційних і промислових зон, автомагістралей, освітлювальні опори спортивних споруд, як тілі, радіовежі, як опори контактної мережі міського та залізничного транспорту і т.д. Велике різноманіття конструкцій стійок, вузлів кріплення їх секцій і методів закріплення в ґрунті.

Важливо відзначити, що результативна база, отримана при дослідженнях роботи даних конструкцій, є незамінним фактором при їх створенні. Тому

питання якісного виготовлення конструкцій, заснованого на результатах регресійного аналізу НДС багатограних стійок, безумовно, є актуальним.

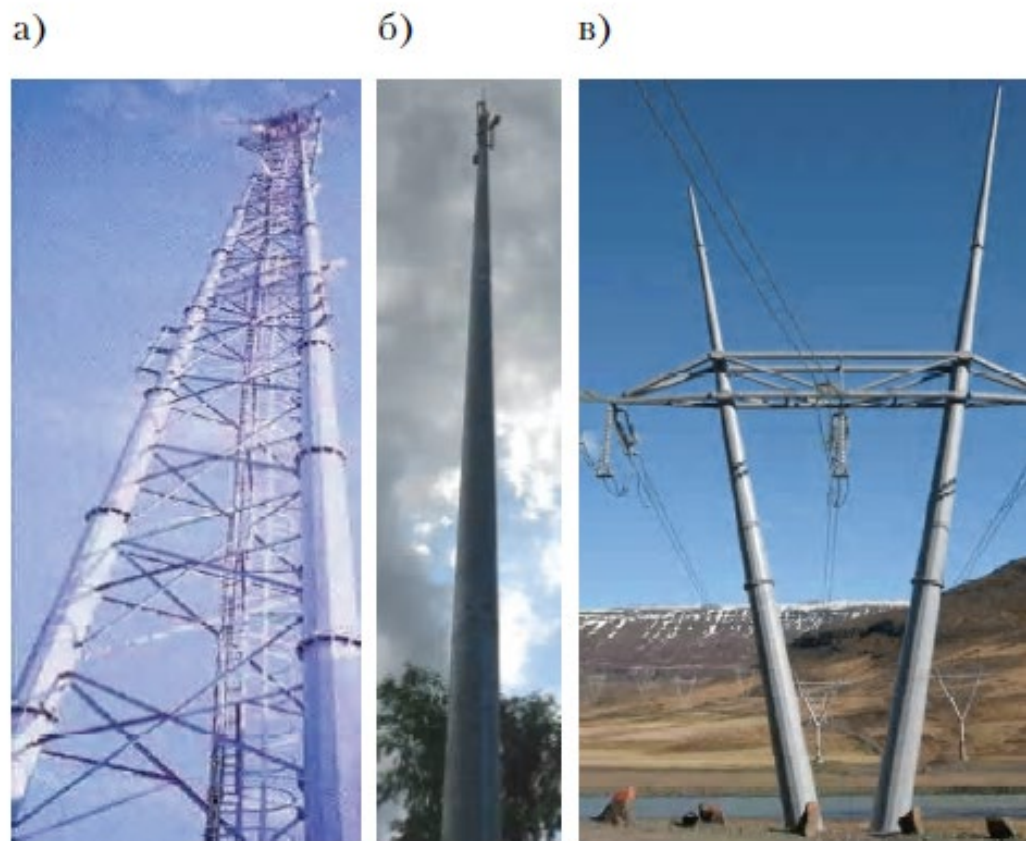


Рис. 1.1 - Конструкції на основі металевих багатограних гнутих стійок:
а), б) вежі мобільного зв'язку; в) анкерна опора ПЛ 420кВ [5]

БГС, особливо застосовне до опор повітряних ліній (ПЛ), є маловивченими листовими металевими конструкціями в областях виготовлення, розрахунку та експлуатації. Відсутність нормативної документації по вищезгаданих напрямках ще більше підкреслює значимість досліджень по вивченню НДС даних конструкцій. У зв'язку з цим виникає актуальне питання про створення необхідної нормативної бази для втілення в життя проектів, пов'язаних із застосуванням БГС.

1.2. Перспективи виготовлення і застосування БГС

Очевидно, що багатогранні опори як в нашій країні, так і за кордоном кращі для використання в міських умовах, де особливу увагу приділяють естетичним властивостям будівельних конструкцій і існують серйозні проблеми із землевідведенням, а також в гірських і важкодоступних районах. Але, не дивлячись на безліч позитивних якостей, конструкції на основі БГС протягом останніх 40 років не отримали широкого практичного застосування на території України. Це пов'язано в першу чергу зі складною, трудомісткою і дорогою технологією виготовлення, що вимагає від заводу виробника відповідних виробничих потужностей та спеціалізованого обладнання. За останнє десятиліття будівництво в Україні (особливо електромережеве) все частіше звертає увагу на конструкції БГС (як заміна існуючих залізобетонних і металевих ґратчастих стійок різного призначення) і все ширше стає область їх застосування [2,4].

З особливостей багатогранних опор відзначають невелику вагу, довговічність, простий, але сучасний і універсальний дизайн. Подібні стовпи можуть виготовлятися за індивідуальними розмірами. Їх визначають у ході розрахунку багатогранних опор, який також враховує, з якою метою вони будуть використовуватися:

- в якості опор для повітряних ліній електропередач (ЛЕП);
- опор освітлення;
- високомачтових опор освітлення зі стаціонарною або мобільною короною висотою до 50 м і більше;
- транспортних опор контактної мережі для наземного електротранспорту;
- щогл зв'язку;
- опор для світлосигнального обладнання та світлофорів;
- сталевих блискавковідводів[6].

Сталеві багатогранні опори можна експлуатувати в населеній і незаселеній місцевості в I-V ожеледних і вітрових районах. Допустима температура повітря - до -65°C .

У порівнянні з трубчастими, багатогранні опори мають значно меншу вагу, що спрощує їх транспортування і установку. Ще одна перевага - при меншій масі такі опори мають збільшену несучу здатність[6].

Таким чином, здатність витримувати великі навантаження дозволяє розміщувати на гранованих опорах додаткове обладнання, а не тільки світильники.

Остання важлива характеристика багатогранних опор освітлення - знижена витрата металу. Для їх виробництва потрібно менше сировини, ніж для виготовлення трубчастих. За рахунок цього багатогранні опори мають меншу вагу і меншу кінетичну енергію. Завдяки таким властивостям під час аварійних ситуацій вони отримують менше пошкоджень.

1.3. Огляд літератури

У літературних джерелах неодноразово відзначаються основні переваги багатогранних конструкцій в порівнянні з аналогами бетонного і металевого гратчастого виконання (виходячи з зарубіжного досвіду будівництва і експлуатації конструкцій на основі БГС) такі як естетичність, адаптивність, транспортабельність, швидкість монтажу, безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність, повна автоматизація виробництва, а внаслідок, економічна ефективність. Але, поряд з перевагами, конструкції БГС мають ряд недоліків: конструктивні недоліки, пов'язані з неефективністю перетину і його невідповідністю величинам діючих навантажень, які приводять до істотного перевитрати матеріалу і відсутності забезпечення рівномірності конструкції у всіх напрямках (особливо для опор ПЛ); монтажні недоліки, виражені в

складності виконання вантажно-розвантажувальних робіт і робіт по установці конструкцій стійок; експлуатаційні недоліки, пов'язані з наявністю закритих, непровітрюваних порожнин.

Аналіз методик визначення вітрового навантаження, запропонованих нормативними документами України, Росії та Європи, показав їх основний недолік, пов'язаний з відсутністю залежності аеродинамічних коефіцієнтів від вітрового азимута β і критерію справедливості аеродинамічних коефіцієнтів критичного числа Рейнольдса $Re_{кр}$ від кількості граней стійок, а також відсутність епюр вітрового тиску, що в свою чергу не дає повної картини розподілу вітрового впливу в перерізі БГС. Важливо відзначити суперечливість вітчизняних і зарубіжних нормативних документів, яка складається в розходженні значень коефіцієнтів лобового опору аналогічних багатогранників і критичного числа Рейнольдса, при якому справедливі значення цих коефіцієнтів. Тому необхідне проведення експериментальних досліджень вітрового впливу на конструкції БГС по визначенню коефіцієнтів локального вітрового тиску C_{pi} та лобового опору C_{xi} в залежності від геометричних параметрів стійок і кута вітрової атаки (вітрового азимута β).

1.4. Фактори які впливають на напружений стан конструкції

Під фактором впливу ми будемо розуміти - параметр (змінна величина), який впливає на напружено деформований стан металевих конструкцій.

Аналіз літератури показав, що фактори впливу можна розділити на 2 групи: природні і техногенні. Одна з можливих класифікацій факторів впливу на НДС металевих конструкцій приведена на (рис. 1.2)[7].



Рис. 1.2 - Класифікація факторів впливу[7]

1.5. Методи та засоби визначення напруженого стану

Судити про напружений стан можна за деформацією тіла, що з'явилася як результат спільної дії зовнішніх сил і внутрішніх сил опору. Такий підхід виявляється можливим лише для ідеально пружного тіла. Пружно-пластичне тіло, перебуваючи під постійним навантаженням, продовжує деформуватися з часом, і, отже, в різні моменти часу одним і тим же значенням напружень відповідають різні значення деформацій.

З метою запобігання аварій промислових та житлових будівельних конструкцій потрібно контролювати діючі навантаження. Для цього використовують датчики для вимірювання деформацій і напружень, що розташовуються на поверхні та у товщі будівельних конструкцій, що дозволяють визначити момент наближення параметрів та стану конструкцій до небезпечних меж.

Метод тензометрії полягає у визначенні напруженого стану за рахунок виміру деформацій, постійних пружності і деформативності бетону з подальшим обчисленням напружень. Завдяки простоті, дешевизні і високій якості тензорезисторів, що випускаються промисловістю, цей метод знайшов широке застосування в практиці експериментальних досліджень будівельних конструкцій, в тому числі і комбінованих.

Деякі різновиди тензорезисторних датчиків представлені на(рис.1.3).

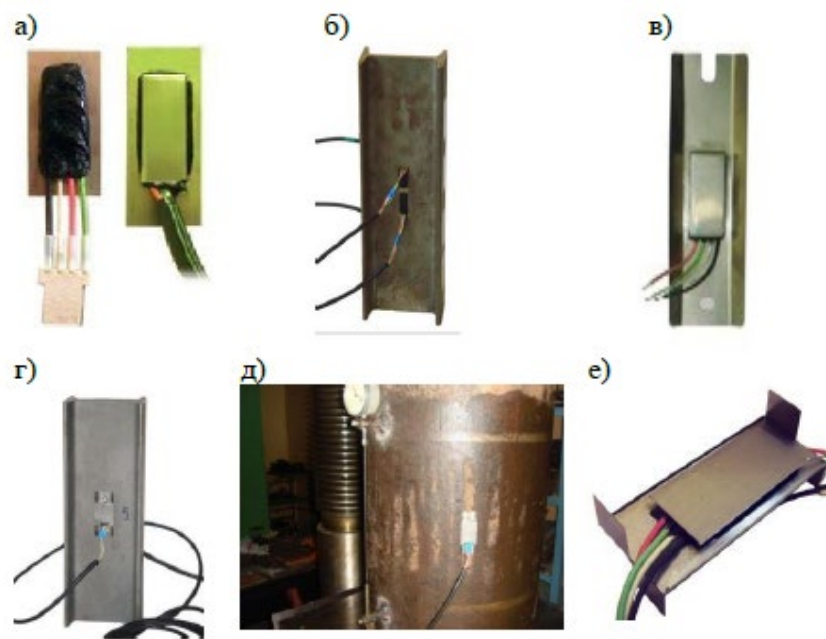


Рис. 1.3 - Загальний вигляд датчиків деформацій: а - приварювальний датчик деформацій, б - установка приварювального датчика деформації на двотавр № 10, в - зйомний датчик деформації, г - установка зйомного датчика деформації на двотавр № 10, д - перевірка вимірювального каналу на реальній будівельній конструкції, е – закладний датчик деформації[3]

1.6. Випробовування багатограних металевих конструкцій

Опори розраховуються по методу граничних станів, основні положення якого спрямовані на забезпечення безвідмовної роботи конструкцій з урахуванням мінливості властивостей матеріалів, навантажень і впливів, геометричних характеристик конструкцій, умов їх роботи [8]. Граничні стани, за якими проводиться розрахунок опор ПЛ, їх фундаментів і

підстав, поділяються на дві групи. Перша група включає граничні стани, які ведуть до втрати несучої здатності елементів або до повної непридатності їх до експлуатації, тобто до їх руйнування будь-якого характеру. До цієї групи відносяться стану при найбільших зовнішніх навантаженнях і при нижчій температурі, тобто при умовах, які можуть призвести до найбільших изгибающим або обертовим моментів на опори, найбільшим стискаючим або розтягуючих зусиллям на опори і фундаменти. Друга група включає граничні стани, при яких виникають недопустимі деформації, переміщення або відхилення елементів, що порушують нормальну експлуатацію, до цієї групи відносяться стану при найбільших прогинах опор. Метод розрахунку за граничними станами має на меті не допускати, з певною ймовірністю, настання граничних станів першої і другої груп при експлуатації, а також першої групи при виробництві робіт по спорудженню ПЛ[8].

