

ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Характер впливу електричного струму на організм людини, а відтак і наслідки ураження, залежать від цілої низки чинників, які умовно можна підрозділити на чинники електричного (сила струму, напруга, опір тіла людини, вид та частота струму) та неелектричного характеру (тривалість дії струму, шлях проходження струму через тіло людини, індивідуальні особливості людини, умови навколишнього середовища тощо).

Безпосередніми причинами ураження людей електричним струмом є наступні:

- дотик до неізольованих струмоведучих частин електроустановок, які знаходяться під напругою, або до ізольованих при фактично пошкодженій ізоляції;
- дотик до неструмоведучих частин електроустановок або до електрично зв'язаних з ними металоконструкцій які опинилися під напругою;
- дія напруги кроку;
- ураження через електричну дугу.

Тяжкість ураження людини у всіх перерахованих вище випадках визначається величиною струму, що проходить через її тіло. Величина струму через людину, в свою чергу, залежить від напруги під яку потрапляє людина, від опору тіла людини, від опору ізоляції фазних проводів відносно землі, від ємнісної складової мережі а також від конструкційних особливостей мережі живлення.

Сила струму, що проходить через тіло людини є основним чинником, який обумовлює наслідки ураження. Різні за величиною струми справляють і різний вплив на організм людини. Розрізняють три основні порогові значення сили струму:

- пороговий відчутний струм – найменше значення електричного струму, що викликає при проходженні через організм людини відчутні подразнення;
- пороговий невідпускаючий струм – найменше значення електричного струму, яке викликає судомні скорочення м'язів руки, в котрій затиснутий провідник, що унеможливорює самостійне звільнення людини від дії струму;
- пороговий фібриляційний (смертельно небезпечний) струм – найменше значення електричного струму, що викликає при проходженні через тіло людини фібриляцію серця. В табл. .1 наведено порогові значення сили струму при його проходженні через тіло людини по шляху «рука–рука» або «рука–ноги».

Таблиця 1 – Порогові значення змінного та постійного струму

Вид струму	Пороговий відчутний струм, мА	Пороговий невідпускаючий струм, мА	Пороговий фібриляційний струм, мА
Змінний струм частотою 50 Гц	0,5-1,5	6-10	80-100
Постійний струм	5,0-7,0	50-80	300

У разі дотику до струмовідних або до металевих неструмовідних частин корпусу електроустановки, що випадково опинилися під напругою в результаті пошкодження ізоляції, величина струму, що протікає через тіло людини, і відповідно, наслідки ураження залежать від режиму нейтралі мережі, умов дотику і параметрів електричної мережі. Величина цього струму, а відтак і небезпека ураження людини, залежить від низки чинників: схеми під'єднання людини до електричного кола, напруги мережі, схеми самої мережі, режиму її нейтралі, якості ізоляції струмовідних частин від землі, ємності струмовідних частин відносно землі тощо.

Опір ізоляції проводів та ємність електромережі відносно землі, як фактори впливу на величину струму через людину.

В реальній лінії електропередач (повітряній чи кабельній) опір ізоляції проводів відносно землі (r_{i3}) розподіляється по всій довжині ліній електропередач – опорні, підвісні, натяжні ізолятори, ізоляція кабелю. Чим більше протяжність лінії електропередач, тим менший загальний опір ізоляції проводів відносно землі. Необхідний опір ізоляції регламентується чинними нормативами і відповідно до НПАОП 40.1-1.32-01 “Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок” (ПБЕ) має бути щонайменше 0,5 МОм (1 кОм на вольт напруги). Ізоляція струмопровідних ліній електропередач виконується з діелектриків, питомий опір яких внаслідок старіння ізоляції з часом, частого зволоження, забруднення, нагрівання, дії агресивного середовища тощо знижується.

Кожна ділянка лінії електропередач, що знаходиться під напругою, крім опору ізоляції має певну ємність відносно землі. Ємнісна складова струму (C) через людину у разі потрапляння під напругу в розгалужених мережах може досягати небезпечних для людини значень.

Конструкційні особливості мережі живлення – кількість фаз і режим нейтралі.

Наслідки ураження людини електричним струмом у випадку дотику її до металоконструкцій, які опинилися під напругою залежать від конструкційних

особливостей мережі живлення, а саме, від кількості фаз і режиму нейтралі – ізольованої чи глухозаземленої.

