МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙІНСТИТУТКОМП'ЮТЕРНОЇФІЗИКИТА ЕНЕРГЕТИКИ
Фізики нетрадиційних енерготехнологій та екології

Пояснювальна записка
до дипломної роботи
за освітньо-кваліфікаційним рівнем «бакалавр»

«Проведення моніторингу електромагнітного фонового поля території Новобаварського району м. Харкова»

Виконав студент 4 курсу,

групи НФ-41 Бражник О.Р.

_____

Спеціальність 105 Прикладна фізика та наноматеріали

Освітня програма: Прикладна фізика енергетичних систем

Керівник: д-р фіз.-мат. наук, професор Пеліхатий М. М.

_____

Харків - 2022 року

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В.Н.Каразіна

Інститут Навчально-науковий інститут комп'ютерної фізики та енергетики
Кафедра фізики нетрадиційних енерготехнологій та екології
Рівень вищої освіти (освітньо-кваліфікаційний рівень) бакалавр
Спеціальність 105. «Прикладна фізика та наноматеріали»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ **О.П. Кулик**
підпис ініціали, прізвище

"____" _____20__року

З А В Д А Н Н Я

НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ (ПРОЄКТ)

_____Бражник Олександр Русланович_____
(прізвище, ім'я, по батькові студента)

1. Тема роботи «Проведення моніторингу електромагнітного фонового поля території Новобаварського району м. Харкова»

Керівник роботи Пеліхатий М.М., професор, доктор ф.-м. наук_____
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від "___"_____20__ року №___

2. Строк подання студентом роботи_____

3. Перелік питань, які потрібно розробити:
Аналіз літератури щодо основних джерел фонових електричних полів промислового діапазону частот. Аналіз нормативних документів відносно гранично допустимих рівнів фонових електричних полів від різних джерел, що розроблені на Україні та в інших державах. Вивчення принципу дії та роботи сучасних вимірювачів напруженості фонового електричного поля промислової

частоти. Безпосереднє проведення вимірювань напруженості фонового електричного поля промислової частоти. Аналіз результатів вимірювань за допомогою сучасних методів математичної статистики з застосуванням відповідних комп'ютерних програм. Моделювання процесів формування фонового електричного поля від різних джерел.

4. План роботи

№ з/п	Назви етапів роботи
1.	Аналіз літератури щодо основних джерел фонових електричних полів промислового діапазону частот та відповідних нормативних документів
2.	Вивчення принципу дії та роботи сучасних вимірювачів напруженості фонового електричного поля промислової частоти
3.	Підготовка плану проведення вимірювань
4.	Первинна статистична обробка результатів вимірювань
5.	Розрахунково-теоретичне дослідження основних джерел фонового електричного поля промислової частоти
6.	Формулювання висновків за результатами власних досліджень

5. Дата видачі завдання_____

Студент _____ _____ **О.Р. Бражник**
підпис ініціали,прізвище

Керівник роботи _____ _____ **М.М. ПЕЛІХАТИЙ**
підпис ініціали,прізвище

Зміст

Вступ…….3

Ціль роботи……12

Матеріали і методи досліджень……..13

Результати та їх обговорення……14

Висновки…….29

Список використаної літератури……...30

Вступ

Завдяки широкому застосуванню хвильових електромагнітних процесів в нашому повсякденному житті виникло нове поняття «електромагнітне забруднення навколишнього середовища», яке вперше було застосовано у 1995 році Всесвітньою організацією охорони здоров'я (ВООЗ). Це поняття утворилося через щоденне, надмірне використання людьми залізних доріг, електроприладів, високовольтних ліній і т.і. Також всі ці фактори призвели до того, що до природних електромагнітних полів додались штучно створенні споживачами електромагнітні поля, наприклад:

- від підземних електричних кабелів
- від високовольтних ліній електропередач
- від різноманітних антен(зв'язку, радіо, інтернету і т.і.)

Загальновідомо, що електромагнітне поле є біологічно активним чинником, а при деяких обставинах є біотропним фактором, який може викликати зміни в організмі живих істот, в тому числі і людини, порушуючи його повноцінне функціонування. Також це підкреслює Програма Організації Об'єднаних Націй (ООН) із захисту навколишнього середовища. Тому на фоні всіх вище перерахованих факторів виникає новий напрям у екології – електромагнітна екологія, з рядом специфічних проблем: медико-біологічних, біофізичних і науково-технічних. Електромагнітна екологія – це розділ екології, який вивчає взаємодію людини і навколишнього середовища з електромагнітним полем (ЕМП).

За останні 30 років було опубліковано приблизно 25 000 статей з проблем біологічних ефектів і медичного неіонізуючого випромінювання. Деякі люди вважають, що дослідження в цьому напрямку слід і далі розширювати, а наукові знання в цій галузі сьогодні набагато ширші, ніж у більшості хімічних речовин.

На недавньому поглибленому огляді наукової літератури, ВООЗ(Всесвітня Організація Охорони Здоров'я) зробила висновок, що наявні дані не вказують на негативний вплив на здоров'я людини в результаті впливу електромагнітних полів низької інтенсивності. Але вчені продовжують перевіряти гіпотези, які затверджують, що довготривалий вплив низькочастотних електричних полів, під якими ми знаходимося вдома від телефонів, комп'ютерів, пристроїв роздачі інтернету, побутової техніки і т.і. можуть впливати на наш стан, а саме: викликати головні болі, відчуття тривоги, депресію, нудоту, відчуття втоми та втрату лібідо. Але є і деякі інші питання про біологічні ефекти, які вимагають подальших досліджень.

ЕП виникаєтам, де є негативний чи позитивний електричний заряд, сила ЕП вимірюється за допомогою приладу, який називається «Вимірювач електромагнітних полів». Одиницею вимірювання напруженості ЕП для цього приладу є Вольт на метр(В/м).Будь-який провідник під напругою створює супутнє ЕП, яке буде існувати навіть при відсутності струму. Чим напруга вище, тим сильніше буде ЕП, отже чим ближче до джерела заряду, тим ЕП теж буде сильніше. Проте провідники служать непоганим захистом від електромагнітного випромінювання порівняно з іншими будівельними матеріалами(цегла, дерево, бетон), які лише частково забезпечують захист. Завдяки таким матеріалам електромагнітні випромінювання, які виникають у будівлі,частково відбиваються, а випромінювання, утворені поза нею, наприклад,ЛЕП,будуть відбиті самою будівлею, а саме стінами.

Прикладом поля низької частоти є ЕП, що генерується електричними пристроями. Вони мають частоту до 300Гц(герців). Також є поля середньої частоти(СЧ) від 300 до 10МГц(мегагерців) і радіочастотні поля(РЧ) від 10МГц до 3000ГГц(гігагерців). Вплив ЕП на людський організм залежить від його частоти і енергії.

Радіочастоти є обмеженими природними ресурсами, відповідно до Декларації керівних засад використання мовлення через супутники для вільного поширення інформації, розвитку освіти і розширення культурних обмінів та ч.

2 ст. 44 Статуту Міжнародного союзу електрозв'язку. І належать усім народам, і їх використання регулюється Конвенцією Міжнародного союзу електрозв’язку та її Регламентом радіозв'язку. Статут Міжнародного союзу електрозв'язку і Конвенція Міжнародногосоюзу електрозв’язку ратифіковані Законом України від 15 липня 1994року. Електромагнітний спектр до 3 ТГц (терагерц) ділиться на 12 частотних діапазонів. За регламентом Міжнародного союзу електрозв'язку, радіохвилі поділено на діапазони з границями від $0.3 \cdot 10^N$ Гц до $3 \cdot 10^N$ Гц, де N — номер діапазону. Всі діапазони наведені в таблиці нижче.

Таблиця 1.

Частотні діапазони електромагнітного випромінювання

Номер діапазону	Діапазон частот	Вид радіохвиль	Вид радіочастот
1	3 – 30 Гц	декамегаметрові	вкрай низькі
2	30 – 300 Гц	мегаметрові	наднизькі
3	0,3 – 3 кГц	гектокілометрові	інфранизькі
4	3 – 30 кГц	міріаметрові	дуже низькі
5	30 – 300 кГц	кілометрові	низькі
6	0,3 – 3 МГц	гектометрові	середні
7	3 – 30 Мгц	декаметрові	високі
8	30 – 300 МГц	метрові	дуже високі
9	0,3 – 3 ГГц	дециметрові	ультрависокі
10	3 – 30 ГГц	сантиметрові	надвисокі
11	30 – 300 ГГц	міліметрові	вкрай високі
12	300 – 3000 ГГц	децимініметрові	гіпервисокі

Люди використовують мільярди тон різноманітної сировини(вода, паливо, мінеральні речовини), і всього один відсоток використаних ресурсів переходить у корисний продукт, і електромагнітне поле не є виключенням. Доказом є технічні засоби радіомовлення, радіозв’язку і телебачення, які

випромінюють велику кількість електромагнітної енергії. Ця енергія має певне призначення – вона повинна впливати на вхідні кола приймальних пристроїв. Потужність передавача вимірюється від міліват(потужність передавача радіотелефону) і до сотень мегават(широкомовні передавачі в діапазонах НЧ і СЧ). Для нормальної роботи приймального пристрою необхідна потужність в 1мВт(міліват), то неважко підрахувати, що для передавача потужністю 100кВт(кіловат) необхідно мати 100 мільйонів приймачів. Тільки в Україні таких передавачів понад сотні тисяч. Тож можна тільки уявити скільки залишається невикористаної електромагнітної енергії.