При впровадженні нових типів опор виникає необхідність у визначенні їх фактичної несучої здатності при прикладанні до них випробувального навантаження, що відповідає реальному. Однак через складність і трудомісткості, в деяких випадках при цих випробуваннях моделювання навантажень зводиться в одну силу, прикладену до верхнього кінця опори, що знижує об'єктивність і якість її контролю[9].

До найбільш важких аварій на ПЛ відносяться ожеледні аварії, внаслідок яких виникають масові обриви проводів, каскадні руйнування опор анкерної ділянки ПЛ. На частку зазначених аварій припадає 25% пошкоджень ПЛ, а їх тривалість складає приблизно 40% аварійних відключень. Одним з факторів, що обумовлюють ці аварії, на нашу думку, є недоліки динамічних навантажень при проектуванні ВЛ[9].

Відомі способи випробування опор створюють поздовжні і поперечні статичні навантаження, прикладені до опори. У реальних умовах експлуатації значна частина пошкоджень опор пов'язана з впливом на них динамічних навантажень, які можуть перевершувати статичні.

Для отримання дійсної роботи опори і точної аналітики випробувань необхідно в режимі реального часу змодельовати і докласти на всю конструкцію вітрові та ожеледні навантаження, вага від елементів контактної мережі, дорожніх і рекламних знаків і т.д.

Метою випробування опори є визначення її фактичної несучої здатності і жорсткості, а також визначення співвідношення цих параметрів з результатами розрахунку

2. МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС ОБ'ЄКТА

2.1. Опис поведінки балки дифференціальними рівняннями

Під дією зовнішніх сил балка деформується таким чином, що її поздовжня вісь викривляється. Якщо вигин балки відбувається в межах пружних властивостей матеріалу, то після зняття навантаження вісь балки випрямляється. Вигнуту вісь балки називають пружною лінією, а переміщення точок осі балки по нормалі до її недеформованої осі - прогибами балки (прогинами осі балки, прогибами перетинів балки). Позначимо прогини балки через y (рис. 2.1). Максимальний прогин називається стрілою прогину і позначається y_{max} [11].

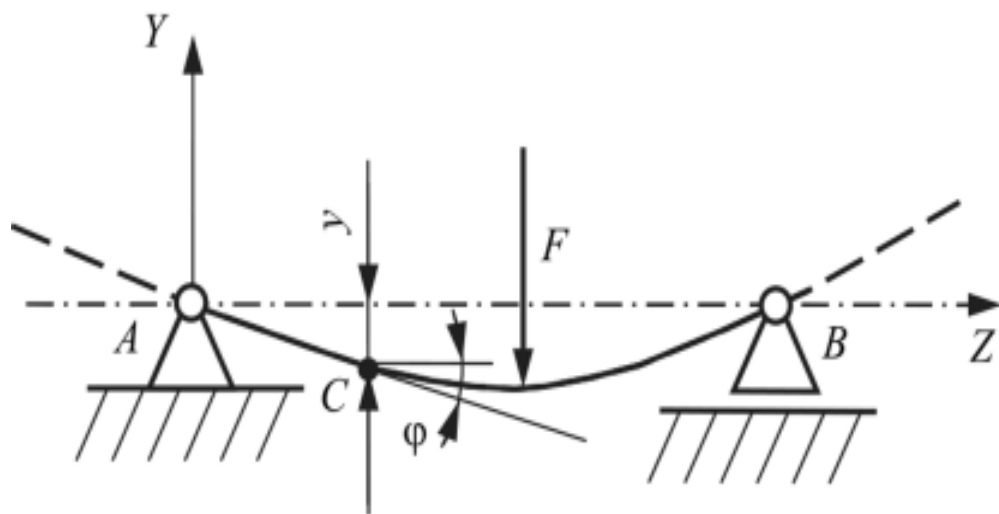


Рис. 2.1 - Схема визначення параметрів[11]

При деформації балки її поперечний переріз залишаючись плоским, повертається, зберігаючи перпендикулярність до вигнутої осі балки. Кут повороту φ поперечного перерізу дорівнює куту між дотичною до вигнутої осі балки в даній точці і напрямком осі недеформованої балки (рис. 2.1)

Для визначення зігнутої осі балки необхідно скласти її рівняння, тобто виразити ординати (прогини балки) від положення точок по довжині, іншими

словами, знайти залежність $y = I(z)$. Щоб знайти цю залежність, використовуємо рівність, отримане при виведенні формули нормальних напружень при згині:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M_x}{EJ_x}. \quad (2.1)$$

З курсу вищої математики відомо, що в системі координат y, z радіус кривизни кривої $y = f(z)$ при малих кутах повороту перетинів може бути виражений рівністю:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{d^2y}{dz^2}, \quad (2.2)$$

Тобто:

$$\frac{d^2y}{dz^2} = \frac{M_x}{EJ_x}, \text{ або } y'' = \frac{M_x}{EJ_x}, \quad (2.3)$$

Де:

M_x - момент, що вигинає балку; J_x - осьовий момент інерції поперечного перерізу; E - модуль пружності матеріалу балки.

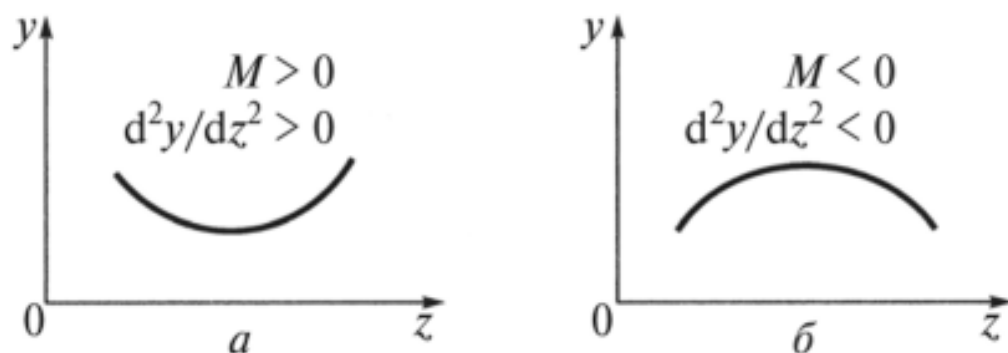


Рис.2.2 - Залежність параметрів від прогину[10].

Рівняння (2.3) називається наближеним диференціальним рівнянням вигнутої осі балки. Правило знаків другої похідної пов'язано з вибором напрямку осей координат, а правило знаків згинальних моментів встановлено по виду зігнутої осі ($M_x > 0$, коли вісь балки звернена опуклістю вниз). Рівність буде погоджено по знакам величин, якщо вісь z спрямована зліва направо, а вісь y - вгору (рис. 2.1).

Визначити кутові і лінійні переміщення можна інтеграцією диференціального рівняння пружної лінії (2.3) або одним із загальних методів визначення переміщень (методами Кастільяно, Мора, Верещагіна).

Інтегруючи рівняння (2.3), можна отримати рівняння кутів повороту перетину

$$\varphi = \frac{dy}{dz} = \frac{1}{EJ_x} \left(\int M_x(z) dz + C \right). \quad (2.4)$$

У цьому рівнянні постійна інтегрування C відповідає значенню кута повороту φ_0 на початку відліку, при $z = 0$

$$C = EJ_x \varphi_0. \quad (2.5)$$

Інтегруючи рівняння (2.3) вдруге, отримуємо рівняння прогинів:

$$y = \frac{1}{EJ_x} \left(\int \int M_x(z) dz + Cz + D \right). \quad (2.6)$$

Позитивне значення y означає прогин вгору, і навпаки; позитивне значення φ означає поворот перетину проти годинникової стрілки, і навпаки.

Значення постійних C і D визначають з граничних умов, тобто умов обпирання балки і умов на кордонах суміжних ділянок. У будь-якому випадку таких умов є не менше двох. Наприклад, у вільно лежачої балки (рис. 2.3, а)

прогини на обох шарнірних опорах дорівнюють нулю. Крім того, при симетричному навантаженні дорівнює нулю і кут повороту перетину в середині прольоту (рис. 2.3., б).

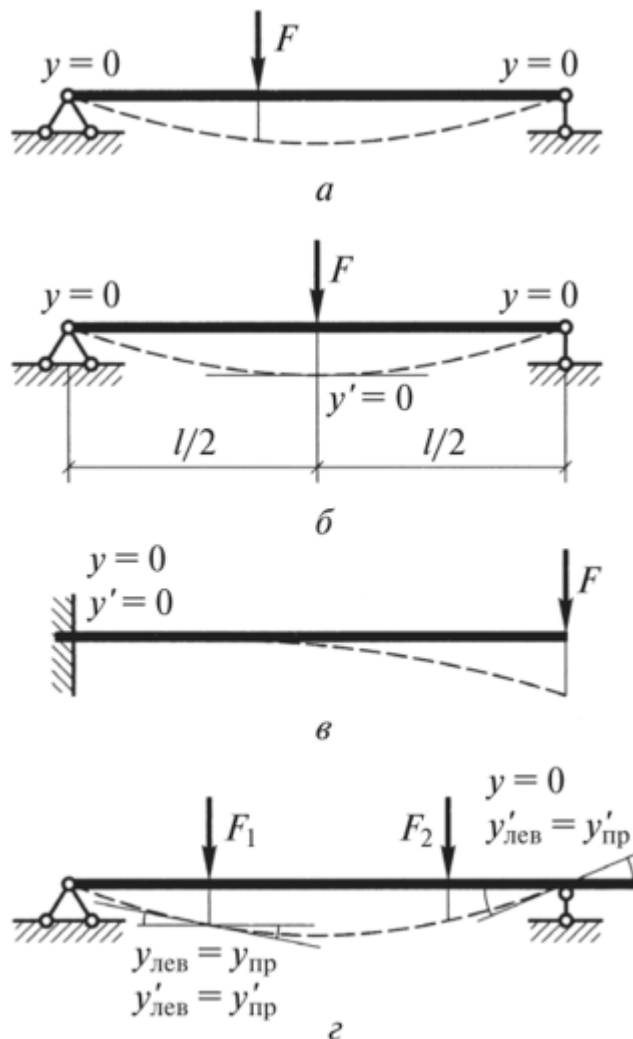


Рис.2.3 - Варіанти прикладення сили[10]

Консоль має нульові прогин і кут повороту в закладенні (рис. 2.3, в). На границі суміжних ділянок балки (рис. 2.3, г) прогин і кут повороту однакові як для лівого, так і правої ділянок, тобто переміщення, отримане з рівняння для лівого ділянки, обов'язково дорівнює переміщенню, знайденому з рівняння для правої ділянки.

