



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **148322** (13) **U**
(51) МПК (2021.01)
H01B 9/00
H02G 9/00

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО
"УКРАЇНСЬКИЙ ІНСТИТУТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2020 06702	(72) Винахідник(и): Ломов Сергій Георгійович (UA)
(22) Дата подання заявки: 19.10.2020	
(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: 29.07.2021	(73) Володілець (володільці): НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ", вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002 (UA)
(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: 28.07.2021, Бюл.№ 30	

(54) ТРИФАЗНА СИЛОВА КАБЕЛЬНА ЛІНІЯ З ЗОВНІШНІМ ПРИМУСОВИМ ОХОЛОДЖЕННЯМ

(57) Реферат:

Трифазна силова кабельна лінія з зовнішнім примусовим охолодженням містить три однакові одножильні кабелі, осі яких знаходяться у вершинах рівностороннього трикутника, у площині перпендикулярного перерізу кабельної лінії, кожен з яких має щонайменше мідну або алюмінієву струмопровідну жилу, основну електричну ізоляцію струмопровідної жили, два напівпровідні екрани, розташовані на поверхнях струмопровідної жили і основної електричної ізоляції струмопровідної жили, мідний електромагнітний екран, ізоляційну зовнішню оболонку і розташований у одній, з трьох однакових за розмірами, частині корпусу кабельної лінії. У кожній частині корпусу кабельної лінії, окрім одножильного кабелю, розташовані по дві пластмасові охолоджуючі труби однакового фасонного перерізу, в яких у протилежних напрямках протікає охолоджуюча вода. Кабельна лінія має дві труби, розташовані поруч з корпусом кабельної лінії, які з'єднані за допомогою патрубків на кінцях будівельної ділянки кабельної лінії з пластмасовими охолоджуючими трубами фасонного перерізу. Корпус кабельної лінії містить три радіально розташовані сталеві магнітні листи і зовнішню оболонку, яка виконана із немагнітного непровідного вологостійкого стрічкового матеріалу.

UA 148322 U

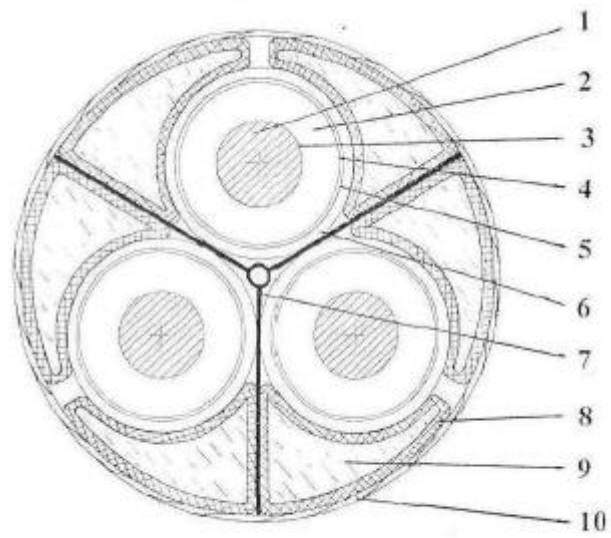


Fig. 1

Корисна модель належить до технічних засобів транспортування і розподілу електричної енергії і може бути використана при проектуванні і прокладанні кабельних мереж великої і надвеликої потужностей.

Відомі трифазні кабельні лінії (КЛ) великої потужності, виконані з трьох одножильних кабелів високої і надвисокої напруги. Кожен з цих трьох кабелів містить, як мінімум, мідну або алюмінієву струмопровідну жилу, основну електричну ізоляцію струмопровідної жили, напівпровідні екрани на поверхнях струмопровідної жили і основної електричної ізоляції струмопровідної жили, мідний електромагнітний екран (ЕМЕ) і ізоляційну зовнішню оболонку кабелю.

