

Корисна модель належить до області технічних засобів передачі електричної енергії і може бути використана при розробці та виготовленні силових електричних одножильних кабелів, які використовуються при прокладанні потужних і надпотужних трифазних кабельних ліній.

Сучасні потужні трифазні кабельні лінії виконуються із силових одножильних електричних кабелів високої і надвисокої напруги. Обмежує потужність силових кабельних ліній два чинники. По перше і найважливіше це тепловий опір власної електричної ізоляції кабелю та еквівалентний тепловий опір ґрунту для кабельної лінії. Другим чинником є теплові втрати (нагрів) в струмопровідній жилі, в основній електричній ізоляції кабелю і в електромагнітному екрані (ЕМЕ) кабелю. Втрати в ЕМЕ, при певних умовах їх електричного з'єднання і топології кабельної лінії, можуть грати основну роль в створенні "теплового затвору" при відведенні теплового потоку від струмопровідних жил. Зменшення цих теплових втрат є актуальною задачею.

Відома конструкція силового електричного одножильного кабелю, що складається, як мінімум, з мідної або алюмінієвої струмопровідної жили, основної електричної ізоляції, двох напівпровідних електричних екранів, розташованих на поверхнях струмопровідної жили і основної електричної ізоляції, мідного ЕМЕ і зовнішньої ізоляційної оболонки [1, 2]. Недоліком цієї конструкції кабелю є значна величина теплових втрат в ЕМЕ при близькому розташуванні фаз одна від одної при прокладанні трифазної кабельної лінії. Це відбувається по наступних причинах. Втрати в ЕМЕ трифазних кабельних ліній викликаються так званими "подовжніми" струмами в цих екранах і вихровими струмами від магнітних потоків сусідніх струмопровідних жил кабельної лінії. Втрати від "подовжніх" струмів в ЕМЕ можна усунути заземленням ЕМЕ з одного кінця кабельної лінії або при виконанні повного циклу транспозиції ЕМЕ [4]. Якщо виконана транспозиція ЕМЕ, то "подовжні" струми в них будуть відсутні, як при однобічному заземленні, так і при заземленні ЕМЕ з обох кінців кабельної лінії. Втрати в ЕМЕ від вихрових струмів не залежать ні від засобу транспозиції ЕМЕ ні від засобу їх заземлення. Ця складова теплових втрат завжди присутня при експлуатації кабельних ліній і при занадто близькому розташуванні фаз одна від одної (що може статися в деяких місцях при прокладанні кабельної лінії) можливі значні місцеві перегріви кабелю аж до його аварійного виходу з ладу.

Цей недолік частково усувається в конструкції силового електричного одножильного кабелю, представлений, наприклад, в [2]. Такий кабель має, як мінімум, мідну або алюмінієву струмопровідну жилу, основну електричну ізоляцію, два напівпровідні електричні екрани на поверхнях струмопровідної жили і основної електричної ізоляції, мідний ЕМЕ, захисну ізоляційну оболонку і шар магнітної сталі, який розташований поверх захисної ізоляційної оболонки у вигляді спірально намотаної стрічки. Основне призначення сталевий стрічки полягає в механічному захисті електричного кабелю в цілому і використовується така конструкція для прокладання кабельних ліній в місцях можливого підвищеного механічного навантаження на кабель. Зменшення теплових втрат в такій конструкції кабельної лінії відбувається з наступних причин. Зовнішній магнітний потік від сусідніх фаз кабельної лінії наводить вихрові струми в сталевій стрічці практично не проникаючи в мідний ЕМЕ. Це відбувається тому, що для зовнішнього магнітного потоку шар із сталевий магнітної стрічки є замкнена в електромагнітному сенсі оболонка з дуже ефективною екрануючою дією. Так наприклад, експериментально було отримано, що замкнений шар магнітної сталі товщиною 0,5 мм і діаметром 21 мм зменшує внутрішній магнітний потік у порівнянні з зовнішнім магнітним потоком приблизно у 20 разів для напруженості магнітного поля, яка максимально досягається у реальних кабельних лініях на радіусі шару сталевий стрічки. Величина і швидкість зміни зовнішнього магнітного потоку однакові, як для мідного ЕМЕ, так і для шару сталевий стрічки. Отже, у сталевій стрічці наводиться та ж сама електрорушійна сила (е.р.с.), яка би наводилась у мідному ЕМЕ у разі відсутності шару сталевий стрічки. Під дією цієї е.р.с. в сталевій стрічці виникають вихрові струми, величина яких у відповідності закону Ома зворотно пропорційна величині еквівалентного омичного опору шару сталевий стрічки над мідним ЕМЕ. Втрати від "подовжніх" струмів в сталевій стрічці усуваються таким же чином, як і для мідного ЕМЕ. Таким чином, загальні теплові втрати в кабельній лінії, яка прокладена з кабелів з шаром сталевий магнітної стрічки, практично будуть рівні лише втратам від вихрових струмів в сталевих стрічках кабелів кабельної лінії. Ці втрати будуть значно меншими, ніж за наявності лише мідного ЕМЕ. Недоліком конструкції кабелю з шаром із сталевий магнітної стрічки є наступне. У шарі сталевий магнітної стрічки виникає суттєвий додатковий магнітний потік від струму власної струмопровідної жили за умови того, що магнітна проникність сталевий магнітної стрічки багато разів більше, ніж у немагнітних матеріалів і середовищ, які оточують струмопровідну жилу. Як наслідок, для такої конструкції кабелю і кабельної лінії в цілому суттєво зростає індуктивний опір і зменшується пропускна спроможність кабельної лінії по повному струму. Розрахунки свідчать, що в залежності від товщини сталевий магнітного шару індуктивний опір може зрости у кілька разів у порівнянні з кабелем без шару сталевий магнітних стрічок. Тобто, покращуючи один показник в такій конструкції кабелю, суттєво погіршується інший важливий показник.