Вираз (3.3) можна використовувати при досить малій кривизні зігнутої осі, що завжди має місце в реальних будівельних конструкціях. Зважаючи на

викладене, рівняння (2.1) можна вважати наближеним диференціальним рівнянням вигнутої осі балки, справедливим при малих прогинах.

Якщо прогини балки НЕ малі в порівнянні з її довжиною, то в лівій частині рівняння (2.1) треба використовувати влучний вираз для кривизни зігнутої осі:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\frac{d^2 y}{dx^2}}{\left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}}. \quad (2.7)$$

При цьому диференціальне рівняння зігнутої осі балки стає нелінійним, що істотно ускладнює його інтегрування. Надалі будемо використовувати тільки наближене рівняння (2.1), оскільки воно дозволяє отримувати практично точні рішення для більшості завдань вигину балок.

2.2. Метод безпосереднього інтегрування

Цей метод зводиться до інтегрування диференціального рівняння зігнутої осі балки (2.1) при відомому законі зміни згинальних моментів $M(x)$. Вважаючи жорсткість балки при вигині постійною ($EJ = \text{const}$) і послідовно інтегруючи рівняння (2.1), отримаємо:

$$\left. \begin{aligned} EJv'' &= -M(x); \\ EJv' &= EJ\varphi(x) = -\int M(x)dx + C_1; \\ EJv(x) &= -\int dx \int M(x)dx + C_1x + C_2; \end{aligned} \right\}. \quad (2.8)$$

У виразах (2.8) і в подальшому для спрощення запису опущені індекси у моментів інерції і згинальних моментів.

Вирази (2.8) дозволяють отримати аналітичні закони зміни прогинів і кутів повороту в балці. Вхідні в (2.8) постійні інтегрування C_1 і C_2 підлягають визначенню з кінематичних граничних умов і умов сполучення ділянок балки.

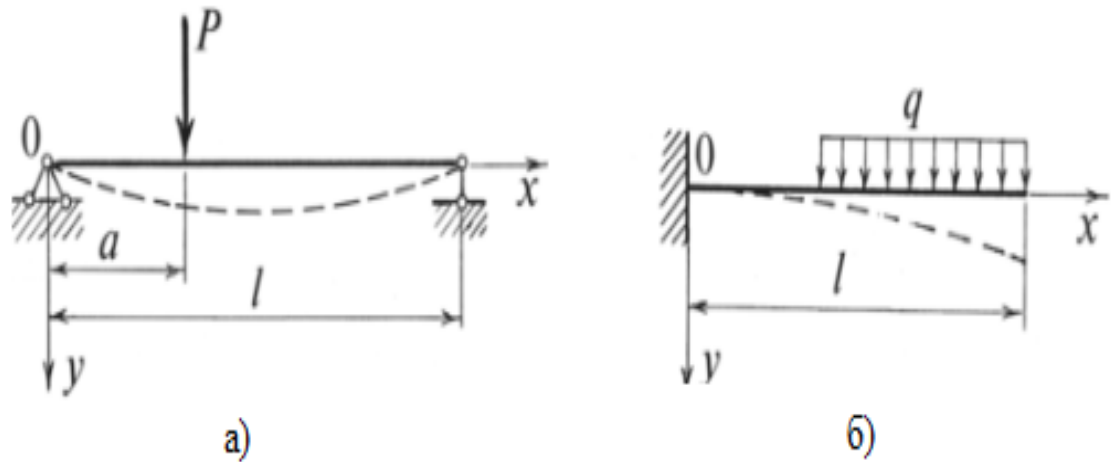


Рис.2.4 - а) шарнірно оперта балка; б) консольна балка[10]

Кінематичні граничні умови відображають характер закріплення (обпирання) балки і ставляться щодо прогинів і кутів повороту. Наприклад, для шарнірно опертої балки (рис. 2.4, а) граничні умови характеризують відсутність прогинів на опорах: $x = 0, x = l, v = 0$. Для консольної балки (рис. 2.4, б) граничні умови характеризують рівність нулю прогину і кута повороту в жорсткому закладанні: $x = 0, v = 0; \varphi = 0$.

Умови сполучення ставляться на кордонах ділянок з різними законами зміни згинальних моментів. При відсутності проміжних шарнірів і так званих Паралелограмна механізмів (повзунів) умови сполучення полягають в рівності прогинів і кутів повороту в перетинах зліва і праворуч від межі ділянок, тобто вони характеризують безперервність і гладкість зігнутої осі балки. Наприклад, для балки на (рис. 2.4, а). можна записати: $x = a, v_{\text{пр}} = v_{\text{лев}}; \varphi_{\text{пр}} = \varphi_{\text{лев}}$.

При наявності n ділянок з різними законами зміни згинальних моментів вираз для прогину буде містити $2n$ постійних інтегрування. Використовуючи граничні умови і умови сполучення ділянок, можна отримати систему $2n$ лінійних алгебраїчних рівнянь щодо цих постійних. Після визначення всіх

постійних інтегрування будуть встановлені закони зміни $u(x)$ і $\varphi(x)$ в межах кожної ділянки балки. Розглянемо приклади визначення прогинів і кутів повороту в балках за допомогою методу безпосереднього інтегрування.

Приклад. Визначимо аналітичні вирази для $u(x)$ і $\varphi(x)$ в консольній балки, навантаженої рівномірно розподіленим навантаженням (рис. 2.5), і обчислимо значення цих величин на вільному кінці.

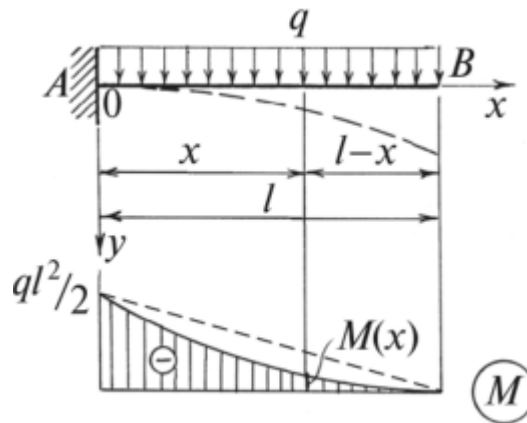


Рис.2.5 - Балка навантажена рівномірним навантаженням[10,11]

Згинальний момент в балці на всій її довжині змінюється за законом квадратної параболи:

$$M(x) = -\frac{q(l-x)^2}{2}. \quad (2.9)$$

Підставами цей вислів в рішення (3.8.) і інтегруємо його:

$$EJv''(x) = \frac{q(l-x)^2}{2}, \quad (2.10)$$

$$EJv'(x) = EJ\varphi(x) = -\frac{q(l-x)^3}{6} + C_1, \quad (2.11)$$

$$EJv(x) = \frac{q(l-x)^4}{24} + C_1x + C_2, \quad (2.12)$$

Використавши граничні умови, визначимо постійні інтегрування:

$$x = 0, \quad EJv(0) = \frac{ql^4}{24} + C_2 = 0, \quad C_2 = -\frac{ql^4}{24}, \quad (2.13)$$

$$EJ\varphi(0) = -\frac{ql^3}{6} + C_1 = 0, \quad C_1 = \frac{ql^3}{6}. \quad (2.14)$$

Запишемо остаточні вирази для прогинів і кутів повороту в балці і визначимо значення цих величин на вільному кінці:

$$v(x) = \frac{1}{EJ} \left[\frac{q(l-x)^4}{24} + \frac{ql^3}{6}x - \frac{ql^4}{24} \right], \quad (2.15)$$

$$\varphi(x) = \frac{1}{EJ} \left[-\frac{q(l-x)^3}{6} + \frac{ql^3}{6}x \right], \quad (2.16)$$

$$v_B = v(l) = \frac{ql^4}{8EJ}, \quad (2.17)$$

$$\varphi_B = \varphi(l) = \frac{ql^3}{6EJ}, \quad (2.18)$$

2.3. Метод кінцевих різниць

З розвитком обчислювальної техніки в механіці деформованого твердого тіла набули широкого поширення чисельні методи. До числа найбільш використовуваних методів відносяться методи кінцевих різниць, кінцевих і граничних елементів. Ці методи засновані на різних способах наближеного математичного опису поведінки деформованого твердого тіла.

У методі кінцевих різниць (МКР) на область розглянутого тіла наноситься сітка ліній, точки перетину яких називаються вузлами. У разі стрижня або балки сітка буде одновимірною і вузли будуть розташовуватися на їх осі. Невідомими в вузлах вважаються значення функцій, щодо яких справедливі відомі диференціальні рівняння механіки деформованого твердого тіла.

Похідні в диференціальних рівняннях апроксимуються наближеними алгебраїчними формулами. Ці формули називаються кінцево-різницевиими і невідомими в них є значення функцій у вузлах. Заміна похідних в

диференціальному рівнянні кінцево-різницевиими формулами призводить до системи лінійних алгебраїчних рівнянь.

Граничні умови, що містять похідні, за допомогою кінцево-різницевих формул також замінюються алгебраїчними рівняннями. Рішення системи лінійних алгебраїчних рівнянь дозволяє знайти розподіл напружень в тілі і зміни його розмірів і форми.

Розглянемо найпростіші приклади наближеного розв'язання крайових задач для деформованого твердого тіла методом кінцевих різниць.

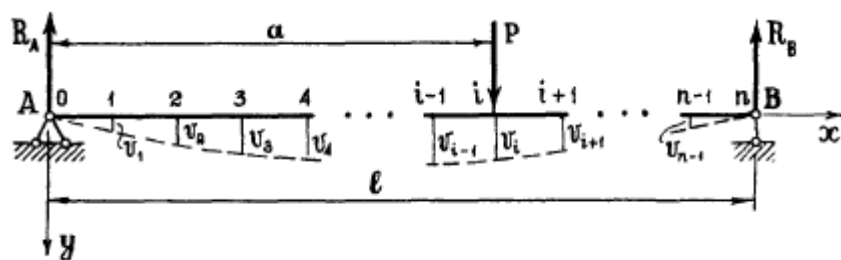


Рис.2.6 - Вигин вільно опертого стовпа [10]

Для розв'язку використаємо формули (2.3). Це рівняння разом з граничними умовами (на кінцях балки відсутні прогини, $x = 0$, $x = l$, $v = 0$) утворюють крайову задачу.

Згинальний момент $M(x)$ дорівнює

$$M(x) = \begin{cases} R_A x, & x \leq a; \\ R_A x - P(x - a), & x > a. \end{cases} \quad (2.19)$$

Тут $R_A = \left(1 - \frac{a}{l}\right)P$ – реакція лівої опори.

Для консольно закріпленої балки з однієї сторони значення моменту буде:

$$M(x) = \begin{cases} -\left(1 - \frac{x}{a}\right), & x \leq a; \\ 0, & x > a. \end{cases} \quad (2.20)$$

Перейдемо від крайової задачі до кінцево-різницевої системи лінійних алгебраїчних рівнянь.

Розділимо вісь балки на n рівних частин (у загальному випадку розбиття може бути і нерівномірним). Відстань між двома сусідніми вузлами назовемо кроком сітки і позначимо h . При розподілі балки на рівних частин $h = \frac{l}{n}$.

Розглянемо три сусідні вузли з номерами $i-1, i, i+1$ (рис. 2.6). Координати цих вузлів будуть x_{i-1}, x_i, x_{i+1} , при цьому $x_i = ih, x_{i-1} = x_i - h, x_{i+1} = x_i + h$.

Прогин балки в вузлі i позначимо $v_i = v(x_i) (i = 0, 1, 2, \dots, n)$.