Відомо розташування окремих трьох кабелів у трифазній КЛ "трикутником" [3]. При такій конструкції кабелі прилягають один до одного своїми оболонками, а відстань між центрами струмопровідних жил утворює рівносторонній трикутник у площині перпендикулярного перерізу КЛ. Основною перевагою такої КЛ є її електрична симетрія. Подана на початок такої КЛ симетрична трифазна система струмів і напруги залишається такою ж симетричною і в її кінці. Основним недоліком конструкції КЛ, розташованої "трикутником" є наступне. Ефективний тепловий опір ґрунту, який використовується для теплових розрахунків КЛ, має максимальне значення із-за мінімального значення площі поверхні КЛ, що віддає тепло у ґрунт. Як наслідок, із-за збільшеного теплового опору зменшується пропускна спроможність КЛ по струму. Є і другий недолік КЛ, розташованої "трикутником". У такій КЛ електромагнітні екрани кожного кабелю знаходяться максимально близько до струмопровідних жил сусідніх кабелів. У [4] показано, що у суцільних електромагнітних екранах кожного кабелю трифазної КЛ під дією зовнішніх магнітних полів сусідніх кабелів цієї КЛ наводяться вихрові струми, які не залежать не від засобів з'єднання ЕМЕ і не від засобів їх заземлення. Втрати від вихрових струмів у ЕМЕ викликають додатковий нагрів кабелів і, як наслідок, додаткове зменшення пропускної спроможності по струму КЛ у цілому.

Відома конструкція КЛ, яка представлена в [1].

Трифазна силова КЛ містить три однакові одножильні кабелі, осі яких знаходяться у вершинах рівностороннього трикутника, у площині перпендикулярного перерізу КЛ, кожен з яких має, як мінімум, мідну або алюмінієву струмопровідну жилу, основну електричну ізоляцію струмопровідної жили, два напівпровідні екрани, розташовані на поверхнях струмопровідної жили і основної електричної ізоляції струмопровідної жили, мідний електромагнітний екран і ізоляційну зовнішню оболонку. При цьому усі три кабелі розташовані усередині корпусу, який виконаний зі сталевих магнітних листів таким чином, що кожен з кабелів розташований усередині частини корпусу, кожна з яких має однакові розміри для кожного з трьох кабелів. При цьому корпус має на зовнішній оболонці у тангенційному напрямку у площині перпендикулярного перерізу корпусу і уздовж осі кабелю по усій довжині кабелю три немагнітні проміжки, які мають однакові розміри і однакову відстань один від одного. У конструкції КЛ, яка представлена в [1], наявність корпусу КЛ, який виконаний зі сталевих магнітних листів, суттєво екранує зовнішній магнітний потік від поруч розташованих кабелів КЛ. При цьому зменшуються "подовжні" струми в електромагнітних екранах кабелів і як наслідок в цілому зменшуються сумарні теплові витрати у КЛ. Таким чином, у трифазній силовій кабельній лінії, конструкція якої представлена в [1], збільшується пропускна спроможність по струму, що є позитивним ефектом.

Конструкція і принцип дії трифазної силової КЛ, які представлені в [1], є найбільш близькими технічними рішеннями при будівництві трифазної силової КЛ з підвищеною пропускною спроможністю по струму.

Конструкція трифазної силової кабельної лінії, яка представлена в [1], прийнята за найближчий аналог при розробці трифазної силової кабельної лінії з зовнішнім примусовим охолодженням, яка пропонується.

Недоліком найближчого аналога є наступне.

Струмопровідні жили найближчого аналога КЛ нагріваються за рахунок робочого струму в цих жилах, а мідні електромагнітні екрани кожного кабелю КЛ можуть нагріватися або під дією "подовжніх" струмів в мідно-дротових електромагнітних екранах при їх двосторонньому заземленні або за рахунок вихрових струмів в щільних електромагнітних екранах при будь-якому засобі їх з'єднання та заземлення. Трифазна силова кабельна лінія, конструкція якої представлена в [1], охолоджується природним засобом. Тепловий потік, який обумовлений нагрівом струмопровідних жил і екранів КЛ, йде, долаючи теплові опори основної електричної ізоляції кабелів КЛ, їх зовнішніх оболонок та тепловий опір оточуючого ґрунту до тієї точки, температура в якій прийнята як розрахункова температура оточуючого середовища. Сумарний тепловий опір електричної ізоляції і оточуючого ґрунту для потужних КЛ високої і надвисокої напруги має досить суттєву величину. Внаслідок цього, для усіх КЛ, які розташовані у ґрунті і

охладжуються природним способом пропускна спроможність по струму має досить невелику величину. Навіть для мідних струмопровідних жил КЛ високої напруги запропонована заводами виробниками щільність струму не перевищує 1 А/мм^2 . Це є принциповим недоліком таких КЛ і потребує збільшення допустимої щільності струму у струмопровідних жилах.