Виникають питання: куди дівається невикористана енергія, і як проявляється її дія на наш організм? Частина цієї енергії поглинається(розсіюється) навколишнім середовищем, а решта йде у космічний простір.

Щоб відповісти на друге питання треба розібратись як саме діють ці поля на провідники. Вони нагрівають електропровідні матеріали, шляхом впливу на розподіл електричних зарядів по поверхні матеріалу і в середині нього. А так як людина на вісімдесят відсотків (80%) складається з води, то наш організм є дуже гарним електропровідником, і це робить нас дуже вразливими до дії електромагнітних полів. Струм проходячи через тіло людини йде у землю і якщо такий вплив буде доволі сильним і довготривалим, це може призвести до серйозних порушень в організмі. Порушення відбудуться у клітинах організму, його тканинах, органах та різних системах людини (імунна, статева, ендокринна, нервова).

Якщо не брати до уваги те, що в останнє сторіччя з’явився і постійно зростає рівень радіофону, під яким враховують сумарний ефект усіх випромінюючих засобів планети, то рівень електромагнітного забруднення поки не перевищує небезпечної відмітки. Високе електромагнітне випромінювання локалізоване поблизу джерел та існує в період роботи цих технічних засобів. Але небезпечною та шкідливою для здоров’я людей, є зона радіусом 20 метрів від ЛЕП 600 кВ та радіусом 30 метрів від ЛЕП 750 кВ. Тож

для того щоб запобігти потрапляння людини під високе електромагнітне випромінювання були розробленні норми перебування у ЕП. Допускається перебування людини у полі напруженістю до 5 кВ/м(кіловольт на метр)протягом робочого дня. Однак при перевищенні вищезазначеної напруженості , кількість допустимого часу вимірюється за формулою:

$$T=50/E-2,$$

де **E**– напруженість ЕП у контрольованій зоні.

При напруженості ЕП від 20 до 25 кВ/м час перебування людини у цьому місці не повинен перевищувати 10 хвилин, а при ЕП більшому за 25 кВ/м не допускається перебування людини у цьому місці без спеціального захисту. Для захисту, людей що працюють з відкритими розподільними пристроями, використовується екран. Екран - це стальні канати , металевих решіток або сіток, закріплених на рамі з кутової сталі. Діаметр цих канатів та прутів не менше за 6 мм, дистанція між канатами 500 мм, а ячейки сітки екранів повинні бути не більше за 50 х 50 мм. Для правильного функціонування, екрани, заземлюють.

Також для порівняння наведемо приклади нормованих та еквівалентних рівнів напруженості електричного поля та національних нормативів напруженості ЕП промислової частоти у наступних таблицях:

Таблиця 2.

Нормований та еквівалентний рівні напруженості електричного поля промислової частоти

Організації	ЕП, кВ/м		Щільність струму, мА/м^2	Еквівалентне ЕП, кВ/м (без урахування коефіцієнта запасу)
	Короткочасне	8 год/ 24 год		
ICNIRP Guidelines, 1998:				
персонал	–	10	10	25
населення	–	5	2	5
CENELEC:				
персонал	30	10	10	30
населення	–	10	4	12
IRPA:				
персонал	10	30	–	–
населення	5	10	–	–
Германія – BFE:				
персонал, що працює в МП	30 (1-2 год./день)	21.3	10	66.7
персонал, що не працює в МП		6.67	2	13.3
Великобританія – NRPB	–	12	10	21
США – ACGIH:				
персонал	–	25	10	25

Джерело: ICNIRP, CENELEC, IRPA, NRPB, BFE, ACGIH

Таблиця 3.

Національні нормативи напруженості ЕП промислової частоти

Країна/Організація	значення напруженості електричного поля E (кВ/м)	Коментарі/Рекомендації по застосуванню допустимої величини
Австрія	5	Рекомендований рівень. Допустимий розрядний струм 0,5 мВ
Бельгія	10	У місцях, доступних для людей
	7	Перехрестя доріг
	5	Доступні нежитлові зони
Хорватія	10	Перебування у полі до декількох годин на день. Значення рекомендоване ICNIRP
	5	Перебування у полі без часових обмежень. Значення рекомендоване ICNIRP

Чеська Республіка	10	Перебування у полі до декількох годин на день. Значення рекомендоване ICNIRP
	5	Перебування у полі без часових обмежень. Значення рекомендоване ICNIRP
Естонія	10	Перебування у полі до декількох годин на день. Значення, рекомендоване до застосування ICNIRP на основі рекомендації для країн Європейського Союзу
	5	Перебування у полі без часових обмежень. Значення, рекомендоване до застосування ICNIRP на основі рекомендації для країн Європейського Союзу
Фінляндія	15	Рекомендоване значення для короткочасної експозиції
	5	Рекомендоване значення для довготривалої експозиції
Франція	5	Рекомендоване значення для експозиції у полі, що генерується новими та перебудованими об'єктами енергосистеми, що працюють у нормальних умовах
Німеччина	10	Короткочасна експозиція та невеликі зони, не призначені під забудову
	5	Інші зони
Польща	10	В місцях, доступних для людей
	1	У зонах, призначених до для жилого будівництва
Португалія	5	Рекомендована величина для довгочасної експозиції. Допустимий розрядний струм 0,5 мА
Словенія	10	У місцях, доступних для людей
	0,5	У зонах особливого захисту (місцезнаходження житлових будинків, шкіл, лікарень, центрів відпочинку, тощо)
Швейцарія	5	У місцях, доступних для людей
Швеція	10	Рекомендації Шведської служби радіологічного захисту
Великобританія	5	Так званий довідковий рівень. Допустимий розрядний струм 0,5 мА
Італія	5	Так звана гранична величина експозиції
Рекомендації Євросоюзу – CEU	5	Рекомендоване значення для довготривалої експозиції у відповідності з Рекомендацією 1991/519/ЄС. Допустимий розрядний струм 0,5 мА.

Джерело: Euroelectric, стандарти та рекомендації, що застосовуються в країнах Євросоюзу

У США окрім загальнонаціональних рекомендацій в окремих штатах запроваджено доповнення, наприклад, напруженість ЕП на границі зони відчуження нормовано в межах від 1кВ/м (штат Монтана) до 3кВ/м (штат Нью-Джерсі). У деяких країнах, наприклад, в Австралії, у виняткових випадках для лінії 500кВ допускається напруженість ЕП на границі зони відчуження 5кВ/м.

Основними джерелами електромагнітного випромінювання, що діють на людину у повсякденному житті є:

- електропроводка
- передавальні теле- і радіостанції та різні електроприлади(мобільні телефони, комп'ютери, мікрохвильові пічки, електрочайники, холодильники, WI-FI роутери і т.і.)

- лінії електропередач
- трансформаторні підстанції та різні енергетичні установки

Слід пам'ятати, що електромагнітна енергія випромінюється багатьма технічними засобами, основні функції яких не пов'язані з навмисним процесом випромінювання!

В останні кілька десятиліть застосування пристроїв, які випромінюють електромагнітні поля значно зросла. Початок освоєння людиною електромагнітних полів пов'язаний з використанням діапазону довгих хвиль, що було обумовлено розвитком радіомовлення та радіозв'язку в цьому діапазоні. Потім швидкими темпами стало розвиватися телебачення, а діапазон використовуваних довжин хвиль став розширюватися в бік їх укорочення. З розвитком радіонавігації та радіолокації активно стали освоюватися діапазони сантиметрових, метрових і дециметрових хвиль. Що ж казати про стільникові телефонні мережі. В наш час важко уявити галузь науки, техніки, господарства, де б не використовувалася радіоелектронна апаратура.

У розвитку технічних засобів, що випромінюють ЕМП, існує три стійкі тенденції, які змушують звертати щільну увагу на питання електромагнітної екології:

перша – збільшення кількості випромінюючих засобів за рахунок технічного освоєння і більш щільного заповнення частотних діапазонів, розширення мережі радіомовлення та радіозв'язку, збільшення каналів телевізійного мовлення та інших служб;

друга – збільшення енергетичних потенціалів технічних коштів шляхом збільшення потужностей приладів і передавачів, збільшення ефективності передавальних антен засобів телекомунікації та їх територіальної концентрації;

третя – впровадження складної електронної побутової техніки, персональних комп'ютерів і інших досягнень нових технологій.