В відповідності до прийнятих позначень крайові умови запишуться наступним чином:

$$v_0 = 0; v_n = 0. \quad (2.21)$$

Для апроксимації в вузлі i другої похідної $\frac{d^2v}{dx^2}$ кінцево-різницевою формулою розкладемо $v(x_{i+1})$ і $v(x_{i-1})$ в ряди Тейлора в околі вузла i , припускаючи, що величина h мала, а функція $v(x)$ має неперервні похідні:

$$v(x_{i+1}) = v(x_i) + \frac{v'(x_i)}{1!}h + \frac{v''(x_i)}{2!}h^2 + \frac{v'''(x_i)}{3!}h^3 + O(h^4); \quad (2.22)$$

$$v(x_{i-1}) = v(x_i) - \frac{v'(x_i)}{1!}h + \frac{v''(x_i)}{2!}h^2 - \frac{v'''(x_i)}{3!}h^3 + O(h^4). \quad (2.23)$$

Тут $O(h^4)$ позначає Ch^4 , де C деяка постійна, $v'(x_i), v''(x_i), v'''(x_i)$ – значення похідних функції $v(x)$ в вузлі i .

Складуючи рівняння (2.22) та (2.23), отримаємо кінцево-різницеву формулу для апроксимації другої похідної

$$v''(x_i) = \frac{v_{i-1} - 2v_i + v_{i+1}}{h^2} + O(h^2), \quad (2.24)$$

Де $O(h^2)$ – точність апроксимації.

З формули (2.24) видно, що друга похідна функції $v(x)$ в вузлі i виражається через лінійну комбінацію значень функції в трьох сусідніх вузлах. Множина цих вузлів утворює так званий трьох точковий шаблон в вузлі i .

Підставивши вираз для другої похідної в функції $v(x)$ в рівнянні (2.3) для вузла i , нехтуючи величиною $O(h^2)$:

$$v_{i-1} - 2v_i + v_{i+1} = -\frac{h^2}{EJ}M(x_i). \quad (2.25)$$

$b = b_1 - \frac{t}{2}$; – відстань від сторони багатокутника, обмеженого замкнутою середньою лінією перерізу (показаною на рис. 2.7 пунктиром) до осі, м;

b_1 – відстань від зовнішньої сторони контура перерізу багатогранного елемента до осі OX(OY), м;

$\alpha = \frac{\pi}{n}$ – кут на рис.2.7, рад.

3. СТВОРЕННЯ СИСТЕМИ АНАЛІЗУ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ МЕТАЛЕВИХ БАГАТОГРАННИХ ОПОР

3.1. Вибір обладнання

Для створення системи дослідження напруженого стану багатогранних механічних опор було обрано датчик тиску PN707 та інклінометр JN2201. Для реєстрації тиску та кута повороту використаємо 2-х канальну систему передачі даних, поєднавши її з програмою LabView.

3.1.1. Двовісні датчики нахилу з IO-Link JN2201

Часто горизонтальне вирівнювання верстатів або деталей машини є важливою вимогою для надійної роботи.

Датчики нахилу призначені для виявлення кутового положення або вирівнювання мобільних машин. Двовісні датчики нахилу зазвичай використовуються для виявлення положення на робочих платформах або вирівнювання мобільних кранів або екскаваторів. Промислове застосування включає системи відстеження сонячних панелей. Деякі типи можна навіть використовувати для тривісного вібраційного контролю споруд або веж.

Датчики нахилу забезпечують високу точність вимірювань у всьому кутовому діапазоні з кутами нахилу вздовж осей X та Y. Вони оснащені двома програмованими комутаційними виходами та двома масштабованими аналоговими виходами. Датчики можна налаштувати за допомогою IO-Link, використовуючи, наприклад, інтерфейс USB. Програмне забезпечення LINERECORDER SENSOR використовується для візуалізації, передачі та архівування наборів параметрів.



Рис.3.1 - Зображення датчика JN2201 [12]

Датчик має 2 роз’єми для зв’язку та зняття інформації.

Таблиця 3.1 - Контакти датчика JN2201[17]

Лівий роз’єм	
	1: L+ 24 V DC (+Ub-D)
	2: OUT2 Комутаційний вихід 2
	3: L- GND
	4: OUT1 Комутаційний вихід 1 для IO-Link
Правий роз’єм	
	1: L+ 24 V DC (+Ub-A)
	2: A2 Аналоговий вихід 2
	3: L- GND
	4: A1 Аналоговий вихід 1

Таблиця 3.2 - Характеристики датчика JN2201[12]

Розміри [мм]	90 x 62 x 33,2
Заміри нахилу	
Кількість осей нахилу	2
Кутовий діапазон [°]	±45
Застосування	Високоточне 2-осьовий вимір кута нахилу для рухомої техніки і промислового застосування
Електричні данні	
Робоча напруга [V]	9,2 ... 30 DC; (Вихід напруги: 12 ... 30 DC; IO-Link: 18 ... 30 DC)
Споживання струму [mA]	100; (24 V DC, 25 ° C)
Макс. споживання струму [mA]	380; (9,2 V DC; -40 ° C)
Макс. час ініціалізації [ms]	1000
Час затримки включення живлення [s]	300; (Час розігріву)
Входи / виходи	
Кількість входів і виходів	Кількість цифрових виходів: 2; Кількість аналогових виходів: 2
Аналоговий вихід по току [mA]	4 ... 20; (В разі несправності: 2 mA)
Аналоговий вихід по напрузі [V]	2 ... 10; (В разі несправності: 1 V)

3.1.2. Датчик тиску з дисплеєм PN2021

Датчик тиску - це пристрій для вимірювання тиску газів або рідин. Тиск - це вираження сили, необхідної для зупинки рідини від розширення, і, як

правило, це виражається як сила на одиницю площі. Датчик тиску зазвичай діє як перетворювач; він генерує сигнал як функцію тиску, що чиниться.

Цей датчик тиску забезпечує високу точність вимірювань у великому діапазоні тиску. Вони оснащені двома програмованими комутаційними виходами та двома масштабованими аналоговими виходами. Датчики можна також налаштувати за допомогою IO-Link, інтерфейс USB. Програмне забезпечення LINERECORDER SENSOR використовується для візуалізації, передачі та архівування наборів параметрів.



Рис. 3.2 - Зображення датчика тиску pn2021[13]

Датчик тиску призначений для вимірювання тиску в системах контролю і управління технологічними процесами і устаткуванням. Він має 4 схеми підключення для різних режимів роботи (рис 3.3).

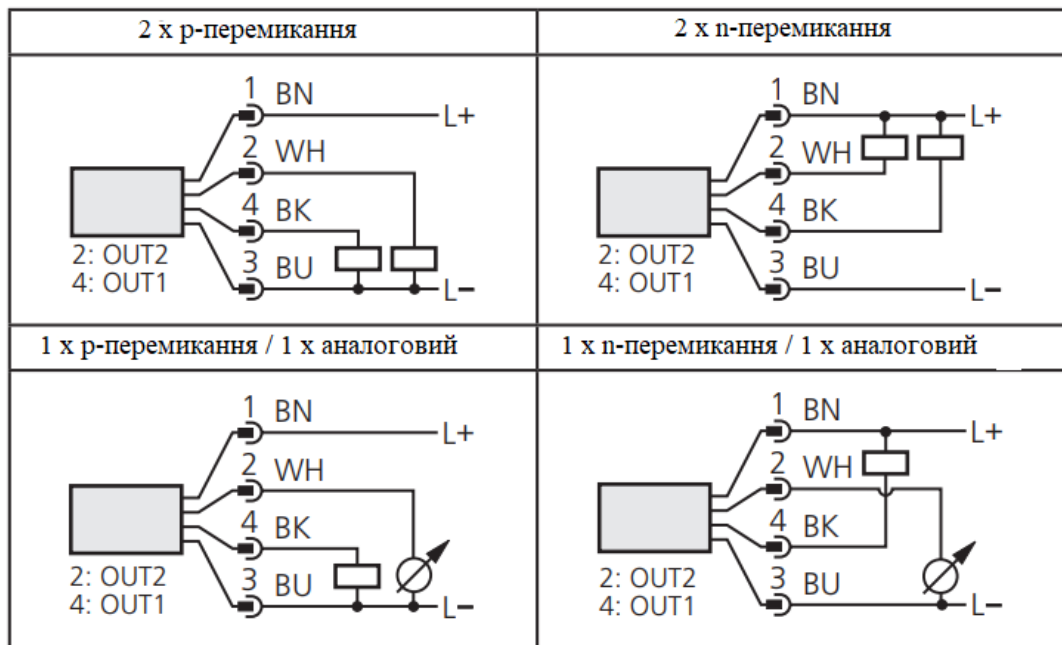


Рис 3.3 - Схеми підключення датчика pn2021[18]

Контакт 4 (OUT1) = Канал для обміну даними. Не використовується, коли OUT1 = п-перемикання.

Кольори жив роз'єму ifm:

1 = BN (коричневий), 2 = WH (білий), 3 = BU (синій), 4 = BK (чорний).

Так як для нашої системи потрібно знімати дані лише аналогового виходу (Контакт 2 (OUT2)), то підійде схема підключення «1 x п-перемикання / 1 x аналоговий».

Таблиця 3.3 - Характеристики датчика pn2071[13]

Вихідний сигнал	комутаційний сигнал; аналоговий сигнал; IO Link; (Конфігурується)		
діапазон вимірів	0 ... 250 bar	0 ... 3620 psi	0 ... 25 MPa
Температура вимірюваного середовища [° C]	-25 ... 80		
Середовище застосування	Рідкі або газоподібні середовища		
Мін. розривний тиск	850 bar	12300 psi	85 MPa
Межа міцності по тиску	400 bar	5800 psi	40 MPa
Електричі данні			
Робоча напруга [V]	18 ... 32 DC; (Відповідно до EN 50178 SELV / PELV)		
Споживання струму [mA]	<35		
Мін. опір ізоляції [MΩ]	100; (500 V DC)		
Час затримки включення живлення [s]	0,3		
Входи / виходи			
Кількість входів і виходів	Кількість цифрових виходів: 2; Кількість аналогових виходів: 1		
Аналоговий вихід по струму [mA]	4 ... 20; (Масштабований 1: 4)		
Аналоговий вихід по напрузі [V]	0 ... 10; (Масштабований 1: 4)		
Мін. опір навантаження [Ω]	2000		

3.2. Мікроконтролер Arduino

Область застосування мікроконтролерів безмежна. Їх використовують в будь-яких електронних пристроях для здійснення контролю. Крім того, вони знаходяться у всіх побутових приладах - мікрохвильовки, електрочайника, праски, пральних машинах - мікроконтролер можна запрограмувати під будь-яку функцію.

Мікроконтролер по суті є мікросхемою, який складається з:

- Центрального процесора. У нього входять блок управління, регістри, ПЗУ (постійний запам'ятовуючий пристрій).
- Периферії, яка включає порти введення-виведення, контролери переривань, таймери, генератори різних імпульсів, аналогові перетворювачі і подібні елементи.

Arduino - це інструмент для проектування електронних пристроїв (електронний конструктор) більш щільно взаємодіють з навколишнім фізичним середовищем, ніж стандартні персональні комп'ютери, які фактично не виходять за рамки віртуальності. Це платформа, призначена для «physical computing» з відкритим програмним кодом, побудована на простій друкованої плати з сучасним середовищем для написання програмного забезпечення.

Arduino застосовується для створення електронних пристроїв з можливістю прийому сигналів від різних цифрових і аналогових датчиків, які можуть бути підключені до нього, і управління різними виконавчими пристроями. Проекти пристроїв, засновані на Arduino, можуть працювати самостійно або взаємодіяти з програмним забезпеченням на комп'ютері). Плати можуть бути зібрані користувачем самостійно або куплені в зборі. Середовище розробки програм з відкритим вихідним текстом доступна для безкоштовного скачування.

Сімейство плат Arduino налічує більше десятка реалізацій, які відрізняються технічними характеристиками і для кожного проекту можна

вибрати максимально підходящий варіант, можливості якого будуть відповідати поставленій задачі і будуть використані максимально.