Відома конструкція силового електричного одножильного кабелю, що має, як мінімум, мідну або алюмінієву струмопровідну жилу, основну електричну ізоляцію, напівпровідні електричні екрани, які

розташовані на поверхнях струмопровідної жили і основної електричної ізоляції, мідний ЕМЕ, захисну ізоляційну оболонку і шар немагнітної сталі, який розташований на поверхні захисної ізоляційної оболонки у вигляді спірально намотаної стрічки. Така конструкція кабелю не збільшує магнітний потік розсіяння кабельної лінії і водночас деякою мірою екранує зовнішній магнітний потік, тобто зменшує теплові втрати в мідному ЕМЕ.

Дана конструкція силового електричного одножильного кабелю представлена в [3] і є найбільш близьким аналогом.

Недоліком найближчого аналога є наступне.

Шар з немагнітної сталевих стрічки у порівнянні зі сталевим магнітним стрічкою має значно нижчу ефективність екранування зовнішнього магнітного поля. Так наприклад, експериментально було визначено, що шар зі сталевих немагнітних стрічок завтовшки 0,25 мм та діаметром 21 мм ослабляє зовнішнє магнітне поле усередині цього шару лише на 5 %. В результаті, на ЕМЕ в кабельній лінії діє практично такий же зовнішній магнітний потік, як і без шару сталевих немагнітних стрічок. Теплові втрати в ЕМЕ зменшуються трохи у цьому разі. Також треба врахувати наступне. При товщині сталевих шару 0,5 мм і більше омичний опір цього шару може бути не дуже меншим, ніж еквівалентний омичний опір мідного ЕМЕ. Як наслідок, сумарні теплові втрати в такому комбінованому сталевому-мідному екрані можуть навіть декілька перевищити втрати у порівнянні з тільки мідним ЕМЕ. Таким чином, ця конструкція кабелю не дає суттєвих переваг у зменшенні теплових втрат і може ефективно використовуватися лише у випадках підвищених механічних навантажень при експлуатації кабельної лінії.

Задачею корисної моделі є суттєве зниження сумарних теплових втрат у кабельній лінії при лише незначному підвищенні індуктивного опору кабельної лінії.