За значенням номінальної напруги електромережі поділяються на:

- мережі з напругою понад 1000 В;
- мережі з напругою до 1000 В;
- мережі малої напруги (не вище 42 В змінного та 110 В постійного струму).

Дотик може бути одно- або двополюсним у однофазних мережах або у мережах постійного струму та одно- або двофазним у трифазних мережах.

Глухозаземлена нейтраль – нейтраль генератора чи трансформатора, яка приєднана до заземлювального пристрою безпосередньо або через апарати з малим опором.

Ізольована нейтраль – це нейтраль трансформатора чи генератора, яка не приєднана до заземлювального пристрою або приєднана до нього через апарати з великим опором (трансформатори напруги, компенсаційні котушки тощо).

Однофазна мережа, ізольована від землі.

В однофазній мережі, ізольованій від землі, за непошкодженої ізоляції (рис.1) величина струму через тіло людини практично не залежить від опору тіла людини і визначається опором ізоляції проводу до якого доторкнулась людина відносно землі. Знехтувавши ємнісною складовою струму через людину ($C_1 = C_2 = 0$), та за умови, що $r_1 = r_2 = r_{i3}$ величину струму через людину можна визначена як:

$$I_{л} = \frac{U}{2R_{л} + r_{i3}}, A \quad (1)$$

де U – напруга мережі, В; $R_{л}$ – опір людини ($R_{л} = R_{міла} + R_{взуття} + R_{підлоги}$), Ом; r_{i3} – опір ізоляції проводів 1 і 2 відносно землі, Ом.

В знаменнику $R_{л}$ при розрахунку струму через людину за несприятливих умов (відсутності ізолюючого взуття, підлоги) приймають як $R_{тіла}$ в межах 10^3 Ом, а r_{i3} відповідно до чинних нормативів на декілька порядків більше.

У разі двополюсного дотику, струм через людину визначається за наступною формулою

$$I_{л} = \frac{U}{R_{т}}, A \quad (2)$$

де U – напруга мережі, В; $R_{т}$ – опір тіла людини, Ом ; $R_{т} = 1000$ Ом.

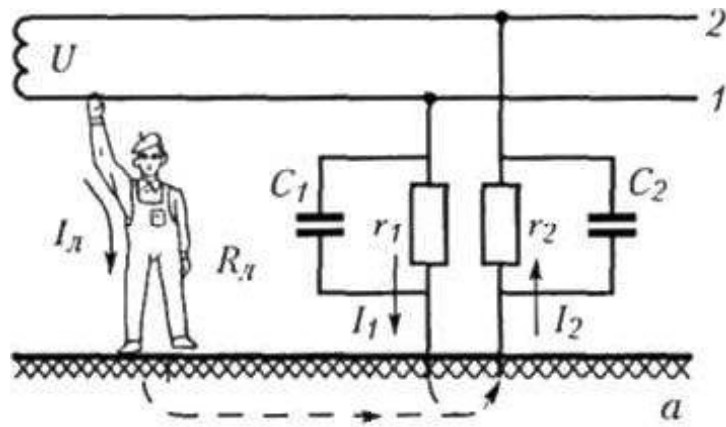


Рис.1. Принципова схема включення людини під напругу в однофазній мережі ізольованій від землі в нормальному режимі роботи

Трифазна мережа, ізольована від землі.

У разі дотику людини до фазного проводу трифазної мережі, ізольованої від землі виникає мережа замикання на землю, більш розгалужена, ніж в однофазній. Основні елементи цієї мережі: “фазний провід С” – “людина паралельно з опором ізоляції цього проводу відносно землі r_C ” – “земля” – “опори ізоляції проводів А і В відносно землі r_A і r_B ” – “фазні проводи А і В” (рисунок 2 а).

До цієї мережі прикладена лінійна напруга U_L , а не фазна U_ϕ , як у однофазній мережі. Оскільки $U_L = \sqrt{3}U_\phi$, то в трифазній мережі за інших рівних факторів величина струму замикання на землю, як і величина струму, що проходить через людину при її дотику до фазного проводу, має бути більшою.