Нижче представлені основні версії плат Arduino[15]:

- Due - нова плата на базі ARM процесора 32bit Cortex-M3 ARM SAM3U4E.
- Leonardo - остання версія платформи Arduino на ATmega32u4 мікроконтролері. Відрізняється роз'ємом microUSB, за розмірами збігається з UNO.
- Yun - нова плата, з вбудованою підтримкою WiFi на базі ATmega32u4 and the Atheros AR9331
- Micro - нове компактне рішення на базі ATmega32u4.
- Uno - найпопулярніша версія базової платформи Arduino USB. Uno має стандартний порт USB. Arduino Uno але має чіп ATmega8U2 для послідовного підключення по USB і нове, більш зручне маркування входів та виходів. Платформа може бути доповнена платами розширення.
- Arduino Ethernet - контролер з вбудованою підтримкою роботи по мережі і з опціональною можливістю живлення по мережі за допомогою модуля POE (Power over Ethernet).
- Duemilanove - є передостанньою версією базової платформи Arduino USB. Підключення Duemilanove здійснюється стандартним кабелем USB. Після підключення вона готова до використання. Платформа може бути доповнена платами розширення.
- Diecimila - попередня версія базової платформи Arduino USB.
- Nano - це компактна платформа, яка використовується як макет. Nano підключається до комп'ютера за допомогою кабелю USB Mini-B.
- Mega2560 - нова версія плати серії Mega. Побудована на базі Atmega2560 і з використанням чіпа ATmega8U2 для послідовного з'єднання по USB порту.
- Mega - попередня версія серії Mega на базі Atmega1280.

- Arduino BT платформа з модулем Bluetooth для бездротового зв'язку і програмування. Сумісна з платами розширення Arduino.
- Mini - найменша платформа Arduino. Прекрасно працює як макетна модель, або, в проектах, де простір є критичним параметром. Платформа підключається до комп'ютера за допомогою адаптера Mini USB.
- Pro - платформа, розроблена для досвідчених користувачів, може бути частиною більшого проекту. Вона дешевше, ніж Diecimila і може харчуватися від акумуляторної батареї, але в той же час вимагає додаткової збірки і компонентів.
- Pro Mini - як і платформа Pro розроблена для досвідчених користувачів, яким потрібна низька ціна, менші розміри і додаткова функціональність.

Так як для системи аналізу напруженого стану багатогранних металевих опор не будуть потрібними доступ до інтернету, передача даних по Bluetooth чи WiFi, то чудовим варіантом будуть такі плати як Nano, UNO, Mini.

3.2.1. Arduino Nano

Arduino Nano(- невелика самодостатня плата, сумісна з макетними платами, яка побудована на мікроконтролері ATmega328. Вона в основному збігається за функціональністю з Arduino Duemilanove/Uno, але має інший форм-фактор. Arduino Nano не вистачає тільки роз'єму живлення і замість стандартного, використовує Mini-B USB кабель. Arduino Nano може бути запитана від Mini-B USB роз'єму або зовнішнього джерела живлення 6-12В (пін "Vin") або 5В стабільного зовнішнього живлення (пін "5V"). Живлення автоматично перемикається на джерело з більш високою напругою.

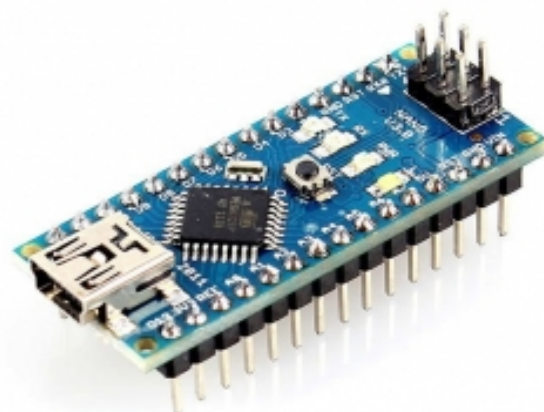


Рис3.4 - Arduino Nano[15]

Таблиця 3.4 - Характеристики Arduino Nano [15]

Мікроконтролер	Atmel ATmega168 або ATmega328
Робоча напруга (логічний рівень)	5В
Напруга живлення (рекомендована)	7-12В
Напруга живлення (гранична)	6-20В
Цифрові входи / виходи	14 (з яких 6 можуть використовувати ШІМ-виходи)
Аналогові входи	8
Flash-пам'ять	16 КБ (ATmega168) або 32 КБ (ATmega328) з яких 2 КБ використовуються завантажувачем
SRAM	1 КБ (ATmega168) або 2 КБ (ATmega328)
EEPROM	512 байт (ATmega168) або 1 КБ (ATmega328)
Тактова частота	16 МГц
Розміри плати	1.85 см x 4.3 см

3.3. Програмне забезпечення

3.3.1. Ni LabView для візуалізації вимірювань та розрахунків

Для програмування таких пристроїв можна використовувати універсальні мови програмування: С, Паскаль та інші, але це досить трудомістка задача і вимагає високої кваліфікації користувача. Щоб полегшити програмування вимірних пристроїв, були створені спеціалізовані системи, засновані на принципах візуального графічного програмування, що містять великий набір готових програмних модулів, для узагальненого програмування багатьох операцій та виконання конкретних задач автоматизації наукових змін та експериментів. Одною з розповсюджених систем такої ролі є LabVIEW (Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench), розроблена фірмою National Instruments. Ця система широко використовується в навчальному процесі багатьох провідних університетів світу.

LabVIEW пропонує графічний підхід до програмування, який допомагає вам візуалізувати всі аспекти програми, включаючи конфігурацію обладнання, дані вимірювань та налагодження. Ця візуалізація спрощує інтеграцію вимірювального обладнання від будь-якого постачальника, представляє складну логіку на діаграмі, розробляє алгоритми аналізу даних та розробляє власні користувацькі інтерфейси.

LabVIEW дозволяє здійснювати доступ до великої кількості приладів через вбудовані драйвери. Спрощує програмування для непрофесійних програмістів. До ряду приладів, зокрема, розроблених National Instruments уже надаються готові віртуальні інструменти. Програми є незалежними від платформи оскільки виконуються в спеціальному виконавчому середовищі (run-time). Наявна велика кількість функцій для збору даних, обчислень, генерації сигналів, аналізу тощо. Також, наявна велика кількість графічних елементів для реалізації зручного інтерфейсу користувача. В LabView наявний додатковий

програмно-текстовий компонент для проведення обчислень - MathScript. Різні частини блок-діаграми можуть виконуватися паралельно. Наявні значна кількість документації та інтернет групи.

3.3.2. Arduino IDE для програмування мікроконтролера

Програмне забезпечення Arduino (IDE) з відкритим кодом полегшує написання коду та завантаження його на плату. Це програмне забезпечення можна використовувати з будь-якою платою Arduino.

Ця платформа в першу чергу орієнтується на конструкторів-аматорів, які застосовують Arduino для побудови простих систем автоматики і робототехніки. Проте інколи, на базі Ардуіно створювалися і більш-менш серйозні проекти.

Arduino IDE складається з досить простого текстового редактору коду, менеджера проектів, компілятора та модуля для завантаження прошивки в мікроконтролер. Це інтегроване середовище написане на Java і базується на Processing та іншому програмному забезпеченні з відкритим кодом. На відміну від онлайн-версії редактора коду (Arduino Web Editor), настільною версією можна користуватися за відсутності інтернету.

Мова програмування Arduino є стандартним C++ (використовується компілятор AVR-GCC) з деякими особливостями, що полегшують написання програм новачкам у цій справі.

3.4. Підключення датчиків

Промислові датчики, повідомляють про зміну вимірюваного параметра зміною струму в діапазоні 4 .. 20 мА, широко поширені. Вони мають високу

завадостійкістю, тому до такого датчику можна підвести кабель довжиною в кілька сотень метрів. Також такий вид сигналу дозволяє жити малопотужні датчики прямо по сигнальному проводу. При цьому між контролером і датчиком слід прокласти лише 2-х канальний кабель[14].

Ми можемо міряти струм 4-20 мА аналоговим входом контролера Arduino або інших, зібравши попередньо таку простеньку схемку (рис.3.5) . Напруга на аналоговому вході тут буде пропорційно струму через контрольний резистор.

Далі можна збирати схему і міряти напругу на резисторі через аналоговий вхід контролера. Для досвіду я візьму Arduino Nano і промислові датчики тиску та кута нахилу з струмовим сигналом 4-20 мА.

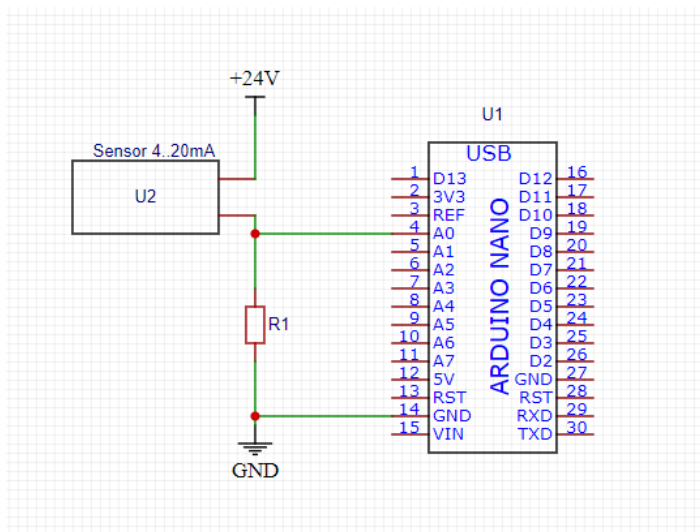


Рис.3.5 - Схема підключення датчика до Arduino nano

Номінал резистора R1 можна порахувати за формулою:

$$R1 = \frac{u_{plc}}{0,02 \text{ A}}, \quad (3.1)$$

Де:

u_{plc} - максимальний рівень аналогового входу контролера в вольтах;

0,02A – максимальний сигнал датчика;

В нашому випадку u_{plc} для Arduino nano дорівнює 5 вольт.

$$R1 = \frac{5 \text{ В}}{0,02 \text{ А}} = 250 \text{ Ом.} \quad (3.2)$$

Сам резистор потрібно вибрати максимально точний, щоб показники якого менше залежали від температури.

Для більшої стабільності показників можна удосконалити цю схему додовши RC-коло (рис 3.6)

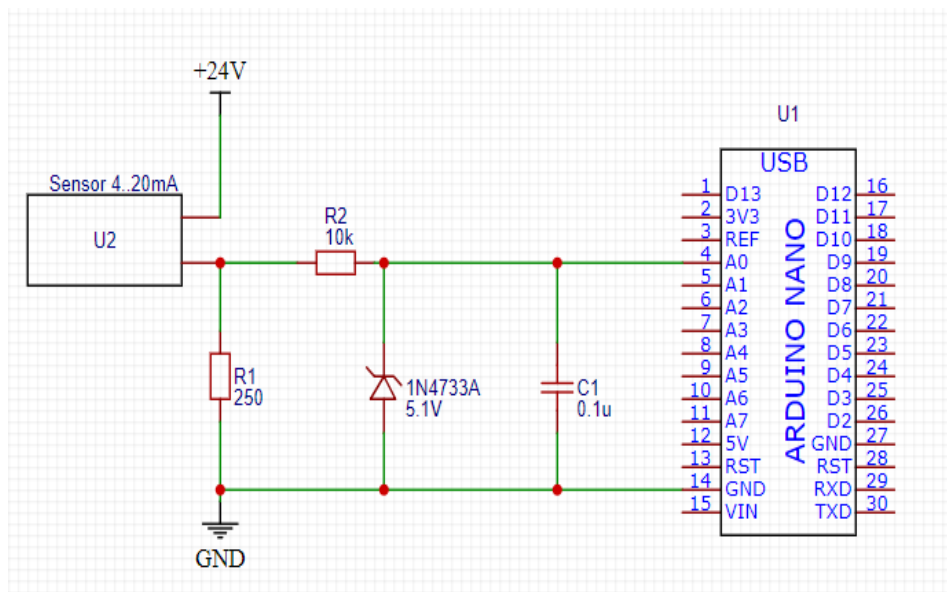


Рис.3.6 - Удосконалена схема підключення датчика до Arduino nano[14]

У ній немає гальванічної розв'язки. Стабілітрон захищає входи мікроконтролера від напруги перевищує 5,1 V і переплюсовки.