Поставлена задача вирішується тим, що силовий електричний одножильний кабель містить, як мінімум, мідну або алюмінієву струмопровідну жилу, основну електричну ізоляцію струмопровідної жили, два напівпровідні електричні екрани, які розташовані на поверхнях струмопровідної жили і основної електричної ізоляції струмопровідної жили, мідний електромагнітний екран і ізоляційну зовнішню оболонку кабелю, згідно з корисною моделлю, кабель містить поверх електромагнітного екрана два концентричних шари сталевих магнітних стрічок, які розташовані уздовж осі кабелю таким чином, що відстань стрічок одна від одної у шарі є не меншою, ніж половина ширини стрічки, при цьому верхній шар сталевих магнітних стрічок розташований таким чином, що центральна вісь кожної стрічки у верхньому шарі збігається з центром немагнітного проміжку між сталевими магнітними стрічками нижнього шару і ці два шари сталевих магнітних стрічок ізолювані один від одного, а також ізолювані від мідного електромагнітного екрана.

Суть корисної моделі пояснюється наступними кресленнями:

на Фіг. 1 показана конструкція силового електричного одножильного кабелю;

на Фіг. 2 показано екранування в окремому кабелі кабельної лінії зовнішнього магнітного потоку;

на Фіг. 3 показаний додатковий магнітний потік $\Phi_{\text{доп}}$ окремого кабелю;

на Фіг. 4 показаний розрахунковий елемент для визначення величини додаткового магнітного потоку $\Phi_{\text{доп}}$;

на Фіг. 5 показані конструктивна і електрична принципова схеми стенду для експериментального дослідження екранування зовнішнього перпендикулярного магнітного потоку циліндричними моделями електромагнітних екранів.

На Фіг. 1 представлена конструкція силового електричного одножильного кабелю. Такий кабель містить, як мінімум, мідну або алюмінієву струмопровідну жилу 1, основну електричну ізоляцію 2 струмопровідної жили, два напівпровідні екрани 3 і 4, які розташовані відповідно на поверхнях струмопровідної жили 1 і основної електричної ізоляції 2 струмопровідної жили, мідний електромагнітний екран 5, два концентричних шари сталевих магнітних стрічок 7 і 9, які розташовані уздовж осі кабелю, ізоляційних плівок 6 і 8, які відокремлюють шари сталевих магнітних стрічок 7 і 9 один від одного, а також відокремлюють ці шари від мідного електромагнітного екрану 5, та зовнішню ізоляційну оболонку 10.

На Фіг. 2 показана дія двох шарів сталевих магнітних стрічок щодо екранування зовнішнього магнітного потоку $\Phi_{\text{внеш}}$, який створюється струмами в струмопровідних жилах сусідніх фаз кабельної лінії. Внаслідок такого екранування з мідним ЕМЕ взаємодіє лише частина зовнішнього магнітного потоку $\Phi_{\text{внут}}$.

На Фіг. 3 показаний додатковий магнітний потік $\Phi_{\text{доп}}$ в двох шарах сталевих магнітних стрічок 7 і 9, який утворює струм у власній струмопровідній жилі 1.

На Фіг. 4 представлений розрахунковий елемент для визначення величини додаткового магнітного потоку $\Phi_{\text{доп}}$. Довжина немагнітного проміжку Δ утворюється за рахунок знаходження ізоляційної плівки 8 між шарами 7 і 9 сталевих магнітних стрічок.

На Фіг. 5 представлені конструктивна і електрична принципова схеми стенда для експериментального дослідження екранування зовнішнього перпендикулярного магнітного потоку циліндричними моделями ЕМЕ. Цей стенд включає електричну котушку 11, вимірювальну котушку 12,

циліндричну модель ЕМЕ 13 і шихтований магнітопровід 14. Зокрема представлена модель суцільного сталевих магнітного циліндричного екрана товщиною $h=0,5$ мм з подовжнім розрізом, ширина якого дорівнює $\delta=2$ мм. На цій моделі експериментально досліджувався вплив довжини немагнітного проміжку Δ в двох шарах 7 і 9 сталевих магнітних стрічок на їх екрануючу здатність.

Силовий електричний одножильний кабель працює наступним чином.