За рівності опорів ізоляції ($r_A = r_B = r_C = r_{i3}$) і ємностей ($C_A = C_B = C_C = C$) струм, що проходить через людину, визначиться виразом:

$$I_{\text{л}} = \frac{U_\phi}{R_{\text{л}} \sqrt{1 + \frac{r_{i3}(r_{i3} + 6R_{\text{л}})}{9R_{\text{л}}(1 + r_{i3}^2 \cdot \omega^2 \cdot C^2)}}}, \text{ А} \quad (3)$$

де U_ϕ – фазна напруга мережі, В; $R_{\text{л}}$ – опір людини, Ом; r_{i3} – опір ізоляції проводів А, В і С відносно землі, Ом, ω – кутова частота мережі, Гц; C – ємність проводів відносно землі, Ф.

У випадку відсутності ємнісної складової струму, тобто коли $C_A = C_B = C_C = 0$ (що досить ймовірно для нерозгалужених повітряних мереж), за умови $r_A = r_B = r_C = r_{i3}$, величина струму, що проходить через людину, визначиться виразом

$$I_{л} = \frac{3U_{\phi}}{3R_{л} + r_{из}}, A \quad (4)$$

де U_{ϕ} – фазна напруга мережі, В; $R_{л}$ – опір людини, Ом; $r_{из}$ – опір ізоляції проводів А, В і С відносно землі, Ом.

Порівнюючи вираз (1) для величини струму, що проходить через людину, в нормальному режимі роботи електроустановки в однофазній мережі і вираз (4), бачимо, що в трифазній мережі $I_{л}$ практично, в три рази більше.

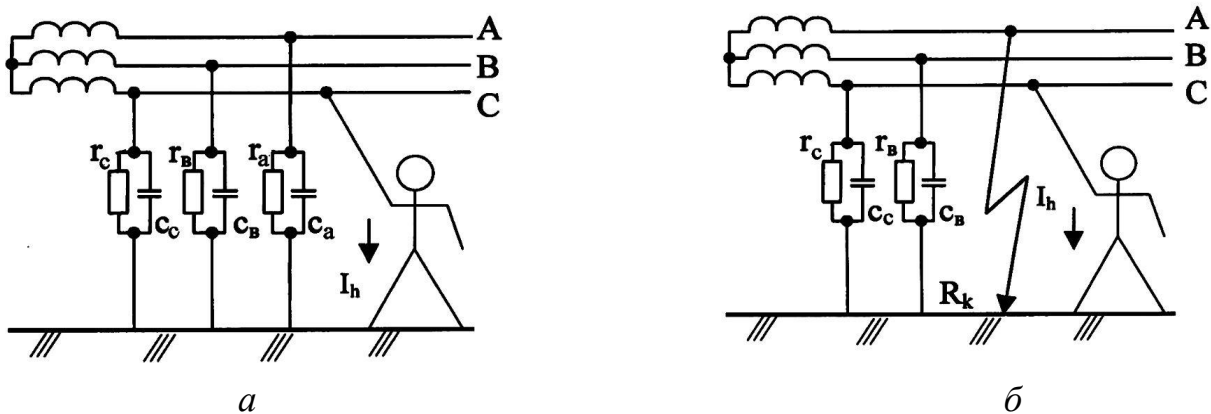


Рис.2. Схема включення людини під напругу у випадку однофазного дотику в мережі з ізольованою нейтраллю:

а – нормальний режим роботи мережі (відсутність замикань на землю фазних проводів); б – аварійний режим роботи мережі

У випадку однофазного дотику людини в аварійному режимі роботи мережі з ізольованою нейтраллю, тобто, коли один із фазних проводів замкнутий на землю (рисунок 2 б), струм через людину визначається за формулою:

$$I_{л} = \frac{U_{л}}{R_{т}}, A \quad (5)$$

де $U_{л}$ – лінійна напруга мережі, В; $R_{т}$ – опір тіла людини.

Трифазна чотирипровідна мережа з глухозаземленою нейтраллю.

Нейтраль вторинної обмотки трансформатора, від якого живиться така мережа, заземлена через $R_0 \ll R_{л}$. У випадку дотику людини до фазного проводу С утворюється мережа струму “фазний провід С – людина – земля – R_0 – фазний провід С”, в якій всі елементи з’єднані послідовно.