На основі попереднього створюємо схему зв'язку наших сенсорів з контролером. Ця схема показана на (рис.3.7).

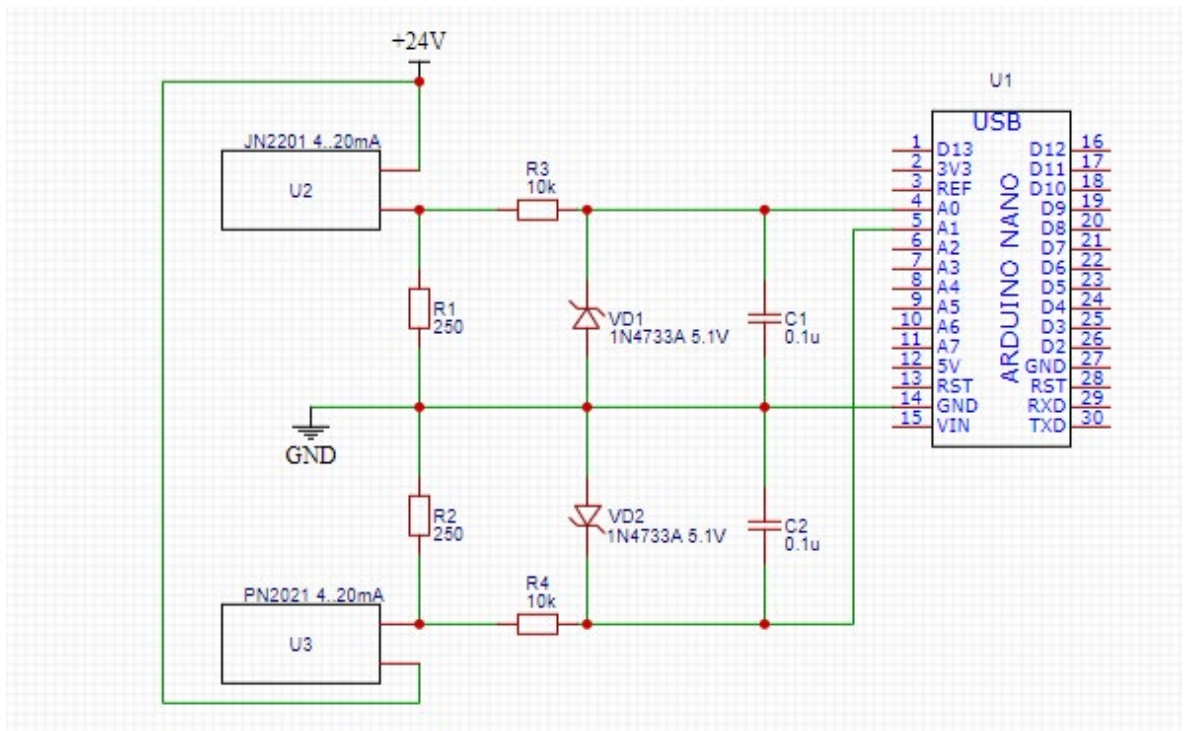


Рис.3.7 - Принципова схема підключення сенсорів

3.5. Розробка системи в LabVIEW

Для зв'язку середовища LabVIEW із зовнішніми пристроями використовуються системи збору даних National Instruments, наприклад, USB-600X. В моїй роботі виконаний підхід з використанням у якості системи збору даних апаратної платформи Arduino, яка обмінюється з LabVIEW через драйвер послідовного порта NI-VISA. У такому випадку використовується бібліотека комунікаційного інтерфейсу з Arduino LIFA (інтерфейс LabVIEW для Arduino), яка надає широке застосування для розробки візуальних приборів.

Мікроконтролер arduino nano виступає в ролі АЦП. На ньому аналоговий сигнал з датчиків конвертується в цифровий і через Serial(COM) порт, через usb кабель предає данні на ПК.

Щоб почати працювати з Arduino в LV, потрібно прошити контролер файлом LIFA_Base.ino, взявши його з папки з бібліотекою Arduino LIFA.

3.5.1. Реалізація збору даних з датчиків

Тепер перейдемо до складання блок-діаграми системи. Спочатку потрібно ініціалізувати сам контролер в LV. Це можна зробити за допомогою блоку «Init.vi» для ініціалізації COM-порту через підключений Arduino Uno, також через цей блок задається швидкість передачі даних «Baud Rate» та вказується тип плати Arduino «Board Type».

Датчики підключені до аналогових портів Arduino Nano, інформацію з яких можна отримати використавши блок «Analog read pin.vi», який зчитує аналогову напругу на обраному аналоговому вході Arduino (A0-A7) (рис.3.8).

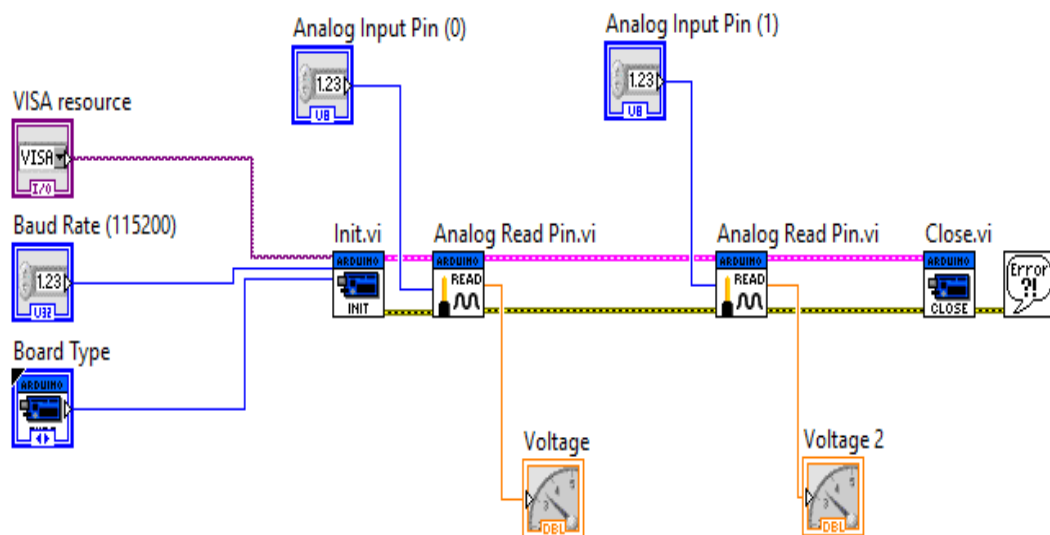


Рис.3.8 - Схема зчитування аналогового сигналу з обраних пінів мікроконтролера Arduino Nano

На виході блоку «Analog read pin.vi» буде числове значення напруги на обраному піні. Проаналізувавши діапазон аналогових виходів датчиків по струму складено рівняння для визначення тиску та кута нахилу по сигналу та перенесено їх в вигляді блок-схеми в LV (рис.3.9).

Для датчика кута нахилу JN2201 рівняння матиме вигляд:

$$\alpha = V * 22.5 - 67.5, \quad (3.3)$$

де:

α – кут нахилу (в градусах), V – напруга на аналоговому вході мікроконтролера.

Для датчика тиску PN2021 рівняння матиме вигляд:

$$P = V * 6.25 - 6.25, \quad (3.4)$$

де:

P – тиск в МПа.

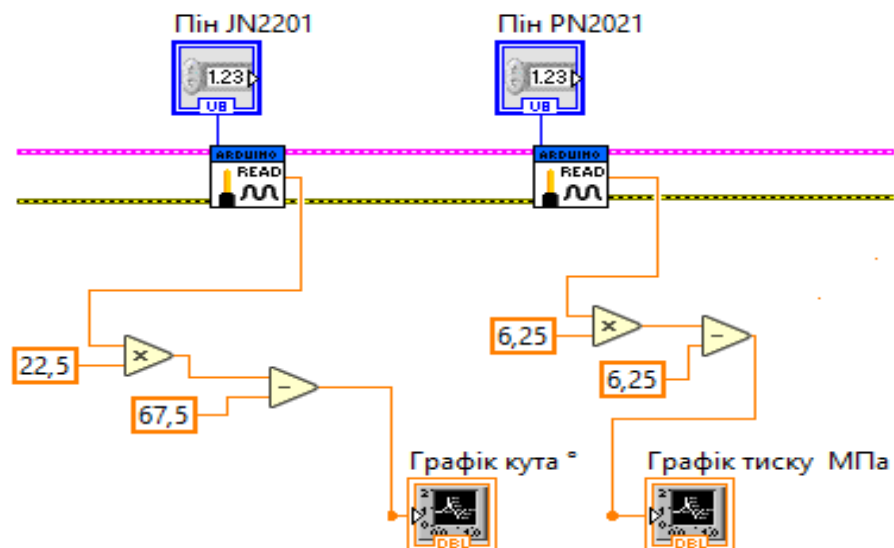


Рис.3.9 - Схема отримання показників кута нахилу та тиску і виведення їх на графіки

3.5.2. Розрахунок параметрів

Далі програма розраховує значення моменту інерції перерузу J в кожному вузлі за формулою (2.27). Для цього в програму потрібно ввести такі

параметри як кількість граней опори, товщина стінок опори, ширина опори на початку, ширина опори на кінці. Також в програмі враховано що опора має не постійну ширину то і момент інерції буде змінюватися вздовж опори. Для виконання цього використано структуру «Formula Node» що називається «Блок розрахунку моменту інерції», яка виконує команди написані мовою програмування C++. Сам лістинг коду знаходиться в додатку А.

Після цього всі вхідні (довжина балки , номер вузла прикладання тиску, інформація про те як закріплена опора, модуль пружності матеріалу опори E) та визначені (тиск, кут нахилу, моменти інерції опори в всіх вузлах) данні подаються на центральну структуру «Formula Node» під назвою «Основний код програми» де проводиться розрахунок згинаючого моменту (3.10) та значення f_i з системи (2.26), відповідно до підрозділу 2.3.. Лістинг коду цього блоку знаходиться в додатку Б.

Для розв'язання СЛАР використовується блок «Solve Linear Equations.vi», на входи якого подається матриця коефіцієнтів системи (2.26) зображена на рис.3.10. і матриця значень f_i відповідно до вузлів.

Масив на виході блок «Solve Linear Equations.vi» буде розв'язками цієї системи рівнянь, а саме прогинами балки в відповідних вузлах.

Вся блок-схема також зациклена структурою «While Loop» щоб оновлювати дані в реальному часі. Для стабільності роботи і зменшенню кількості помилок в тілі циклу встановлено затримку в 300 мс.