Поставлена задача вирішується тим, що трифазна силова кабельна лінія з зовнішнім примусовим охолодженням, що містить три однакові одножильні кабелі, осі яких знаходяться у вершинах рівностороннього трикутника, у площині перпендикулярного перерізу кабельної лінії, кожен з яких має, як мінімум, мідну або алюмінієву струмопровідну жилу, основну електричну ізоляцію струмопровідної жили, два напівпровідні екрани, розташовані на поверхнях струмопровідної жили і основної електричної ізоляції, мідний електромагнітний екран, ізоляційну зовнішню оболонку і розташований у одній, з трьох однакових за розмірами, частині корпусу кабельної лінії. У кожній частині корпусу, окрім одножильного кабелю, розташовані по дві пластмасові охолоджуючі труби однакового фасонного перерізу, в яких у протилежних напрямках протікає охолоджуюча вода. Корпус кабельної лінії містить три радіально розташовані сталеві магнітні листи і зовнішню оболонку, яка фіксує усі шість пластмасових охолоджуючих труб у положенні найкращого поверхневого контакту із ізоляційною зовнішньою оболонкою кабелю та сталевими магнітними листами корпусу кабельної лінії і виконана із будь-якого немагнітного вологостійкого стрічкового матеріалу. При цьому кабельна лінія має дві труби, які розташовані поряд з корпусом кабельної лінії і з'єднані за допомогою патрубків на кінцях будівельної ділянки кабельної лінії з пластмасовими охолоджуючими трубами фасонного перерізу.

Суть корисної моделі пояснюється наступними кресленнями:

- на фіг. 1 показана конструкція частини трифазної силової кабельної лінії з зовнішнім примусовим охолодженням, яка знаходиться в корпусі кабельної лінії;

- на фіг. 2 показана повна конструкція трифазної силової кабельної лінії з зовнішнім примусовим охолодженням.

На фіг. 1 представлена частина конструкції трифазної силової КЛ з зовнішнім примусовим охолодженням. Така частина КЛ містить три однакові одножильні кабелі, кожен з яких має, як мінімум, мідну або алюмінієву струмопровідну жилу 1, основну електричну ізоляцію 2 струмопровідної жили, два напівпровідні екрани 3 і 4, які розташовані відповідно на поверхні струмопровідної жили 1 і на зовнішній поверхні основної електричної ізоляції 2, мідний електромагнітний екран 5 і ізоляційну зовнішню оболонку 6. Усі три кабелі цієї частини КЛ розташовані усередині корпусу КЛ таким чином, що осі одножильних кабелів знаходяться у вершинах рівностороннього трикутника, у площині перпендикулярного перерізу КЛ. При цьому у кожній частині корпусу КЛ, окрім одножильного кабелю, розташовані по дві пластмасові охолоджуючі труби 8 однакового фасонного перерізу, в яких у протилежних напрямках протікає охолоджуюча вода 9, а корпус кабельної лінії містить три радіально розташовані сталеві магнітні листи 7 і зовнішню оболонку 10, яка фіксує усі шість пластмасових охолоджуючих труб 8 у притиснутому стані у положенні найкращого поверхневого контакту з зовнішньою оболонкою 6 кабелю КЛ і сталевими магнітними листами 7. Окрім цього, корпус кабельної лінії містить зовнішню оболонку 10, яка виконана із будь-якого немагнітного вологостійкого стрічкового матеріалу.

На фіг. 2 представлена повна конструкція трифазної силової КЛ з зовнішнім примусовим охолодженням. Така повна конструкція містить частину трифазної силової кабельної лінії з зовнішнім примусовим охолодженням, яка представлена на фіг. 1 і, окрім цього, містить напірну водопровідну трубу 11 та безнапірну водопровідну трубу 14, які розташовані поряд з корпусом КЛ і з'єднані з пластмасовими охолоджуючими трубами 8 за допомогою патрубків 12 і 15 з одного кінця і за допомогою патрубків 13 і 16 з другого кінця будівельної ділянки КЛ.

Трифазна силова кабельна лінія з зовнішнім примусовим охолодженням працює наступним чином.

При протіканні робочого струму по струмопровідній жилі 1 у відповідності до закону Джоуля-Ленца ця жила нагрівається. В кабелях високої і надвисокої напруги за рахунок струму наскрізної провідності і поляризації матеріалу нагрівається основна електрична ізоляція 2. При двосторонньому заземленні в КЛ електромагнітних екранів 5 мідно-дротової конструкції вони нагріваються так званими "подовжніми" струмами, які протікають в екранах 5. Якщо електромагнітні екрани 5 мають щільну конструкцію, то за рахунок вихрових струмів такі екрани також нагріваються, незалежно від засобу їх з'єднання та заземлення в КЛ. Нагрів напівпровідних екранів 3 і 4 дуже малий і в теплових розрахунках КЛ ним завжди нехтують.