І все це призвело до того, що зараз спостерігається погіршення екологічної ситуації саме за електромагнітним фактором. Основний фактор погіршення ситуації пов'язують, в першу чергу, з переважанням відомчих,

чисто комерційних і споживчих підходів до питань використання ЕМП. Випромінюючі технічні засоби і об'єкти розміщуються на дахах житлових будинків та поблизу зон масового перебування людей без аналізу вже існуючої електромагнітної обстановки, прогнозування ЕМП розміщених засобів. Як правило, для розміщення таких засобів використовуються зручні, з точки зору обслуговування, місця установки антен (щогли, вежі, висотні будівлі, покрівлі і т.і.). Незважаючи на регламентації та обмеження щодо використання технічних засобів, випромінюючих в довкілля ЕМП, в комерційних цілях іноді реалізується не сертифіковані за гігієнічними параметрами та параметрами електромагнітної сумісності та безпеки апаратура

Існує ще багато факторів та тенденцій які змушують звертати щільну увагу на питання електромагнітної екології. Тому на даний момент в Україні діють «Державні санітарні норми і правила захисту населення від впливу електромагнітних випромінювань» затверджені наказом МОЗ України від 1 серпня 1996 року №239 (ДСН 239-96).

Згідно з цими нормами гранично допустимі рівні(ГДР) напруженості ЕП є:

- всередині житлових будинків – 0.5 кВ/м
- на території житлової забудови – 1 кВ/м
- у населеній місцевості, поза зоною житлової забудови (землі в межах міста з урахуванням перспективного розвитку на 10 років, приміські та зелені зони, курорти, землі селищ міського типу, в межах селищної межі і сільських населених пунктів, в межах цих пунктів), а також на території городів і садів – 5 кВ/м
- на ділянках перетину ЕП з автомобільними шляхами I - IV категорій – 10 кВ/м
- у ненаселеній місцевості (незабудована територія, яку відвідують люди, доступна для транспорту, та сільськогосподарські угіддя) – 15 кВ/м

- у важкодоступній місцевості (не доступній для транспорту та сільськогосподарських машин) та на ділянках, спеціально відгороджених для виключення доступу населення– 20 кВ/м

Ці рівні встановленні для ЕП, які не є викривленими присутністю людини.

Згідно з ДСН 239-96, напруженість ЕП замірюється на висоті 1,8 м від поверхні землі, для приміщень – від рівня підлоги.

Причому контроль за дотриманням ГДР напруженості ЕП слід здійснювати:

- при прийманні в експлуатацію нових будинків, споруд та зон відпочинку та праці людей поблизу ЛЕП;
- після проведення заходів щодо зниження рівнів ЕП ЛЕП.

З метою захисту населення від впливу ЕП встановлюються санітарно-захисні зони.Санітарно-захисною зоною вважається територія, на якій напруженість ЕП не перевищує 1 кВ/м.

Санітарно-захисна зона для ЛЕП встановлюється у вигляді земельної ділянки, межі якої регламентуються по обидві сторони від неї на певній відстані від проекції крайніх фазних проводів на землю, в перпендикулярному до передаючої лінії(ПЛ) напрямку:

20 м ПЛ напругою 300 кВ

30 м ПЛ напругою 500 кВ

40 м ПЛ напругою 750 кВ

55 м ПЛ напругою 1150 кВ

В якості приладу, рекомендованого для вимірювання рівнів ЕМП низькочастотного діапазону, ДСН 239-96 рекомендують наступний:

Таблиця 4.

Перелік приладів, рекомендованих для вимірювання рівняння ЕМП радіочастотного діапазону згідно ДСН 239-96

№ з/п	Найменування, тип частот параметр	Призначення	Робочий діапазон	Вимірювання	Межі вимірювання	Похибка
1.	Вимірювальний прилад	Широкосмужне вимірювання	За Е: 50Гц	Напруженість	2-40 кВ/м	20 %

	напруженості ближнього поля № FM-1 (Німеччина)	електричних і магнітних високочастотних полів на робочих місцях і розподілу поля передавальних антен у ближній зоні.				

У місті Харкові такий екологічний моніторинг ЕМП на платній основі робить Державне Підприємство «Харківський обласний лабораторний центр МОЗ України». В таблиці наведена ціна його послуг:

680	Визначення† рівня напруженості електромагнітного поля промислової частоти, постійного магнітного поля або електростатичного поля (напруженість) в одній точці	136,99	164,39
681	Визначення рівня напруженості електромагнітного випромінювання, щільності потоку енергії в одній точці	136,99	164,39

Ціна зазначена у гривнях без урахування ПДВ(ліва колонка), та з урахуванням ПДВ(права колонка).

Ціль роботи

Ціллю даної роботи є розробка пілотного проекту методики вимірювання рівня напруженості електричного поля (ЕП) в діапазоні промислової частоти уздовж основних транспортних артерій м. Харкова з метою визначення екологічної обстановки за цим ендогенним фактором.

Матеріали та методи дослідження

Дослідження проводились протягом 21-30 жовтня 2021р. на частині території Новобаварського району міста Харкова в 20-ти точках, які наведені на схемі рисунку 1. Відстань між сусідніми точками становила 100м.

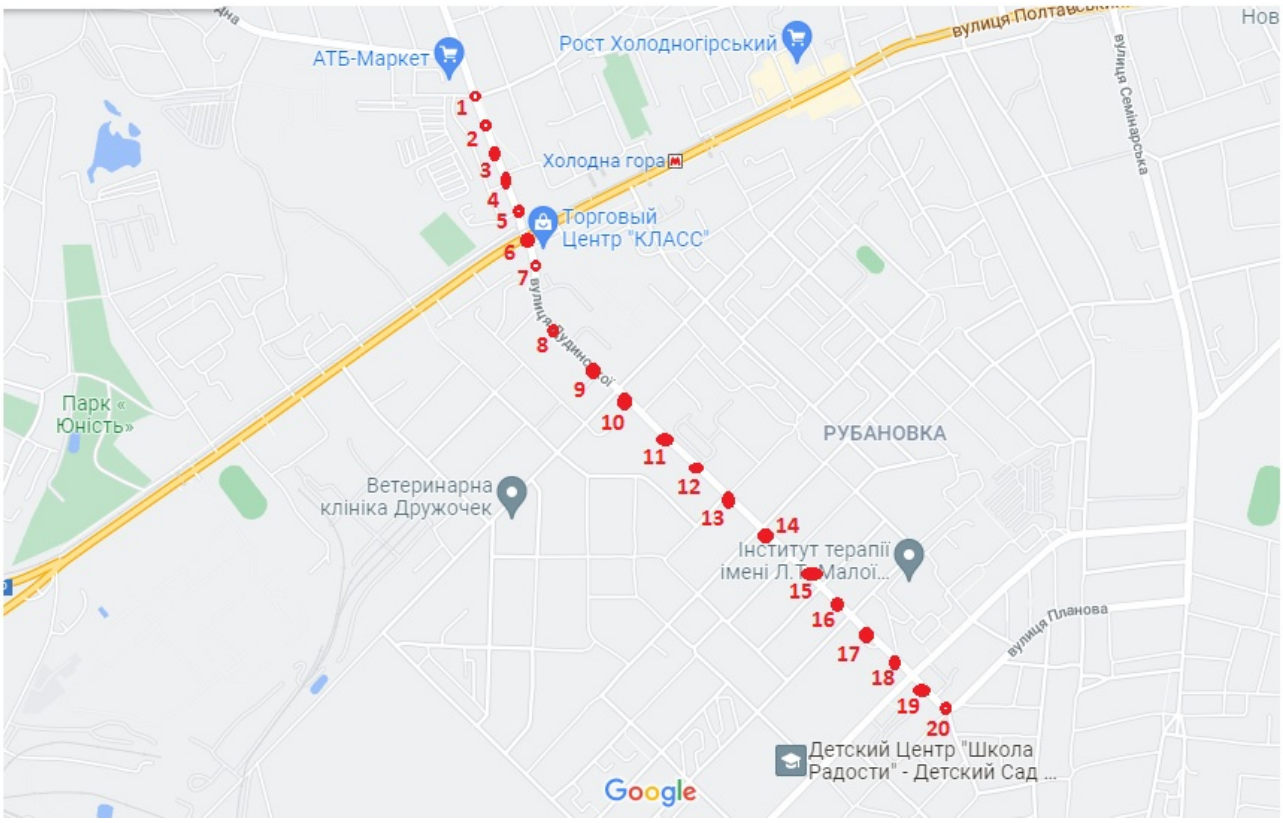


Рис. 1. Схема розташування 20-ти точок вимірювань

Вимірювання проводилися за допомогою сучасного вимірювача напруженості електричного поля (ЕП) VX 0100 (фірми Chauvin Arnoux, Франція). Досліджувався діапазон низьких промислових частот 5 Гц – 3 кГц. Вимірювалось амплітудне значення напруженості змінного ЕП. Використовувалися два діапазони напруженості ЕП: 1) від 1,0 В/м до 200,0 В/м та 2) від 100,0 В/м до 2000,0 В/м. Відносна похибка вимірювань на частоті 50 Гц складала 3 %. Вимірювач автоматично враховував присутність людини і виключав цей вплив з результатів вимірювань. Напруженість ЕП одночасно вимірювалася на двох висотах відносно поверхні землі: 1 м і 2 м.