Струм через людину у випадку однофазного дотику до фазного проводу за непошкодженої ізоляції інших фазних проводів (рисунок 7.3 а) визначиться виразом:

$$I_{л} = \frac{U_{\phi}}{R_{л} + R_0}, A \quad (6)$$

де R_0 – опір заземлення, Ом.

У цій мережі найбільший опір має елемент “людина” – 1000 Ом. Опір інших елементів проходженню струму знаходиться в межах 10 Ом. Тому можна вважати, що людина попадає, практично, під фазну напругу ($U_{\text{дом}} = U_{\phi}$) а величина струму залежить, в основному, від $R_{\text{л}}$.

Тому величина струму через людину у випадку її однофазного дотику до неізолюваних струмовідних частин, які знаходяться під напругою, в мережах із глухозаземленою нейтраллю має бути на два порядки більшою, ніж в мережах, ізолюваних від землі за нормального стану ізоляції (значення $I_{\text{л}}$ за (1) і (4) та (5)).

В аварійному режимі роботи мережі із глухозаземленою нейтраллю (рисунок 3 б), струм через людину у випадку її однофазного дотику визначиться за формулою:

$$I_{\text{л}} = \frac{U_{\phi}}{R_{\text{т}}}, A \quad (7)$$

де U_{ϕ} – фазна напруга мережі, В; $R_{\text{т}}$ – опір тіла людини.

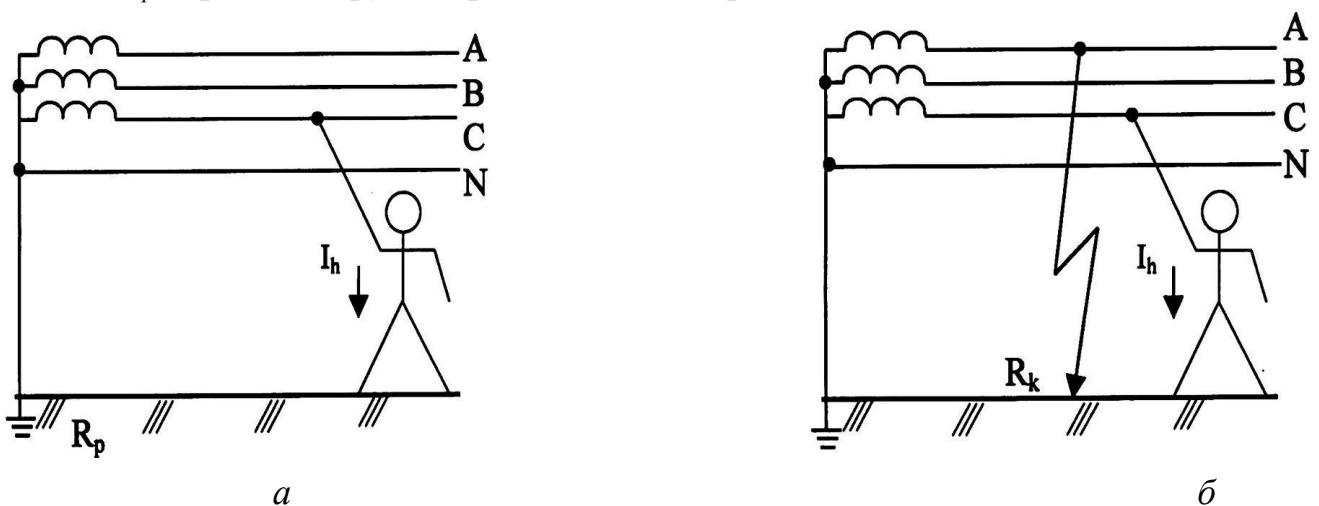


Рис.3. Схема включення людини під напругу у випадку однофазного дотику в трифазній чотирипровідній мережі з глухозаземленою нейтраллю;

а – нормальний режим роботи мережі (відсутність замикань на землю фазних проводів); б – аварійний режим роботи мережі

У випадку двофазного дотику людини незалежно від режиму нейтралі трансформатора (рисунок 4) основна частина струму проходить шляхом «рука-рука». Величина струму, який пройде через людину визначиться виразом:

$$I_{\text{л}} = \frac{U_{\text{л}}}{R_{\text{т}}}, A \quad (8)$$

де $U_{\text{л}}$ – фазна лінійна мережі, В; $R_{\text{т}}$ – опір тіла людини.