В кабельній лінії природного охолодження, яка прийнята за найближчий аналог, сумарний тепловий потік від нагрітих струмопровідних жил 1, основної електричної ізоляції 2 і

електромагнітних екранів 5 долаючи теплові опори основної електричної ізоляції 2, зовнішніх захисних оболонок 6 кабелів КЛ і оточуючого КЛ ґрунту переходить в навколишнє середовище, тобто переходить в ізотермічне середовище, температура якого в теплових розрахунках КЛ прийнята незмінною й носить назву температури оточуючого середовища. Це є теоретичною основою розрахунку КЛ, які прокладені у ґрунті, працюють у сталому режимі навантаження і охолоджуються природним засобом.

В конструкції трифазної силової кабельної лінії з зовнішнім примусовим охолодженням, що пропонується, вода з напірної труби 11 через патрубок 12 за допомогою водорозподільного колектора (на кресленні не показаний) підводиться в три через одну розташовані охолоджуючі пластмасові труби 8 фасонного перерізу з одного кінця будівельної ділянки КЛ. Через патрубок 13 вода з напірної труби 11 за допомогою водорозподільного колектора підводиться до трьох інших охолоджуючих труб 8 на протилежному кінці будівельної ділянки КЛ. При цьому вода у двох охолоджуючих трубах 8, прилеглих до поверхні зовнішньої захисної оболонки 6 одного кабелю КЛ, протікає у протилежних напрямках. Вода в охолоджуючих трубах 8 при протіканні уздовж кабелю КЛ нагрівається за рахунок передачі їй тепла від нагрітої поверхні кабелю. При протіканні води у протилежних напрямках температура нагріву поверхні кабелю буде однаковою будь-де уздовж будівельної ділянки КЛ. Пройшовши через охолоджуючі труби 8 нагріта вода зливається в безнапірну трубу 14 через патрубки 15 і 16 відповідно на початку і в кінці будівельної ділянки КЛ. Фасонний переріз охолоджуючих труб 8 вибирається за умови забезпечення максимальної площі теплового контакту із зовнішньою поверхнею кабелю і сталевих магнітних листів 7 корпусу кабельної лінії. Зовнішня оболонка 10 притискає поверхні охолоджуючих труб 8 до зовнішньої поверхні кабелю і до поверхонь сталевих магнітних листів 7, забезпечуючи тим самим мінімально можливу величину теплового опору для теплового потоку, що відводиться в охолоджуючу воду 9. До зовнішньої оболонки 10 є тільки одна обов'язкова умова - вона повинна бути немагнітною і неструмопровідною. Може бути запропонована технологія накладення стрічок тканинної структури, які мають здатність до утяжки з подальшим просоченням, що робить зовнішню оболонку 10 водостійкою і водночас водозахисною. Така технологія, окрім притиснення охолоджуючих труб 8 до поверхні кабелю, додатково забезпечує захист сталевих листів 7 від вологи у ґрунті. Сталевий корпус КЛ являє собою три сталеві магнітні листи 7, які попередньо зварені в конструкцію під кутом 120° в радіальному напрямку, і довжиною, яка технологічно є зручною під час монтажу КЛ. Під час попереднього виготовлення корпусу КЛ може бути передбачена конструкція, коли сталеві магнітні листи 7 зварені зі сталеву трубою невеликого діаметра для додаткового прокладання в КЛ оптоволоконного кабелю (дивись фіг. 1). Установка одножильних кабелів і охолоджуючих труб 8 в корпус КЛ, а також накладання зовнішньої оболонки 10 відбувається безпосередньо на місці будівництва кабельної лінії.

Таким чином, фізичний ефект зменшення сумарного теплового опору для трифазної силової кабельної лінії з зовнішнім примусовим охолодженням і тим самим збільшення пропускної спроможності по струму цієї кабельної лінії полягає у наступному.

З сумарного теплового опору кабельної лінії виключається тепловий опір ґрунту, який є найвагомим. Проте, не зважаючи на те, що з'являється додатковий тепловий опір стінки пластмасової охолоджуючої труби 8 і температура оточуючого середовища підвищується внаслідок нагріву води 9 в охолоджуючих трубах 8, сумарний тепловий опір для конструкції кабельної лінії, що пропонується, суттєво зменшується, у порівнянні з найближчим аналогом кабельної лінії.