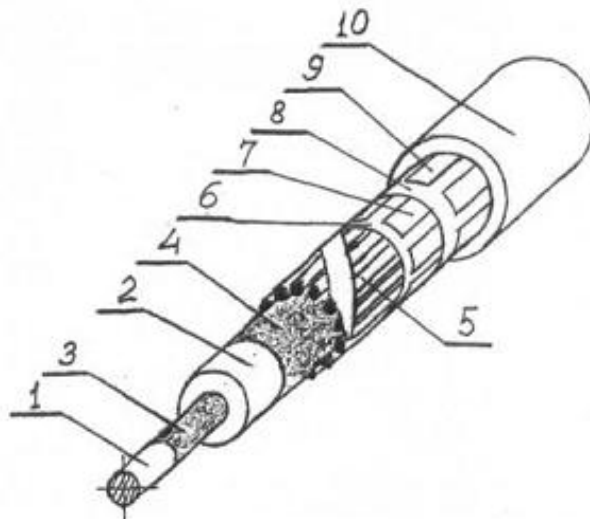
При протіканні струму по струмопровідній жилі 1 виникає власне електромагнітне поле. Електромагнітна хвиля цього поля для мідного ЕМЕ 5 і для двох концентричних шарів 7 і 9 сталевих магнітних стрічок є плоскою електромагнітною хвилею, внаслідок чого магнітна складова електромагнітної хвилі проходить скрізь мідний ЕМЕ і обидва шари сталевих магнітних стрічок практично без втрат. Електричну складову електромагнітної хвилі мідний ЕМЕ практично повністю затримує, внаслідок чого електричне поле поза мідним ЕМЕ практично відсутнє. Залишаючись в об'ємі мідного ЕМЕ електрична складова електромагнітної хвилі наводить по довжині цього екрана певну величину е.р.с. Якщо електромагнітні екрани кабелів замкнені між собою або заземлені з обох кінців кабельної лінії, то в цих екранах протікають "подовжні" струми. В подальшому втрати в ЕМЕ від "подовжніх" струмів розглядатися не будуть, тому що при прокладанні кабельних ліній приймаються заходи щодо усунення "подовжніх" струмів. Зокрема, такими заходами є повний цикл транспозиції електромагнітних екранів в трифазній кабельній лінії або однобічне їх заземлення. Також ми не будемо розглядати втрати в ЕМЕ від магнітної складової власного електромагнітного поля, оскільки величина цих втрат дуже мала. Проходячи практично без втрат скрізь власний ЕМЕ 5 і два шари 7 і 9 сталевих магнітних стрічок магнітна складова електромагнітної хвилі зустрічає на своєму шляху ЕМЕ і два шари сталевих магнітних стрічок кабелю сусідньої фази кабельної лінії. У цьому випадку хвиля магнітного поля вже не є плоскою хвилею і у відповідності з законом електромагнітної індукції приводить до виникнення вихрових струмів, як у мідному ЕМЕ, так і в сталевих магнітних стрічках. Ці вихрові струми необхідно враховувати при проектуванні кабельної лінії, оскільки їх величина може досягати таких значень, що стає небезпечною з точки зору перегріву кабельної лінії. Ці вихрові струми не знищуються ні засобом з'єднання кабелів і ЕМЕ ні засобом заземлення ЕМЕ. Відповідно, теплові втрати в кабельній лінії можуть суттєво понизити пропускну спроможність кабельної лінії по струму. Розташування двох шарів 7 і 9 сталевих магнітних стрічок поверх ЕМЕ 5 приводить до суттєвого екранування зовнішнього магнітного потоку $\Phi_{\text{внеш}}$ (Фіг. 2). З мідним ЕМЕ взаємодіє тільки внутрішній магнітний потік $\Phi_{\text{внут}}$, через що втрати від вихрових струмів в мідному ЕМЕ 5 суттєво зменшуються. Таким чином в конструкції кабелю, що містить комбінований сталевий-мідний електромагнітний екран, не глядячи на додаткові втрати в сталевих стрічках, сумарні теплові втрати в цілому в кабельній лінії можуть бути суттєво меншими у порівнянні з кабельними лініями, які містять тільки мідні електромагнітні екрани. Також необхідно враховувати, що використання сталевих магнітних стрічок у конструкції кабелю збільшує магнітний потік розсіювання кабелю на величину $\Phi_{\text{доп}}$ (Фіг. 3). Відповідно збільшується величина індуктивного опору кабельної лінії, що є явищем небажаним. Розташування сталевих магнітних стрічок в двох шарах 7 і 9 з розділенням цих шарів за допомогою ізоляційної плівки 8 дозволяє отримати для додаткового магнітного потоку $\Phi_{\text{доп}}$ немагнітні проміжки довжиною Δ , і тим самим, якщо регулювати довжину Δ , можна отримати економічно вигідне співвідношення між збільшенням пропускну спроможності кабельної лінії по струму і деяким збільшенням індуктивного опору кабельної лінії.