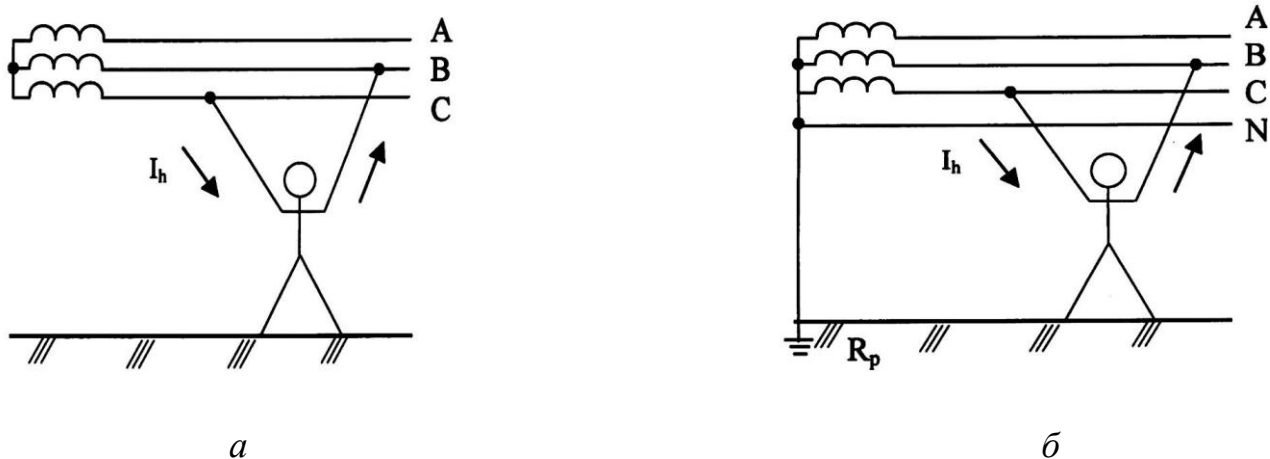


Рис.4. Схема включення людини під напругу у випадку двофазного дотику в трифазній чотирипровідній мережі з глухозаземленою нейтраллю:

а – мережа з ізольованою нейтраллю; б – мережа з глухозаземленою нейтраллю

На виробництві і в побуті найчастіше застосовуються мережі із глухозаземленою нейтраллю. І тільки в гірничодобувній промисловості і на торфорозробках, відповідно до вимог електробезпеки, обов'язковим є застосування мереж, ізольованих від землі.

Такий підхід до вибору режиму нейтралі електричної мережі обумовлений такими обставинами:

- в умовах виробничих підприємств, громадських установ, житлового сектора і т. ін. забезпечення необхідного опору ізоляції у випадку застосування мереж, ізольованих від землі, пов'язано з певними технічними і економічними проблемами;

- в мережах із глухозаземленою нейтраллю можливо забезпечити більш ефективний захист у випадку пошкодження ізоляції і переході напруги на неструмовідні частини електроустановок.

Напруга кроку.

При обриві проводів ліній електропередач і їх контакт з землею, пробії кабельних ліній на землю, замиканні на неструмоведучі елементи електроустановок, що мають контакт з землею, доторканні людини, яка стоїть на землі, до струмоведучих частин під напругою тощо земля стає елементом електричної мережі замикання на землю.

При проходженні струму по землі на її поверхні виникає специфічне поле потенціалів, характер якого визначається конструкцією заземлювача, властивостями ґрунту тощо.

Закон розподілу потенціалів на поверхні ґрунту залежить від геометричної форми електрода і для різних заземлювачів наведений у довідниках.

Для напівсферичного заземлювача, який знаходиться на поверхні землі (рисунок 5) за умови однорідності і електричної ізотропності ґрунту можна вважати, що струм у всіх напрямках буде розтікатися рівномірно – як показано стрілками на рисунку 5, і буде дорівнювати I_3 .

Розподіл потенціалів на поверхні землі навколо напівсферичного заземлювача відповідає рівнянню гіперболи, а значення потенціалів змінюється від свого максимального значення φ_3 до нуля при віддаленні від заземлювача (рисунок 5).