Первинна обробка результатів вимірювань була проведена методами варіаційної статистики за допомогою інструменту «Описова статистика» з пакету «Аналіз даних» ППП MS Excel-2019.

Для виявлення статистичної залежності між результатами вимірювань на висоті 1 м і 2 м був застосований кореляційний аналіз за допомогою інструменту «Кореляція» з пакету «Аналіз даних» ППП MS Excel-2019.

Для з’ясування питання, вплив яких факторів є визначаючим для мінливості напруженості ЕМ: розташування точки вимірювання, чи дата проведення вимірювання, або випадкових факторів було застосовано двохфакторний дисперсійний аналіз в межах пакету «Аналіз даних» ППП MSExcel-2019 за допомогою інструменту «Двохфакторний дисперсійний аналіз без повторень». Усі графіки були побудовані в межах програми MSExcel-2019.

Результати та їх обговорення.

Результати вимірювань наведені в таблиці 5.

Таблиця 5.

Результати вимірювань напруженості ЕП в одиницях В/м

№ точки	Відстань, м	Висота, м	Дата									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
			21.10	22.10	23.11.	24.10.	25.10	26.10	27.10	28.10	29.10	30.10.
1	0	2	5	5	5	0	5	10	10	5	0	5
		1	5	5	0	0	5	5	5	5	5	5
2	100	2	5	0	5	5	10	5	5	0	5	5
		1	5	5	5	5	10	5	5	5	5	5
3	200	2	10	10	5	20	10	5	5	10	10	5
		1	5	5	5	10	10	10	5	20	10	10
4	300	2	5	5	5	0	5	0	5	5	5	5
		1	5	5	5	5	5	0	0	5	5	5
5	400	2	10	10	20	40	10	10	40	10	20	10
		1	20	10	10	10	20	10	20	20	20	20
6	500	2	20	20	10	60	40	40	20	80	40	40
		1	60	40	20	80	40	80	80	100	60	20
7	600	2	10	10	20	10	20	20	20	10	10	20
		1	20	10	5	20	5	20	0	10	10	5
8	700	2	10	40	5	10	10	10	5	10	5	20
		1	5	20	10	10	20	10	10	10	10	10
9	800	2	5	5	0	5	10	5	5	10	5	5
		1	5	5	5	5	5	5	5	5	5	0
10	900	2	5	20	5	5	10	10	5	5	5	10
		1	10	10	5	10	10	20	10	10	5	10
11	1000	2	5	5	5	0	5	20	5	0	5	5
		1	5	5	5	5	5	5	5	5	10	5
12	1100	2	5	10	10	10	10	5	5	5	10	10
		1	5	10	5	5	10	10	5	5	5	5

13	1200	2	0	0	5	0	5	5	20	10	5	5
		1	5	0	5	5	5	10	20	5	5	0
14	1300	2	10	10	10	10	5	60	5	5	10	10
		1	10	10	5	10	5	40	10	10	10	10
15	1400	2	5	5	5	5	10	5	5	0	5	5
		1	5	5	0	5	5	5	5	5	5	5
16	1500	2	0	0	5	5	0	0	5	5	5	0
		1	0	10	0	5	5	5	10	5	0	5
17	1600	2	5	5	5	5	10	5	5	5	10	10
		1	5	10	10	0	5	5	0	5	5	5
18	1700	2	10	10	20	5	5	40	10	10	5	10
		1	5	20	20	10	10	20	10	10	20	10
19	1800	2	40	10	40	10	20	40	20	10	10	40
		1	10	10	20	20	20	60	10	10	10	20
20	1900	2	5	5	40	20	5	0	10	10	5	5
		1	0	5	5	5	5	0	0	5	5	0

За даними таблиці 1 були побудовані відповідні графіки на рисунках 2 та 3.

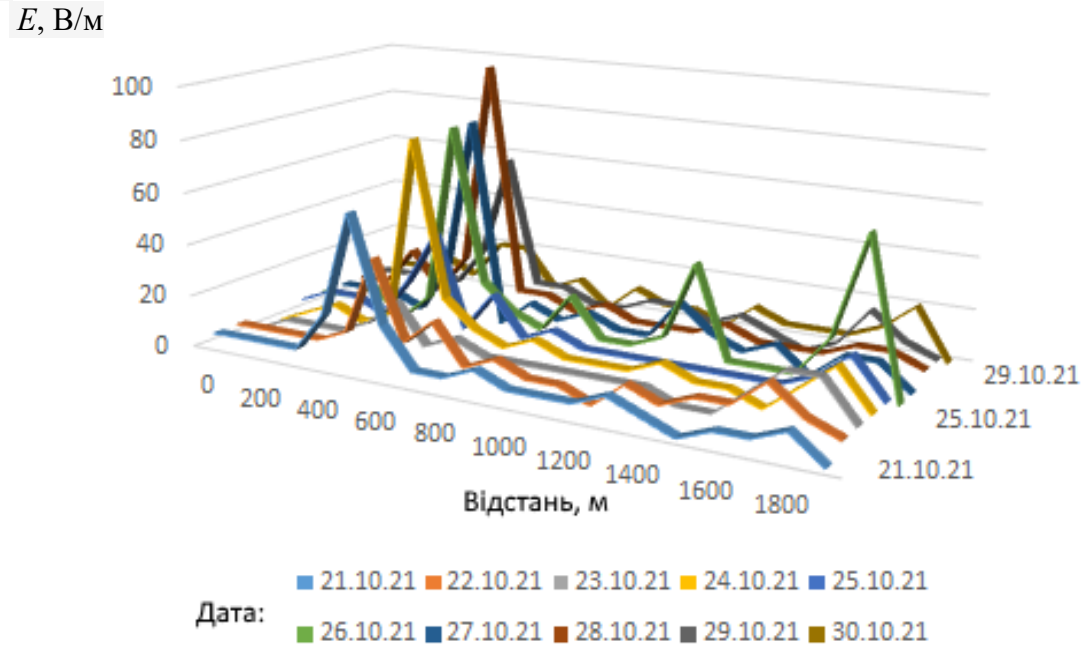


Рис. 2. Результати вимірювань напруженості ЕП на висоті 2 м вздовж маршруту на різні дати

E, В/м

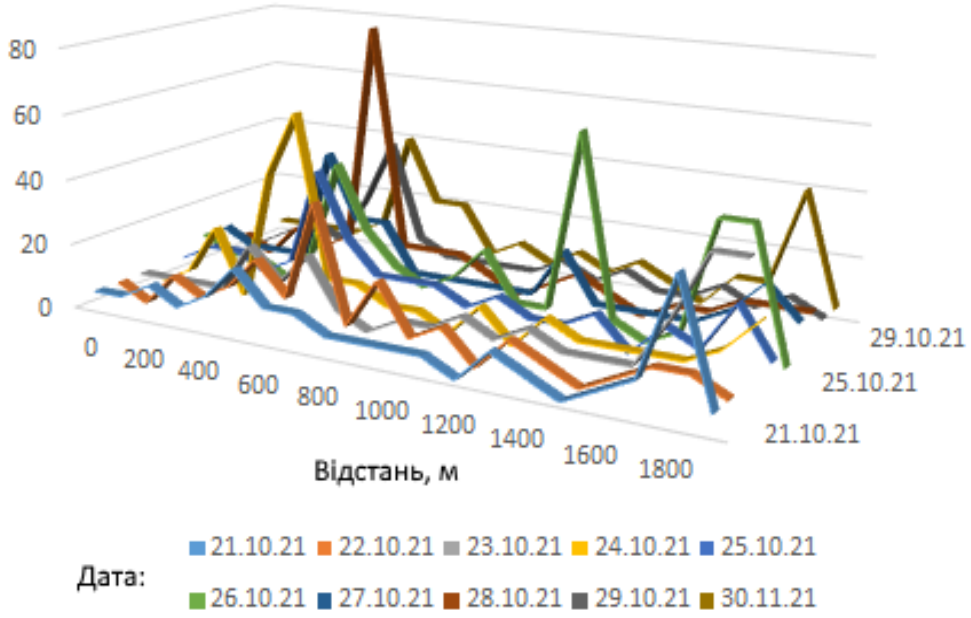


Рис. 3. Результати вимірювань напруженості ЕП на висоті 1 м вздовж маршруту на різні дати

Ці графіки свідчать про те, що аномально високі значення напруженості ЕП спостерігалися в точках № 6 і № 18. В інших точках напруженість знаходилася в межах фону – близько 10 В/м. Викликає інтерес той факт, що на висоті 2 м напруженість електричного поля була практично у два рази вище, ніж на висоті 1 м. Це свідчить про те, що джерело напруженості знаходилось зверху (наприклад, дроти ЛЕП та електротранспорту). Слід відмітити, що точки № 6 і № 16 відповідають перехрестям, де перетинаються дроти електротранспорту різних напрямків.