Як приклад орієнтовно розрахуємо пропускну спроможність по струму і індуктивний опір трифазної кабельної лінії, яка виконана з трьох одножильних кабелів типу АПвЭгаП 20 kV 1×1000/95 зі штатним мідним ЕМЕ і кабельної лінії, яка виконана з тих же кабелів, але поверх штатного мідного ЕМЕ передбачається наявність двох шарів сталевих магнітних стрічок, тобто передбачається наявність комбінованого сталевий-мідного електромагнітного екрану, конструкція якого пропонується. Кабельна лінія розташована в ґрунті з питомим тепловим опором $\sigma=1$ К*м/Вт на глибині 1,5 м. Три кабелі в кабельній лінії розташовані "трикутником", тобто кабелі стикаються зовнішніми оболонками, а відстані між центрами кабелів утворюють рівносторонній трикутник. Приймемо для розрахунків, що величина активного струму в струмопровідній жилі дорівнює 1200 А. При цьому втрати в струмопровідній жилі кабелю на один метр його довжини дорівнюють 39.2 Вт/м. Втрати від зовнішнього магнітного потоку $\Phi_{\text{внеш}}$ у мідному ЕМЕ розраховуються на підставі методики, яка запропонована в [5]. У даному випадку втрати у штатному мідному ЕМЕ від вихрових струмів на один метр довжини приблизно дорівнюють 20 Вт/м. Таким чином, в трифазній кабельній лінії розглянутої топології, яка побудована на промислових кабелях вище означеного типу сумарні теплові втрати будуть приблизно дорівнювати 60 Вт/м для кожного кабелю кабельної лінії. Індуктивність одного метра кожного кабелю буде дорівнювати $2,2 \cdot 10^{-7}$ Гн/м. Орієнтовно розрахуємо, як зміняться величини теплових втрат і індуктивності кабелю при тій же величині активного струму за наявності в конструкції кабелю двох шарів сталевих магнітних стрічок з немагнітним проміжком між шарами $\Delta=0,4$ мм (Фіг. 4). Кожен шар налічує 12 сталевих магнітних стрічок товщиною 0,5 мм і шириною 11 мм. Міра екранування зовнішнього магнітного потоку $\Phi_{\text{внеш}}$ двома шарами сталевих магнітних стрічок приблизно оцінимо на основі експериментального дослідження міри екранування перпендикулярного зовнішнього магнітного

потоку моделлю циліндричного сталевго магнітного екрана товщиною 0,5 мм з подовжнім розрізом шириною 2 мм (Фіг. 5). Напруженість магнітного поля у зоні розташування моделі приблизно дорівнює напруженості зовнішнього магнітного поля у зоні мідних ЕМЕ кабелів кабельної лінії, яка розглядається. Максимальний ступінь екранування зовнішнього магнітного потоку усередині моделі екрана склав 17,6 разів при куті $\gamma=0^\circ$, а мінімальний ступінь екранування склав 7,6 разів при куті $\gamma=90^\circ$. При довжині немагнітного проміжку більш ніж 2 мм магнітний ланцюг є ненасиченим. У цьому випадку при рівномірному розподілі по колу немагнітних проміжків Δ і при збільшенні їх сумарної довжини розрахунок магнітного потоку $\Phi_{\text{доп}}$ (Фіг. 3) буде утворюватися пропорційно даним, що отримані в вище означених експериментальних дослідженнях. Таким чином можна очікувати, що конструкція комбінованого сталєво-мідного електромагнітного екрана, що пропонується, дозволяє зменшити величину зовнішнього магнітного потоку від сусідніх фаз кабельної лінії не менш ніж у 7 разів. У цьому випадку теплові втрати у мідній частині комбінованого сталєво-мідного ЕМЕ визначаються лише магнітним потоком $\Phi_{\text{внут}}$ (Фіг. 2) і складають приблизно 2,6 Вт/м. На сталеву частину комбінованого сталєво-мідного ЕМЕ діє повний зовнішній магнітний потік $\Phi_{\text{внеш}}$. Еквівалентний омичний опір двох шарів сталевих магнітних стрічок приблизно у 7 разів менш, ніж еквівалентний омичний опір мідного ЕМЕ. Відповідно, втрати в сталевій частині комбінованого ЕМЕ приблизно будуть дорівнювати 3 Вт/м. Таким чином, сумарні теплові втрати у кабелі, який має додаткові два шари сталевих магнітних стрічок у розглянутому прикладі приблизно дорівнюють 44,8 Вт/м у кожному кабелі кабельної лінії. Додатковий магнітний потік $\Phi_{\text{доп}}$ збільшує індуктивність кабелю на $0,7 \cdot 10^{-7}$ Гн/м. Розрахував теплові опори основної електричної поліетиленової ізоляції струмопровідної жили, зовнішньої ПВХ оболонки кабелю і еквівалентний тепловий опір для кабельної лінії, яка прокладена "трикутником", можливо приблизно розрахувати ефект зростання пропускної спроможності кабельної лінії по активному струму [6]. Для кабельної лінії, яка прокладена "трикутником" на глибині 1,5 м в ґрунті з питомим тепловим опором $\sigma=1$ К*м/Вт за умови, що максимальна температура струмопровідної жили не перевищує 90° С, допустима сила струму для промислового зразка зазначеного типу кабелю приблизно дорівнює 950 А. Відповідно, для запропонованої конструкції силового електричного одножильного кабелю, який має додаткові два шари сталевих магнітних стрічок, а усі інші конструктивні параметри такі ж самі, як у прийнятого для розрахунків промислового зразка кабелю, допустима сила струму приблизно дорівнює 1200 А. Представлені переваги дозволяють в цілому зробити висновок про позитивний ефект конструкції та принципу дії силового електричного одножильного кабелю, що пропонується.