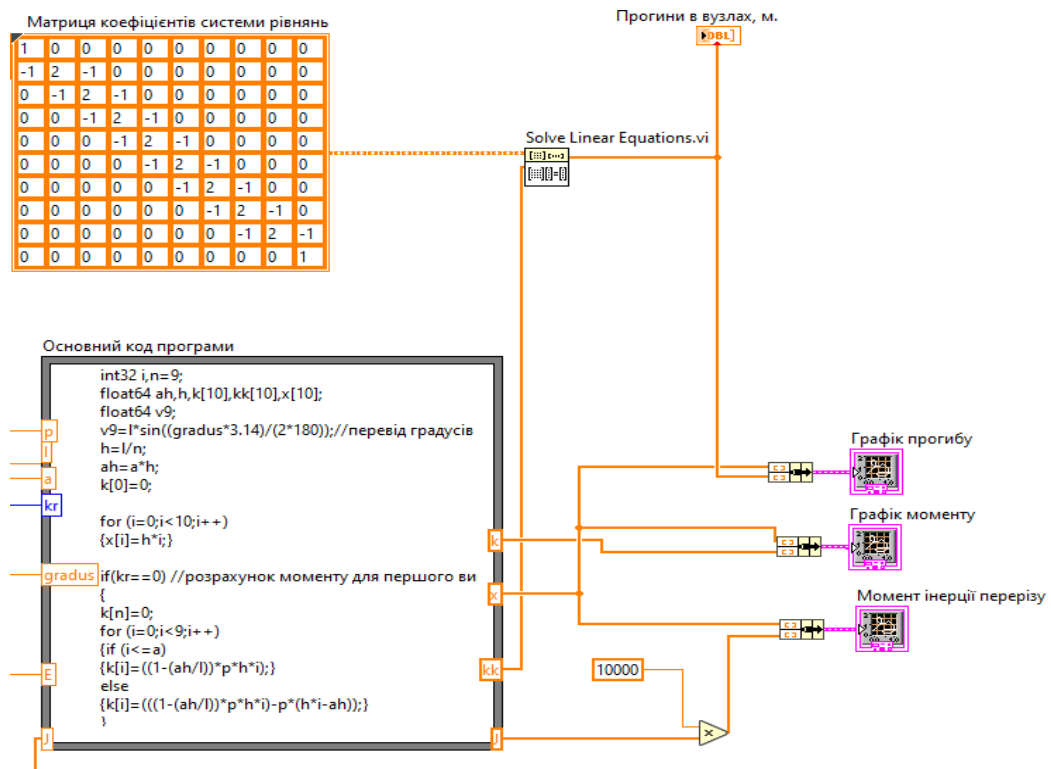


Рис.3.10 - Блок схема розв'язку СЛАР (3.16) та виводу результатів

При складанні блок-схеми паралельно до неї підтягується Front Panel для візуалізації отриманих результатів вимірювань. На ній розміщено поля для вводу вхідних даних, п'ять графіків (кута нахилу, тиску, графіку прогину балки по вузлам, графіку згинального моменту по вузлам, та графіку моменту інерції перерізу) (рис 3.11).

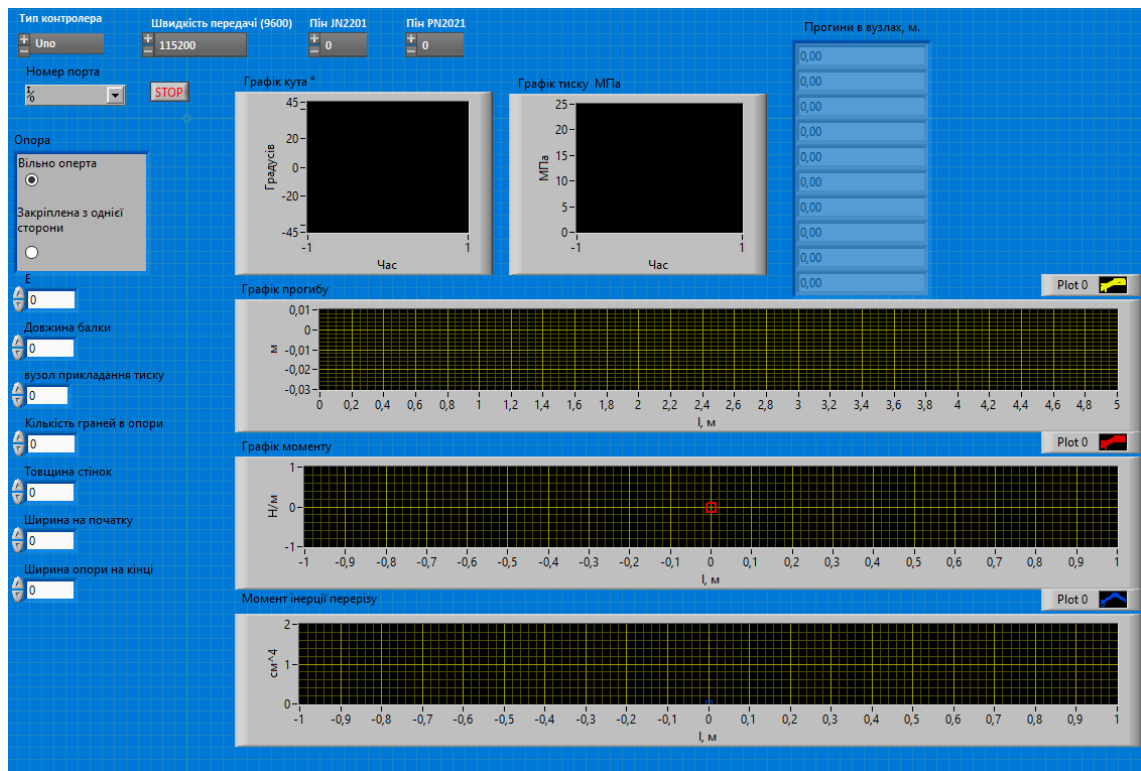


Рис.3.11 - Front Panel програми

3.6. Розробка друкованої плати

Топологія друкованої плати створювалась в програмі EasyEDA, це крос-платформне веб-орієнтоване середовище автоматизації проектування електроніки включає в себе редактор принципів схем, редактор топології друкованих плат, SPICE-симулятор, хмарне сховище даних, систему управління проектами, а також замовлення та виготовлення друкованих плат.

Програма сама конвертує створену в ній же принципову схему (рис.3.7) в топологію друкованої плати (рис.3.12).

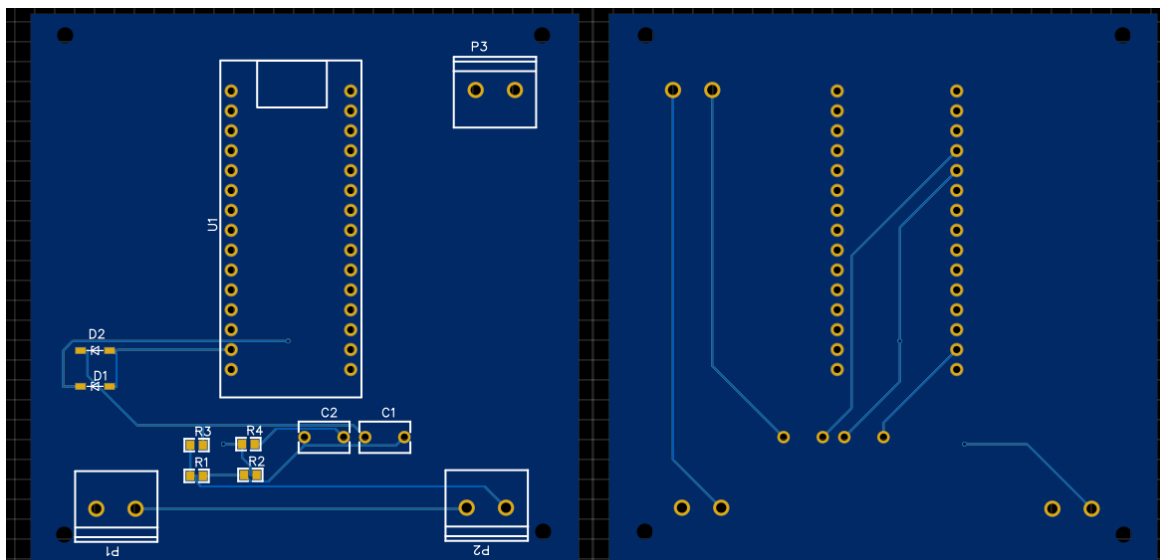


Рис.3.12 - Топологія друкованих плат

4. ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ

Після закінчення роботи над системою, було проведено пробне її випробування. Сигнали з датчиків були проемульовані потенціометром. Як вхідні параметри було взято:

Таблиця 4.1 - Вхідні параметри опори

Матеріал	Сталь ($E=210\text{ГПа}$)
Довжина балки	10 м
Кут прикладання сили	7
Кількість граней опори	8
Товщина стінок опори	1 см
Ширина опори на початку	40 см
Ширина опори на кінці	30 см
Тиск	1,3 МПа

Ввівши ці дані в програму було отримано графіки результату розрахунків (рис. 4.1)

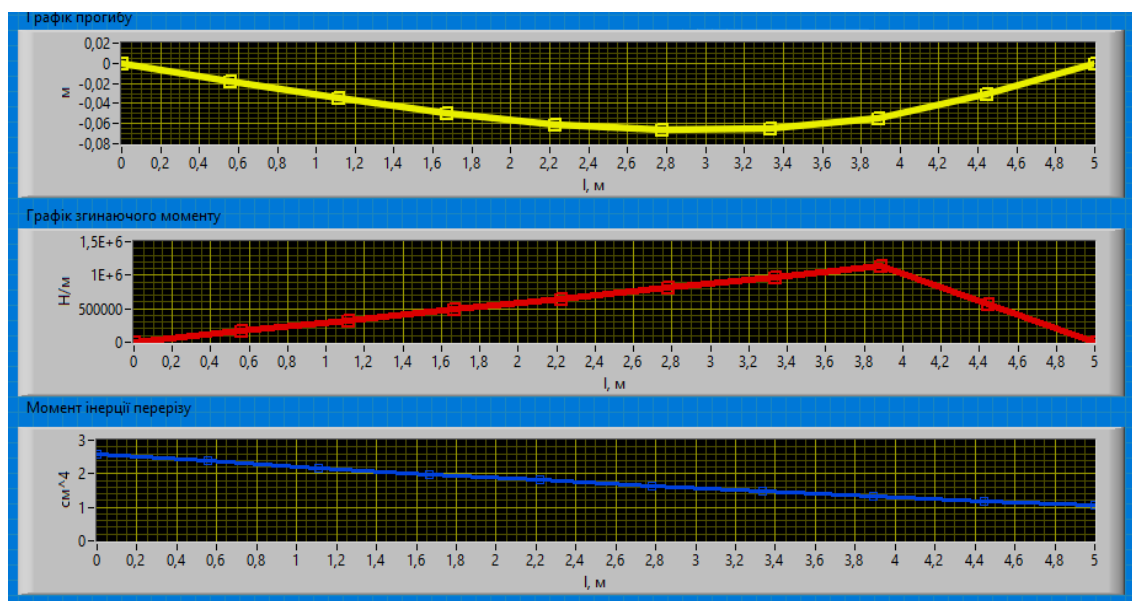


Рис.4.1 - Графіки прогинів опор, згинаючих моментів та моменту інерції перерізу при виконанні програмою розрахунків по таблиці 4.1

Ця програма має і інший режим вимірювання, коли балка міцно закріплена з однієї сторони, а з іншої не закріплена. В цьому випадку буде використовуватись і датчик нахилу JN2201, який встанове граничну умову, а саме прогин незакріпленого кінця балки.

Для перевірки цього режиму в програму було вписано данні з таблиці 4.1. з додаванням кута нахилу незакріпленого кінця балки. Заданий кут був 28 градусів, а заданий тиск 4 МПа.

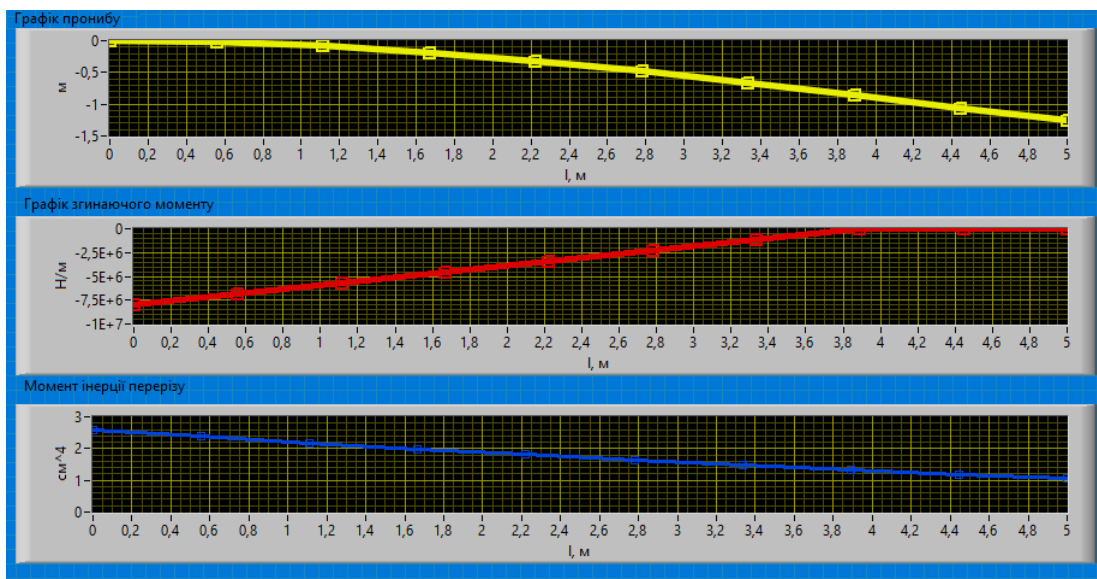


Рис.4.2 - Графіки прогинів опор, згинаючих моментів та моменту інерції перерізу опори жорстко закріпленої з однієї сторони при виконанні програмою рорахунків по таблиці 4.1

ВИСНОВОК

В даній роботі була представлена система для аналізу напруженого стану багатогранних опор. Алгоритми даної системи дозволяють спостерігати результат розрахунків в реальному часі, що може дозволити краще проводити динамічні випробування опор.