Для визначення наявності статистичного зв’язку між результатами вимірювань в різні дні був застосований кореляційний аналіз за допомогою пакету прикладних програм MSExcel-2019 (ППП MSExcel-2019), а саме програма «Аналіз даних» (інструмент «Кореляція»). Відповідні кореляційні матриці наведені в таблицях 6 та 7.

Таблиця 6.

Кореляційна матриця між результатами вимірювань на висоті 2 м в різні дні

Дата:	21.10	22.10	23.10	24.10	25.10	26.10	27.10	28.10	29.10	30.10
21.10	1									
22.10	0,796	1								
23.10	0,524	0,701	1							
24.10	0,952	0,851	0,599	1						
25.10	0,822	0,838	0,720	0,853	1					
26.10	0,775	0,722	0,707	0,845	0,759	1				
27.10	0,901	0,802	0,527	0,915	0,849	0,746	1			
28.10	0,945	0,841	0,537	0,964	0,858	0,751	0,950	1		
29.10	0,929	0,871	0,671	0,929	0,858	0,748	0,917	0,954	1	
30.10	0,626	0,629	0,693	0,605	0,816	0,733	0,572	0,597	0,649	1

Таблиця 7.

Кореляційна матриця між результатами вимірювань на висоті 1 м в різні дні

Дата:	21.10	22.10	23.10	24.10	25.10	26.10	27.10	28.10	29.10	30.10
21.10	1									
22.10	0,305	1								
23.10	0,600	-0,003	1							
24.10	0,378	0,331	0,265	1						
25.10	0,617	0,378	0,188	0,720	1					
26.10	0,604	0,239	0,304	0,270	0,385	1				
27.10	0,377	0,021	0,462	0,579	0,387	0,188	1			
28.10	0,376	0,338	0,074	0,820	0,837	0,366	0,341	1		
29.10	0,428	0,280	0,128	0,924	0,833	0,396	0,521	0,886	1	
30.10	0,870	0,512	0,441	0,549	0,856	0,583	0,412	0,668	0,659	1

Дані цих таблиць свідчать про те, що кореляція між результатами вимірювань на висоті 2 м є в основному високою та дуже високою (лише в деяких випадках середньою). Це говорить про те, що на цій висоті напруженість електричного поля є більш-менш сформованою, тобто стабільною з часом. Проте на висоті 1 м кореляція є в більшості випадків дуже слабкою та середньою, що свідчить про випадковий характер формування напруженості ЕП приземного шару.

Для визначення наявності статистичного зв’язку між результатами вимірювань в різних точках був теж застосований кореляційний аналіз за

допомогою ППП MSExcel-2019. Відповідні кореляційні матриці наведені в таблицях 8 та 9.

Таблиця 8.

Кореляційна матриця між результатами вимірювань на висоті 2 м в різних точках

Точки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	1																			
2	0,167	1																		
3	0,172	0,076	1																	
4	-0,250	0,167	0,172	1																
5	0,612	0,272	0,281	0,102	1															
6	0,154	-0,231	0,512	-0,423	0,094	1														
7	-0,145	-0,267	0,100	0,036	-0,386	0,397	1													
8	0,167	0,630	-0,051	0,167	-0,181	-0,316	-0,348	1												
9	-0,167	0,111	-0,076	-0,167	-0,272	0,487	0,267	0,111	1											
10	0,323	0,000	0,148	-0,645	-0,264	0,397	0,470	0	0	1										
11	0,167	-0,111	0,076	0,167	0,272	0,026	-0,024	-0,111	0,111	-0,430	1									
12	0,167	-0,111	0,076	0,167	0,272	0,026	-0,024	-0,111	0,111	-0,430	1,000	1								
13	0,093	-0,062	-0,170	-0,836	0,152	0,514	-0,216	-0,268	0,371	0,240	-0,062	-0,062	1							
14	0,236	-0,245	0,108	-0,681	-0,364	0,379	0,519	-0,186	0,070	0,880	-0,070	-0,070	0,253	1						
15	0,667	0,111	0,306	-0,167	0,408	0,487	0,267	0,111	-0,111	0,430	0,111	0,111	0,062	0,245	1					
16	0,286	0,048	-0,033	-0,429	-0,117	0,209	-0,301	0,524	-0,048	0,369	-0,429	-0,429	0,292	0,105	0,429	1				
17	0,000	0,000	-0,181	0,395	-0,323	-0,608	-0,115	0,351	0,000	-0,204	0,000	0,000	-0,587	-0,083	-0,527	-0,226	1			
18	-0,136	-0,212	-0,167	-0,136	-0,594	-0,231	-0,046	0,293	0,212	0,000	0,394	0,394	-0,118	0,343	-0,394	-0,039	0,575	1		
19	-0,035	0,023	0,063	-0,553	-0,480	0,101	0,408	-0,054	-0,023	0,804	-0,208	-0,208	0,141	0,885	-0,023	-0,010	0,000	0,358	1	
20	-0,408	0,272	0,281	0,612	-0,250	-0,063	-0,089	0,499	0,408	-0,527	0,272	0,272	-0,417	-0,471	-0,272	-0,117	0,323	0,334	-0,339	1

Таблиця 9.

Кореляційна матриця між результатами вимірювань на висоті 1 м в різних точках

Точки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	1																			
2	0,000	1																		
3	-0,725	-0,043	1																	
4	0,000	-0,093	-0,401	1																
5	-0,136	0,127	0,354	-0,300	1															
6	-0,316	-0,213	0,481	-0,325	-0,026	1														
7	0,632	0,557	-0,688	0,000	0,000	-0,350	1													
8	0,000	-0,508	0,057	0,124	-0,383	-0,136	-0,248	1												
9	0,000	0,034	0,256	0,093	-0,287	0,677	-0,186	0,046	1											

10	0,173	-0,284	-0,100	0,055	-0,449	-0,229	0,000	0,922	0,081	1										
11	0,606	0,196	-0,527	-0,431	-0,312	-0,273	0,479	-0,024	-0,196	0,251	1									
12	-0,645	0,227	0,281	0,102	0,035	-0,122	0,000	0,304	-0,227	0,312	-0,313	1								
13	0,557	0,016	-0,485	0,264	0,393	0,013	0,440	-0,416	0,147	-0,346	-0,008	-0,467	1							
14	0,454	0,042	-0,278	-0,686	-0,235	0,002	0,287	-0,040	-0,160	0,167	0,927	-0,339	-0,132	1						
15	0,000	0,830	0,000	0,000	0,000	-0,447	0,447	0,000	0,000	0,244	0,214	0,456	-0,197	0,000	1					
16	-0,316	-0,186	0,229	0,000	0,686	0,250	-0,200	-0,547	-0,186	-0,655	-0,479	0,000	0,440	-0,351	-0,447	1				
17	-0,345	0,527	-0,100	0,327	-0,262	0,098	0,218	-0,054	0,284	0,048	-0,063	0,535	-0,058	-0,216	0,488	-0,218	1			
18	0,629	-0,046	-0,513	-0,497	-0,256	-0,161	0,447	-0,086	-0,323	0,108	0,881	-0,406	0,022	0,912	-0,111	-0,248	-0,380	1		
19	0,466	0,329	-0,609	-0,037	-0,329	-0,471	0,590	-0,183	-0,465	-0,113	0,537	-0,211	-0,091	0,428	0,165	-0,442	-0,032	0,586	1	
20	-0,215	0,008	0,062	0,023	0,396	-0,219	0,136	-0,303	-0,596	-0,375	-0,351	0,314	-0,004	-0,284	-0,101	0,588	-0,326	-0,011	0,120	1

Дані таблиць 8 та 9 свідчать про те, що здебільшого кореляція між значеннями напруженості ЕП в різних точках, як на висоті 2 м, так і на висоті 1 м є слабкою і дуже слабкою (лише в деяких випадках середньою). Таким чином, можна стверджувати, що статистичний зв'язок між ними є несуттєвим.

Надалі з'ясуємо, вплив яких з розглянутих вище двох факторів є визначаючим для мінливості напруженості ЕМ: розташування точки вимірювання на місцевості, чи дата вимірювання. Для цього застосуємо двохфакторний дисперсійний аналіз в межах ППП MSExcel-2019 «Аналіз даних» за допомогою інструменту «Двохфакторний дисперсійний аналіз без повторень». Результати для висоти 2 м і 1 м наведені в таблицях 10 і 11 відповідно.

Таблиця 10.