Джерела інформації:

1. Э.Т. Ларина Силовые кабели и кабельные линии. -М.: Энергоатомиздат, 1984.
2. Основы кабельной техники. Под ред. В.А. Привезенцева. Изд. 2-е. -М.: "Энергия", 1975, - 472.
3. Н.И. Белоруссов Электрические кабели и провода. -М.: "Энергия", 1971, - 512 с.
4. Силовые кабели. Методика расчета устройств заземления экранов, защиты от перенапряжений изоляции силовых кабелей на напряжение 110-500 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена. Стандарт организации "ФСК ЕЭС".
- СТО 56947007-29.060.20.103-2011. М., 2011, - 32 с.
5. Я. Туровский Техническая электродинамика. -М.: "Энергия", 1974, - 488 с.
6. М.Н. Бронгулеева и С.С. Городецкий Кабельные линии высокого напряжения. М.-Л., ГЭИ, 1963.



Фіг. 1

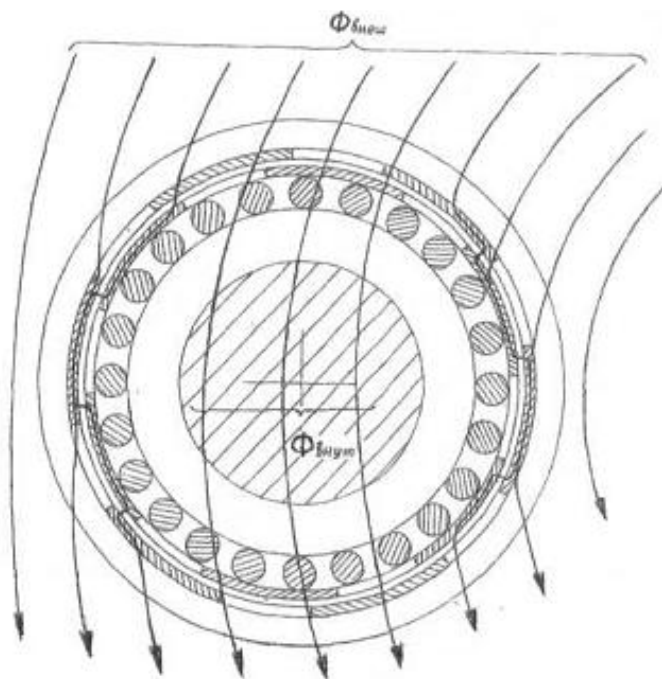


Fig. 2

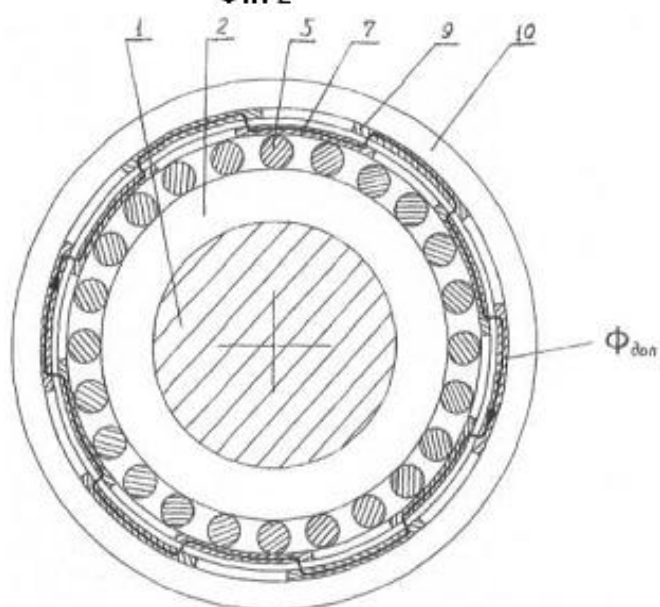


Fig. 3

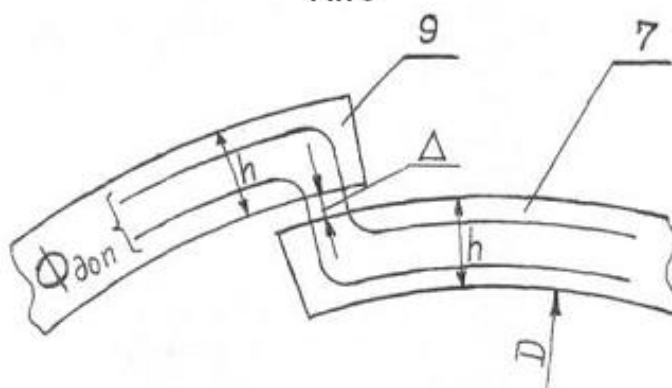


Fig. 4

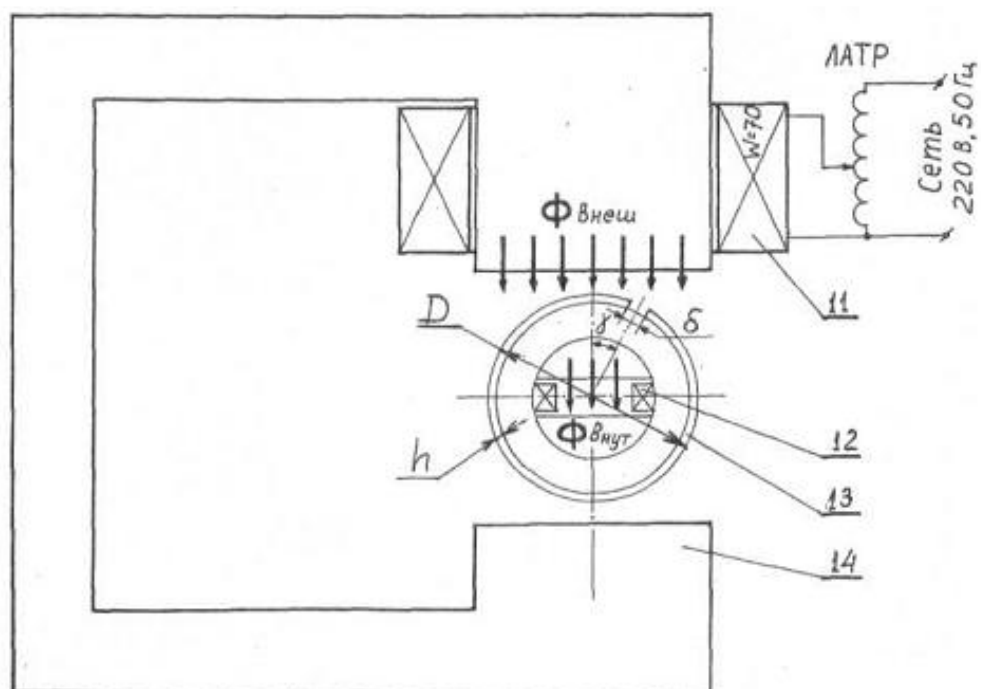


Fig. 5