Особливістю такої системи є можливість повного її налаштування користувачем виходячи з потреб.

Схема самого пристрою може змінюватись: можливе підключення інших датчиків чи встановлення інших мікроконтролерів. Можна також вдосконалювати цю схему далі додавши модуль безпроводного зв'язку. Її простота та гнучкість робить її перспективною в подальшому використанні.

Дана система може бути впроваджена на підприємствах і організаціях, зацікавлених у підвищенні безпеки та довговічності створених чи встановлених ними опор, більш ефективному використанні корисного навантаження на самі опори.

СПИСЛК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гаранжа І. М. Напружено-деформований стан металевих багатограних стояків з урахуванням особливостей вітрового впливу / І. М. Гаранжа. Донбас. нац. акад. буд-ва і архіт. - Макіївка, 2012. - 20 с. - укр.
2. Многогранные гнутые стойки: материалы VI международной конференции, (Николаевка Кременец, 2011 г.) / Открытое акционерное общество «ПРОМиК». – Днепропетровск : [б. и.], 2011. – 154 с.
3. Pagnini L. C. Damping measurements of steel poles and tubular towers/ L. C Pagnini., G. Solari // Engineering Structures. 2001. Vol. 23. Issue 9. Pp. 1085-1095
4. Бабушкин, В. М. Электрические сети: развитие новые решения / В. М. Бабушкин, В. А. Ней ман, В. А. Чевычелов. – К. : Энергетика и электрификация, 2001. – 117 с.
5. І. М. Гаранжа. Металеві багатограничі стояки як основа для споруд міської інфраструктури. / І. М. Гаранжа , А. В. Танасогло , Е. О. Лозинський, С. В. Гаранжа. //Металеві конструкції. – 2016 - ТОМ 22, НОМЕР 2, с. 59–78
6. Многогранные опоры: сферы применения, особенности и преимущества – Режим доступа: <https://ksosvet.ru/blog/mnogogrannnye-opory-sfery-primeneniya-osobennosti-i-preimushchestva>
7. М. Г. Каплянок. Постановка задачи геометрического моделирования факторов влияния на напряженно-деформированное состояние металлических конструкций. / М. Г. Каплянок. //Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2017. №4(126). с. 24-26.
8. ГОСТ 27751-88. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения по расчету. – Введ. 01.07.88 –М.: Стандартиформ, 2007. - 6 с.
9. Гатиятов И. З. Способы и установки контроля опор из трубчатых

- стержней, применяемых в энергетическом строительстве при воздействии на них статических и динамических нагрузок/И. З. Гатиятов, Л. С. Сабитов // Известия вузов. Проблемы энергетики, 2018. т.Т. 20,N № 5/6.-С.93-101
10. Г.С.Варданян. Сопротивление материалов с основами теории упругости и пластичности. / Г.С.Варданян. М.: АСВ, 1995.-568 стр. ISBN 5-87829-014-6
 11. Синенко Е.Г. Механика. – Режим доступа: <https://studref.com/529832/tehnika/mehanika>
 12. Датчик кута нахилу JN2201 – Режим доступа: <https://www.ifm.com/il/ru/product/JN2201?tab=details>
 13. Датчик тиску з дисплеєм JN2201. – Режим доступа: <https://www.ifm.com/ua/ru/product/PN2021?tab=details>
 - 14 Andrey Fedorov. Конвертер тока 4..20 mA в напряжение XY-ITOV.
– Режим доступа: <https://www.bizkit.ru/2019/03/04/12742/>
 - 15 Официальный сайт компании Arduino. – Режим доступа: <https://www.arduino.cc/>
 - 16 National Instruments. «What Is LabVIEW?». – Режим доступ: <https://www.ni.com/ru-ru/shop/labview.html>
 - 17 Ifm electronic. Installation instructions Inclination sensor JN. JN2200 JN2201
– Режим доступа: <https://www.ifm.com/mounting/704828RU.pdf>
 - 18 Ifm electronic. Инструкция по эксплуатации Комбинированный датчик давления PN20xx – Режим доступа: <https://www.ifm.com/mounting/80237500UK.pdf>
 - 19 СТО 56947007-29.240.55.054 Руководство по проектированию многогранных опор и фундаментов к ним для ВЛ напряжением 110-500 кВ. -2010.- М.: ОАО ФСК ЕЭС , 2010.

ДОДАТОК А

Лістинг блоку «Блок розрахунку моменту інерції»:

```

int32 i;
float64 J[10],h[10],b[10],dh,n1=9;

dh=(h2-h1)/n1; //крок зміни ширини
h[0]=h1; // задаємо початкову ширину
b[0]=((h[0]/2)-(t/2)); // задаємо початкову ширину від осі до середини
стілки
J[0]=(n/3)*t*b[0]*b[0]*b[0]*tan(3.14/n)*(tan(3.14/n)*tan(3.14/n)+3);
// задаємо початковий момент інерції перерізу

for(i=1;i<10;i++){
//пошук значень параметрів на інших вузлах
h[i]=h[0]+dh*i;
b[i]=((h[i]/2)-(t/2));
J[i]=(n/3)*t*b[i]*b[i]*b[i]*tan(3.14/n)*(tan(3.14/n)*tan(3.14/n)+3);
}

```

ДОДАТОК Б

Лістинг блоку «Основний код програми»:

```

int32 i,n=9;
float64 ah,h,k[10],kk[10],x[10];
float64 v9;
v9=l*sin((gradus*3.14)/(2*180));//перевід градусів в прогин
h=l/n; //відстань між вузлами
ah=a*h; //відстань до вузла прикладання тиску
k[0]=0;

for (i=0;i<10;i++)
{x[i]=h*i;}

if(kr==0) //розрахунок моменту для першого випадку
{
k[n]=0;
for (i=0;i<9;i++)
{if (i<=a)
{k[i]=((1-(ah/l))*p*h*i);}
else
{k[i]=(((1-(ah/l))*p*h*i)-p*(h*i-ah));}
}
kk[0]=0;
kk[10]=0;
}
else //розрахунок моменту для першого випадку
{
for (i=0;i<10;i++)
{

```

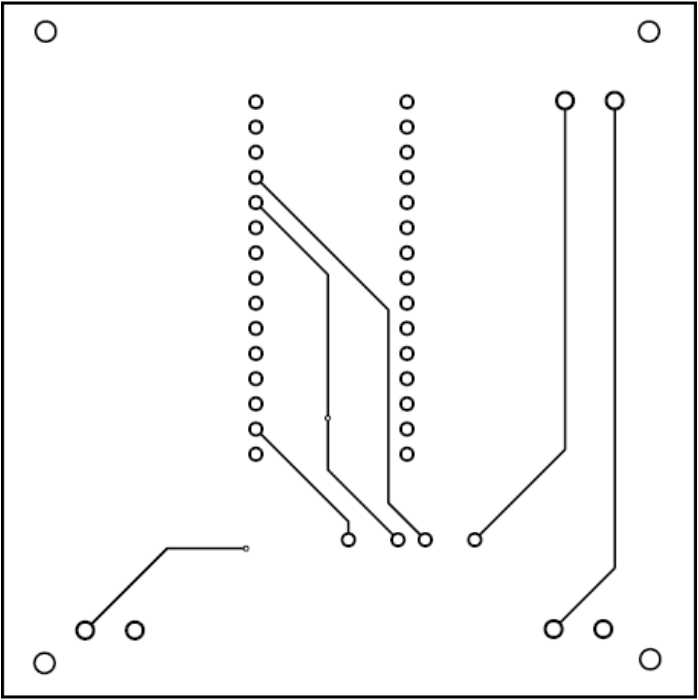
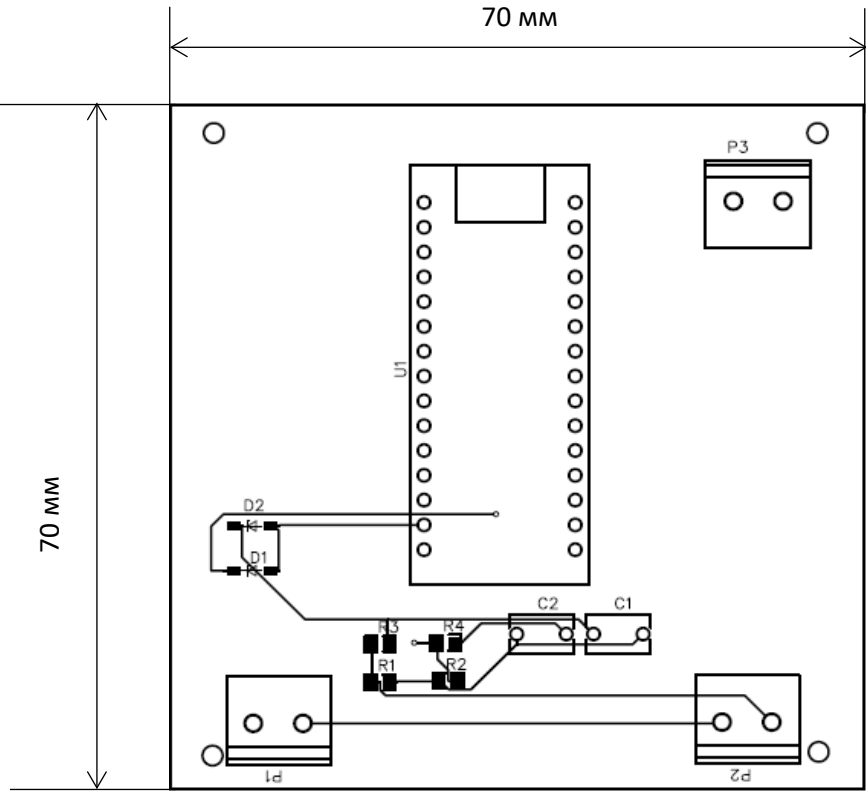
```
if ((i)<=a)
{k[i]=-p*(1-(i/a));}
else
{
k[i]=0;
}

}

kk[0]=0;
kk[9]=-v9;

}

for (i=1;i<9;i++)
{kk[i]=-k[i]*h*h/(E*J[i]);}
```



Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Разраб.		Ярмоленко О.А.			Додаток В. Топологія верхнього та нижнього шару друкованої плати		Лит.	Лист
Провер.								60
Реценз.							НТУУ «КПІ»	
Н. Контр.								
Утверд.								

[illegible]

The screenshot displays a LabVIEW front panel and block diagram for calculating the moment of inertia of a stepped cylinder. The front panel includes input controls for the number of steps (1 to 10), radius (0 to 100 mm), height (0 to 100 mm), and a display for the moment of inertia (0 to 10000 kg·m²). The block diagram shows a for-loop calculating the moment of inertia for each step, with a matrix of coefficients (A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K, L, M, N, O, P, Q, R, S, T, U, V, W, X, Y, Z) used in the calculations. The final result is displayed as the moment of inertia and its error.