Результати застосування двохфакторного дисперсійного аналізу (висота 2 м)

Точки:	*Рахунок*	*Сума*	*Середнє*	*Дисперсія*
1	10	40	4,00	4,44
2	10	55	5,50	2,50
3	10	90	9,00	21,11
4	10	40	4,00	4,44
5	10	160	16,00	26,67
6	10	580	58,00	751,11
7	10	105	10,50	52,50
8	10	115	11,50	22,50
9	10	45	4,50	2,50
19	10	100	10,00	16,67
11	10	55	5,50	2,50
12	10	55	5,50	2,50
13	10	60	6,00	32,22
14	10	120	12,00	101,11

15	10	45	4,50	2,50
16	10	45	4,50	13,61
17	10	50	5,00	11,11
18	10	135	13,50	33,61
19	10	190	19,00	232,22
20	10	30	3,00	6,67
Дати:				
21.10	20	190	9,50	168,16
22.10	20	195	9,75	74,93
23.10	20	145	7,25	38,09
24.10	20	225	11,25	289,14
25.10	20	200	10,00	78,95
26.10	20	320	16,00	435,79
27.10	20	215	10,75	298,09
28.10	20	255	12,75	443,36
29.10	20	215	10,75	158,62
30.10	20	155	7,75	38,09

Дисперсійний аналіз						
Джерело варіації	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-значення*	*F критичне*
Точки	27476,38	19	1446,13	22,332690	5,51E-37	1,647704
Дати	1117,63	9	124,18	1,936627	0,04978	1,934988
Випадкові	10964,87	171	64,12			
Разом:	39558,88	199				

Вплив факторів, %	
Точки	69,46
Дати	2,83
Випадкові	27,71
Разом:	100,00

Таким чином, на висоті 2 м головним джерелом варіації напруженості ЕП є розташування точки вимірювання (69,46 %). Від дати проведення вимірювань напруженість електричного поля практично не змінюється (в межах 2,83 %). Вплив випадкових факторів складає 27,71 %.

Таблиця 11.

Результати застосування двохфакторного дисперсійного аналізу (висота 1 м)

Точки:	*Рахунок*	*Сума*	*Середнє*	*Дисперсія*
1	10	50	5,00	11,11
2	10	45	4,50	8,06
3	10	90	9,00	21,11

4	10	40	4,00	4,44
5	10	180	18,00	151,11
6	10	370	37,00	445,56
7	10	150	15,00	27,78
8	10	125	12,50	112,50
9	10	55	5,50	8,06
19	10	80	8,00	23,33
11	10	55	5,50	30,28
12	10	80	8,00	6,67
13	10	55	5,50	35,83
14	10	135	13,50	272,50
15	10	50	5,00	5,56
16	10	25	2,50	6,94
17	10	65	6,50	5,83
18	10	125	12,50	112,50
19	10	240	24,00	204,44
20	10	105	10,50	135,83
Дати:				
21.10	20	170	8,50	73,95
22.10	20	185	9,25	82,30
23.10	20	225	11,25	128,62
24.10	20	225	11,25	218,09
25.10	20	205	10,25	72,30
26.10	20	295	14,75	285,46
27.10	20	210	10,50	83,95
28.10	20	205	10,25	282,83
29.10	20	175	8,75	70,72
30.10	20	225	11,25	120,72

Дисперсійний аналіз						
Джерело варіації	*SS*	*df*	*MS*	*F*	*P-значення*	*F критичне*
Точки	12863	19	677,00	8,212173	6,08E-16	1,647704
Дати	568	9	63,11	0,765553	0,648377	1,934988
Випадкові	14097	171	82,44			
Разом:	27528	199				

Вплив факторів, %	
Точки	46,73
Дати	2,06
Випадкові	51,21
Разом:	100,00

Таким чином, на висоті 1 м розташування точки вимірювання має вплив на 46,73 %. Від дати проведення вимірювань напруженість ЕП практично не залежить (в межах 1,25 % при сумнівній достовірності $p < 0,648377$). Головним чинником варіації напруженості ЕП є випадкові фактори (51,21 %).

Проаналізуємо процеси формування напруженості фонового ЕП в місті. Відомо, що енергетичне обладнання, зокрема, ЛЕП, мережі живлення та тягові підстанції електротранспорту, силові трансформатори, силові розподільні пункти створюють ЕП промислової частоти, які вносять суттєвий, а найчастіше і визначальний внесок у загальну електромагнітну обстановку.

У зв'язку з цим можна стверджувати, що всі технічні засоби, які розглядаються, можна підрозділити на дві основні групи, виходячи з особливостей їх просторової локалізації: – групу розподілених (протяжних) технічних засобів, один з характерних лінійних розмірів яких істотно переважає над іншими – ЛЕП, лінії живлення електротранспорту тощо; – групу локалізованих технічних засобів – силові трансформаторні установки, тягові підстанції електротранспорту, розподільні пункти системи енергопостачання.

Названі технічні засоби, переважно, є джерелами або статичного ЕП, або ЕП промислової частоти (ПЧ). Оскільки для випадку ЕП ПЧ виконується умова квазістаціонарності, тобто просторовий період зміни поля (або довжина відповідної електромагнітної хвилі) виявляється значно більшим за загальну довжину провідників, що розглядаються, то розподіл амплітуди струму у всьому ланцюгу в кожен момент часу можна вважати рівномірним, і електродинамічна задача при розрахунковому прогнозуванні електромагнітної обстановки може бути сформульована аналогічно до статичного випадку. Іншими словами, моделювання з метою розрахунку електричного та магнітного полів може проводитися окремо.

Відомо, що будь-яка електродинамічна проблема в решті решт є крайовою електродинамічною задачею для системи диференціальних рівнянь у частинних похідних – рівнянь Максвелла, або інших, які з них витікають, – однорідних або неоднорідних рівнянь д`Аламбера і Гельмгольца. Таким чином, принципова можливість розрахунку ЕМП будь-яким із відомих методів виникає у випадках, коли може бути сформульована (явно чи неявно) відповідна повна система граничних умов. З них стосовно завдань, поставлених у дослідженні, очевидно, необхідно розглянути такі. Перша і найпоширеніша гранична умова

полягає в тому, що повинні бути відомі первинні потенціали та струми у всіх провідниках (на їх поверхнях або в їх обсягах, залежно від конкретної постановки задачі), що утворюють модель. У деяких завданнях гранична умова зводиться до того, що значення потенціалу чи струму провідника підлягає визначенню за умови, що його повний заряд відомий. Так, наприклад, у конструкціях, що містять проміжні екрани, що не мають гальванічного контакту з струмоведучими частинами пристрою, заряд екранів зазвичай вважають рівним нулю. Зазначені граничні умови можуть бути в різних комбінаціях. У відповідній літературі прийнято поділ статичних та стаціонарних полів на плоскі (двовимірні), псевдодвовимірні та тривимірні. Такий спосіб класифікації може бути поширений і на відповідні розрахункові моделі, що дозволить значною мірою визначити вибір адекватних для вирішення конкретної задачі розрахункових методів. Так, поля, утворені об'ємними провідниками і містять тонкі незамкнуті витки струму, досить ефективно можуть бути визначені в результаті розв'язання задачі у двовимірному або псевдодвовимірному формулюванні. Розрахунок тривимірних полів таких провідників, хоча і не призводить до суттєвих математичних труднощів, зазвичай, проводиться зі значно більшими витратами машинного часу. Практично всі існуючі на сьогоднішній день методи розрахунку статичних і стаціонарних полів цілком забезпечують принципову можливість розрахунку потенціалів і напруженостей полів, які згодом успішно верифікуються. Проте, при застосуванні різних методів виявляється суттєво різним обсяг інформації, одержуваної під час вирішення завдання, і, крім того, різний обсяг обчислень, необхідні отримання чисельних значень шуканих функцій. У зв'язку з цією обставиною при виборі адекватного розрахункового методу важливо врахувати, що при аналізі поля найбільший інтерес, як правило, становить порівняно невелику область простору поблизу джерела. У більшості завдань це область поблизу точки, в якій потрібна функція набуває максимального значення – так звана область «сильного поля».

При частоті електричного струму $f = 50$Гц довжина хвилі електромагнітного випромінювання становить $\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{50} = 0{,}6 \cdot 10^7$м = 6000 км.

В рівняннях Максвелла

$$\text{rot}\,\vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t},\ \text{rot}\,\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t},$$

можна знехтувати внаслідок їх малості похідними $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ і $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$, оскільки поля змінюються в часі відносно повільно. Тоді рівняння Максвелла для ЕП набуває вигляду: $\text{rot}\vec{E} = 0.$

Тобто електричне і магнітне поля за умов задач цього типу можна розглядати як незалежні друг від друга функції, і вважати, що електромагнітні хвилі не випромінюються. При обчисленні електричного поля лінію слід розглядати як розподілений уздовж відрізка прямої електричний мультиполь – систему паралельних заряджених ниток.