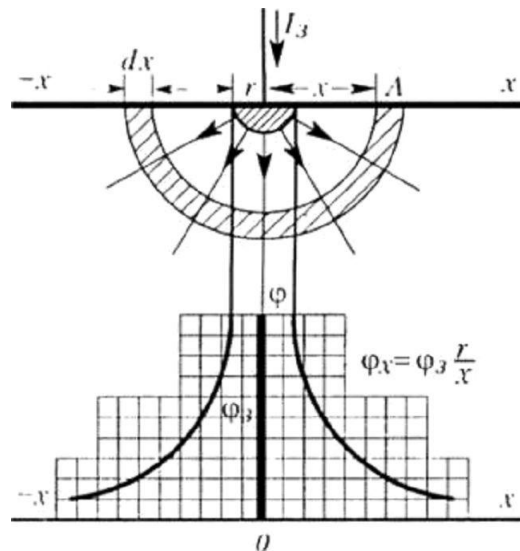


Рис.5. Розподіл потенціалів на поверхні землі навколо напівсферичного заземлювача

Практично зона підвищених потенціалів на поверхні землі відносно її нульового потенціалу при замиканні на землю через напівсферичний заземлювач і однорідному ґрунті обмежується колом із радіусом близько 20 м. Переміщуючись в цій зоні, людина попадає під так звану *напругу кроку* – напругу між двома точками на поверхні землі, які знаходяться одна від одної на відстані кроку і на яких одночасно стоїть людина.

З наближенням до заземлювача величина крокової напруги зростає і при напрузі мережі живлення 0,4 кВ вона може бути небезпечною для людини. Тому “Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів” за наявності замикання на землю забороняють наближатися до місця замикання ближче 8 м поза приміщенням і 4 м в приміщенні без застосування засобів захисту – діелектричні боти, калоші, суха дошка тощо.

В загальному вигляді величина напруги кроку може бути визначена як різниця між φ_x та φ_{x+a} , де a – величина кроку, м (0,8 м), відповідно до чого

$$U_k = I \frac{\rho}{2\pi x} - I \frac{\rho}{2\pi(x+a)} = I \frac{\rho \cdot a}{2\pi x(x+a)}, \quad (9)$$

тобто величина напруги кроку прямо пропорційна силі струму замикання на землю, питомому опорі провідника та величині кроку і обернено пропорційна відстані від заземлювача.

У цілому, заходи захисту людини від дії напруги кроку зводяться до розірвання мережі струму через людину по петлі “нога-нога”, або до різкого збільшення опору в цій петлі зі рахунок використання різних підручних засобів. За необхідності невідкладного входу в зону небезпечної напруги кроку для надання допомоги потерпілим і т.ін. та за відсутності засобів захисту, доцільно переміщуватись в цій зоні обережно, пересуваючи ступні по землі так, щоб вони постійно торкалися одна одної.

Напруга дотику. Дотик людини до корпусу ушкодженого обладнання або до корпусу обладнання, з'єднаного з ушкодженим загальним колом заземлення, зумовлює потрапляння людини під напругу дотику. *Напруга дотику* – це напруга між двома точками кола електричного струму, яких одночасно торкається людина, і дорівнює різниці потенціалів корпусу і точок поверхні ґрунту, де знаходяться ноги людини:

$$U_{\text{dot}} = \varphi_k - \varphi_x, \quad (10)$$

де φ_k – потенціал корпусу електроустановки, якої торкається людина; φ_x – потенціал в точці на поверхні ґрунту, де знаходяться ноги людини.

Напруга дотику, на відміну від напруги кроку, збільшується при віддаленні від заземлювача і за межами зони розтікання струму вона дорівнює напрузі на корпусі обладнання відносно землі. Захист від напруги дотику – вирівнювання потенціалів (встановлення електропровідної підлоги).

Таким чином, згідно з зазначеним вище, до основних факторів, які впливають на тяжкість ураження електричним струмом (на $I_{\text{д}}$) при попаданні людини під напругу, можна віднести:

- величину напруги мережі живлення, U, B ;
- величину напруги дотику U_{dot}, B ;
- конструкційні особливості мережі живлення – кількість фаз і режим нейтралі;
- величину опору і стан ізоляції – перш за все в мережах живлення, ізольованих від землі;
- протяжність і розгалуженість мережі живлення, які впливають на $r_{\text{і3}}$ і ємність відносно землі.