Електричне поле ЛЕП. Як зазначалося вище, при обчисленні електричного поля ділянку протяжної повітряної ЛЕП будемо розглядати, як систему розподілених уздовж відрізка прямої паралельних заряджених ниток, які несуть певний еквівалентний електричний струм, який визначається з погонних параметрів та класу напруги лінії. При цьому робиться припущення, що навантаження лінії рівномірно розподілена між фазами, і струм у нульовому дроті відсутній. Розглянемо модель прямолінійної ділянки ланцюга електропостачання з погляду обчислення електричного поля. Оскільки напруга в мережі не залежить від навантаження, електричне поле також виявляється незалежним від споживаного струму. ЛЕП, конфігурація проводів якої відповідає типовій опорі У-35 та розміщена в декартовій системі координат, наведена на рис.4. Знаходження електричного поля, з урахуванням перелічених припущень та обмежень, зводиться до вирішення двовимірної квазістатичної задачі. Вплив підстилаючої поверхні враховано введенням дзеркального зображення провідників, при цьому робиться припущення про металевий

характер електропровідності ґрунту, що, як відомо [наприклад, 100], цілком припустимо з точки зору електротехнічних розрахунків. Еквівалентні заряди

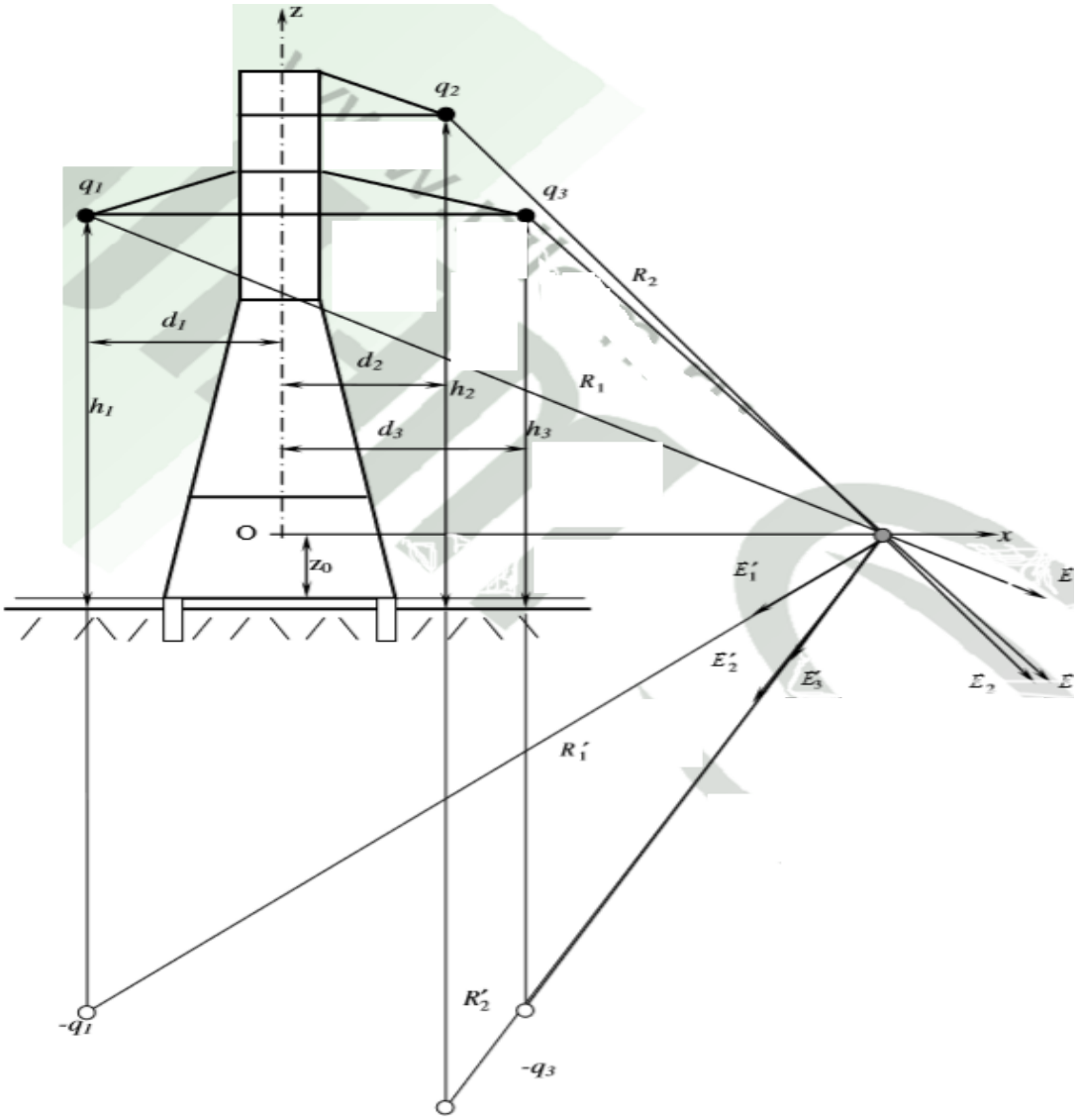


Рис. 4. До розрахунку ЕП ЛЕП

див. рис. 4), що відповідають провідникам лінії (віднесені до одиниці довжини провідника), визначаються наступним чином:

$$q_1 = C_1 \cdot U_\phi,\ q_2 = C_2 \cdot U_\phi \cdot e^{j\Delta},\ q_3 = C_3 \cdot U_\phi \cdot e^{-j\Delta} = C_3 \cdot U_\phi \cdot e^{j2\Delta},$$

де U_ϕ – клас напруження ЛЕП; $\Delta = 120^0$ – фазовий зсув; j – уявна одиниця; C_i (i = 1, 2, 3) – погонна ємність електричної системи дріт-Земля. Така спрощена постановка еквівалентної електростатичної задачі цілком виправдана з погляду оцінки ЕП ЛЕП.

Для знаходження ємності C_i обчислимо різницю потенціалів між *i*-м дротом та його дзеркальним відображенням. Напруженості поля, створювані між *i*-им провідником одиничної довжини та його дзеркальним відображенням у точці, що віддалена на відстані *r* (див. рис.4) від *i*-го провідника відповідно дорівнюють:

$$E_i'(r) = \frac{q_i^*}{2\pi\varepsilon_0 r};\ E_i''(r) = \frac{q_i^*}{2\pi\varepsilon_0(2h_i - r)},$$

де q_i^* – пов'язаний із провідником еквівалентний погонний електричний заряд, ε_0 =8,85·10^{-12}Ф/м – електрична стала (враховано, що поле визначається у повітрі). При запису цього виразу передбачалося, що електричне поле створюється рівномірно зарядженим циліндричним тілом кінечної довжини. Сумарне електричне поле в точці з координатою *r* визначається підсумуванням наведених виразів, в результаті чого приходимо до виразу:

$$E_i = E_i' + E_i'' = \frac{q_i^*}{2\pi\varepsilon_0}\left[\frac{1}{r} + \frac{1}{2h_i - r}\right].$$

Різниця потенціалів визначиться як інтеграл, взятий від цього виразу по області, де визначено ЕП:

$$U_i = -\int_{2h_i-a}^{a} E_i dr = \frac{q_i^*}{2\pi\varepsilon_0}\int_{a}^{2h_i-a}\left[\frac{1}{r} + \frac{1}{2h_i - r}\right]dr.$$

Розбиваючи цей вираз на два доданки, отримаємо:

$$U_i = \frac{q_i^*}{2\pi\varepsilon_0}\left[\int_{a}^{2h_i-a}\frac{dr}{r} - \int_{a}^{2h_i-a}\frac{d(2h_i - r)}{2h_i - r}\right] = \frac{q_i^*}{\pi\varepsilon_0}\ln\frac{2h_i - a}{a}.$$

З урахуванням результату інтегрування, погонна ємність дроту ЛЕП відносно Землі визначається наступним чином:

$$C_i = \frac{q_i^*}{U_i} = \frac{\pi\varepsilon_0}{\ln\frac{2h_i - a}{a}}.$$

або, беручи до уваги, що висоти підвісу проводів ЛЕП значно більші за їх радіус, тобто $h_i >> a$, можна остаточно визначити:

$$C_i = \frac{\pi\varepsilon_0}{\ln\frac{2h_i}{a}}.$$

Цей результат може бути використаний для визначення зарядів, еквівалентних провідникам повітряної високовольтної лінії за формулами:

$$q_1 = C_1 \cdot U_\phi,\ q_2 = C_2 \cdot U_\phi \cdot e^{j\Delta},\ q_3 = C_3 \cdot U_\phi \cdot e^{-j\Delta} = C_3 \cdot U_\phi \cdot e^{j2\Delta},$$

Знаючи погонні заряди, легко обчислити напруженість ЕП ЛЕП.

В останні роки у проектних рішеннях реконструкції міських систем енергопостачання все частіше використовуються для реалізації високовольтних ЛЕП класів 35...220 кВ у вигляді підземних ліній (кабельних). Такі лінії практично не перешкоджають міській забудові, можуть бути прокладені вздовж автомобільних доріг і мають низку незаперечних переваг у сенсі зручності реалізації в умовах значної урбанізації території. Принципова можливість побудови підземних ЛЕП виникла у зв'язку з поширенням спеціальних силових екранованих кабелів, стійких до значних внутрішніх перенапруг (десятки МВ/м). Такі лінії, як правило, прокладаються усередині залізобетонних коробів із гравійним заповненням. При аналізі електромагнітної обстановки в коридорах проходження підземних ЛЕП виникає необхідність урахування впливу умов прокладання кабелів на характеристики ЕМП. Ця обставина не дозволяє використовувати запропоновану в цій роботі підхід до аналізу повітряних ЛЕП. Щодо цієї проблеми найбільш доцільним є використання будь-якого універсального чисельного методу вирішення крайових електродинамічних завдань. Як зазначено вище, в рівняннях Максвелла у правій частині залишаться лише члени:

$$\operatorname{rot}\vec{E} = 0,\ \operatorname{div}\vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0\varepsilon},$$

де щільність струму в дротах, що утворюють лінію $\vec{k}$ – азимутальний орт декартової системи координат (вісь z збігається з напрямкомпроходження ЛЕП); a – радіус дроту; I – струм. Відомо, що:

$$\text{rot rot}\,\vec{E} = \text{grad div}\,\vec{E} - \nabla^2\vec{E},$$

Безумовно, аналітичне рішення крайової задачі подібного типу для довільної конфігурації елементів моделі практично неможливе. Тому подальшим етапом з побудови методики електродинамічного аналізу підземних ЛЕП є чисельне рішення. Орієнтація на чисельні способи розв'язання диференціальних рівнянь виправдана, передусім їх універсальністю (з певними обмеженнями) стосовно форми модельованих матеріальних тіл і джерел. Рівняння можна розв’язати чисельно з допомогою відомого методу безпосереднього вирішення крайових завдань – методу кінцевих елементів (МКЭ) Цей метод набув дуже широкого поширення в обчислювальній електродинаміці останнім часом. Розрахунки показують, що для будь-якого варіанта виконання підземної ЛЕП (або кабелю) за інших рівних умов рівні електричних і магнітних полів виявляються значно меншими, ніж у разі повітряної ЛЕП. Для повітряної ЛЕП (такого класу напруги) максимальний рівень електричного поля на осі ЛЕП становить – 2300 В/м, що перевищує гранично допустимий рівень більш ніж у два рази. При цьому санітарно-захисний коридор складатиме понад 20 метрів. Для підземної кабельної ЛЕП, розміщеної в армованому залізобетонному лотку без заземлення на кінцевих пунктах, розрахунки показують: – рівні електричного поля на поверхні Землі можуть перевищувати 1 кВ/м у коридорі близько 5 м від однієї гілки кабельної лінії; – перевищення рівня 5 кВ/м розрахунками не виявлено. Для підземної кабельної ЛЕП, розміщеної в армованому залізобетонному лотку із заземленням на кінцевих пунктах, рівні електричного поля на поверхні землі не перевищують 50 В/м, що значно менше за нормований рівень.

Щодо структури ЕП, створюваного ланцюгом живлення тролейбусау присутності вагона типу ЗіУ9, який оснащений двома тяговими двигунами загальною потужністю 260 кВт, зі штанговим струмоприймачем, зазначимо ту

обставину, що області «сильного поля» локалізовані поблизу проводів контактної мережі та практично не «стосуються» салону. Рівні поля поза салоном виявляються невеликими і вже на відстані 1...1,5 м від розташування контактної мережі не перевищують ПДУ. Слід також зауважити, що присутність вагона очевидно призводить до збільшення рівнів поля, отже «чиста» контактна мережа (навіть з навантаженням) створює ЕП, рівень якого можна визнати безпечними.

Структура поля поблизу трамвайного вагона суттєво відрізняється від аналогічного випадку з вагоном тролейбуса. Ця обставина викликана насамперед тим, що через значне просторове рознесення струмопровідних частин контактної мережі область «сильного поля» локалізована у значно більшому обсязі, що включає сам вагон. Причому корпус вагона не забезпечує ефективного екранування, внаслідок чого рівні поля в салоні виявляються більшими, ніж у тролейбусі. Рівні поля поза салоном так само, як і в попередньому випадку, невеликі.

Висновки

Таким чином, вданій роботі:

1. На протязі жовтня 2021 р. були проведені пілотні дослідження напруженості фонового електричного поля технічного діапазону частот на частині території Новобаварського району м. Харкова.

2. Статистична обробка результатів була проведена із застосуванням методів варіаційної статистики, кореляційного та дисперсійного аналізу.

3. Результати вимірювань довели, що головним джерелом фонового електричного фону є ЛЕП та лінії живлення міського електротранспорту.

4. Результати вимірювань в жодній точці не виявилиперевищення граничнодопустимогорівня напруженості електричного поля на місцевості, який дорівнює, згідно ДСН 239-96, 1 кВ/м.

5. Моніторинг електромагнітного поля на території такого мегаполісу, як м. Харків, слід продовжити більш системно із застосування даних щодо

розташування і потужності ЛЕП, підземних кабелів, ліній живлення електротранспорту, трансформаторних підстанцій та т.і

Список використаної літератури

1. Hietanen, M., Kalliomäki, K., Kalliomäki, P. L., Lindfors, P. Measurements of strengths of electric and magnetic fields near industrial and radio-frequency heaters. Radio Sci.,1979, vol. 14(6S), P.31–33.
2. Nelson S. O. Review and assessment of radio-frequency and microwave energy for stored-grain insect control. Trans. ASABE, 1996, vol. 39(4), P.1475–1484.
3. Думанський В.Ю. Гігієнічна оцінка електромагнітної ситуації та наукове обґрунтування вимог до її безпеки в сучасних населених місцях України : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня доктора медичних наук / В.Ю. Думанський. – Київ, 2009.
4. Думанський Ю.Д., Сердюк А.М., Селезньов Б.Ю. Електромагнітне забруднення навколишнього середовища – сучасна гігієнічна проблема (підсумки та перспектива досліджень). Гігієна населених місць : зб. наук. пр. К., 2003. Вип. 41. С.195–204.
5. Безверха А.П. Обробка та результати психодіагностичного опитування для оцінки стану здоров'я населення під дією електромагнітного випромінювання терміналів транкінгового зв'язку. Гігієна населених місць : зб. наук. пр. К., 2007. Вип. 49. С. 273–281.
6. Сердюк А.М. Гігієнічне обґрунтування для населення гігієнічних нормативів магнітного поля – 50 Гц, що створюється кабельними лініями електропередачі на територіях різного функціонального призначення / Сердюк А.М., Думанський Ю.Д., Біткін С.В., Думанський В.Ю., Нікітіна Н.Г., Томашевська Л.А., Зотов С.В., Медведєв С.В., Дідик Н.В., // Збірка тез доповідей науково-практичної конференції «Актуальні питання гігієни та екологічної безпеки України», м.Київ, 20-21 жовтня 2016 р., С. 186-189.
7. Павлов А.Н. Электромагнитные поля и жизнедеятельность. Учебное пособие. – М.: Изд-во МНЭПУ, 1998. – 148 с.
8. Довбыш В.Н. Технология регионального контроля природной среды по фактору электромагнитного излучения объектов энергетических систем. // Инфокоммуникационные технологии, №3, 2006. – С.73 – 78.
9. Оцінкою стану зарубіжного та вітчизняного нормативно-правового забезпечення щодо обмеження впливу ЕМП та акустичних шумів об'єктів електроенергетики на здоров'я людини та навколишнє середовище. Науково-технічний центр електроенергетики НЕК «Укренерго» Міністерства енергетики та вугільної промисловості України. Київ, 2012. – 45 с.
10. Про затвердження державних санітарних норм і правил захисту населення від впливу електромагнітного випромінювання: Наказ МОЗ України від 1 серпня 1996 р. № 239 // Офіц. Інтернет-сторінка Верховної Ради України [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.rada.gov.ua.
11. Зайцев Ю.В., Кустов Е.Ф., Кузищина Т.К. Физико-химические свойства элементов проводников. М. : Издательство МЭИ, 2002. – 523 с.

12. Тамм И.Е. Основы теории электричества. М. : Наука, 1989. – 504 с.
13. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высшая школа, 2004. – 479 с.
14. Электромагнитная безопасность элементов энергетических систем: Монография / В.Н. Довбыш, М.Ю. Маслов, Ю.М. Сподобаев. –Самара: ООО «ИПК «Содружество», 2009. – 198 с.
15. Атабеков В.Б., Крюков В.И. Городские электрические сети. М.: Стройиздат, 1987. – 384 с.
16. Никольский В.В., Никольская Т.И. Электродинамика и распространение радиоволн. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1989. – 544 с.
17. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике.– М.: Наука, 1984. – 831 с.
18. Hoorfar A., Jamnejad V. Electromagnetic Modeling and Analysis of Wireless Communication Antennas.// IEEE Microwave Magazine. Mar. 2003/ – P.51–67.