Проілюструємо цей висновок прикладом порівняльного спрощеного розрахунку максимально допустимої величини фазного робочого струму для найближчого аналога трифазної силової кабельної лінії і для конструкції трифазної силової кабельної лінії з зовнішнім примусовим охолодженням, що пропонується. Обидві КЛ виконані з однакових одножильних кабелів марки АПвП2гж 1 × 630/120-64/110, мають будівельну довжину 600 м і прокладені у ґрунті з питомим тепловим опором $\sigma = 1,2$ К·м/Вт на глибині $h=1,2$ м

Для найближчого аналога трифазної силової КЛ, яка прокладена у ґрунті, сумарний тепловий опір ΣR_T розраховується як [3]

$$\Sigma R_T = R_{T1} + R_{T2} + R_{T\infty} \quad (1)$$

де: R_{T1} і R_{T2} - відповідно теплові опори основної електричної ізоляції і зовнішньої оболонки одножильного кабелю.

Ці теплові опори однакові для двох конструкцій КЛ, що розглядаються, і після розрахунків дорівнюють [3]

$$R_{T1} = 0,27 \text{ К·м/Вт}$$

$$R_{T2} = 0,033 \text{ К·м/Вт}$$

$R_{T\text{э}}$ - ефективний тепловий опір ґрунту для найближчого аналога трифазної силової КЛ з урахуванням взаємного підігріву сусідніми кабелями КЛ. Цей тепловий опір розраховується як

$$R_{T\text{э}} = \frac{\sigma}{3\pi} \ln \frac{2h}{R} \left(1 + \frac{\lg \sqrt{3,46 \frac{h^2}{S^2} + 4 \frac{h^2}{S^2} + 1}}{\lg \frac{2h}{R}} + \frac{\lg \sqrt{4 \frac{h_1^2}{S^2} + 1}}{\lg \frac{2h_1}{R}} \right) \text{ К·м/Вт, (2)}$$

де: h - глибина від поверхні ґрунту до осі нижнього кабелю, м;

h_1 - міжосьова відстань між кабелями по вертикальній осі, м;

S - міжосьова відстань між кабелями в КЛ, м;

R - зовнішній радіус одножильного кабелю в КЛ, м.

$$R_{T\text{э}} = 1,25 \text{ К·м/Вт}$$

Сумарний тепловий опір найближчого аналога конструкції трифазної силової КЛ.

$$\Sigma R_T = 1,55 \text{ К·м/Вт}$$

Максимально допустима величина фазного робочого струму I_m для найближчого аналога конструкції трифазної силової КЛ, яка працює в стаціонарному режимі визначається на основі теплового закону Ома [3].

$$I_m = \sqrt{\frac{t_m - t_{oc}}{R_e \cdot \Sigma R_T}}, \text{ (3)}$$

де: t_m - максимально допустима температура основної електричної ізоляції із зшитого поліетилену ($t_m = 90^\circ \text{C}$);

t_{oc} - температура оточуючого середовища (приймаємо $t_{oc} = 20^\circ \text{C}$);

R_e - електричний опір алюмінієвої струмопровідної жили при температурі жили $t_m = 90^\circ \text{C}$ з урахуванням ефекту вихрових струмів і ефекту близькості кабелів в КЛ на 1 м довжини кабелю. Таким чином, для найближчого аналога конструкції трифазної силової кабельної лінії ми маємо максимально допустиму величину фазного робочого струму

$$I_m = 867 \text{ А}$$

Для конструкції трифазної силової кабельної лінії з зовнішнім примусовим охолодженням, що пропонується, сумарний тепловий опір буде:

$$\Sigma R_T = R_{T1} + R_{T2} + R_{T3} \text{ (4)}$$

$$R_{T3} = 0,077 \text{ К·м/Вт,}$$

де: R_{T3} - тепловий опір стінки пластмасової охолоджуючої труби 8 фасонного перерізу.

Для цієї конструкції кабельної лінії можна приблизно урахувати, що температура оточуючого середовища - це середня температура води 9 на вході і на виході в охолоджуючих трубах 8. Ця температура залежить від витрати води через прохідний переріз охолоджуючих труб 8 в залежності від напору в напірній трубі 11 і довжини будівельної ділянки КЛ.

Наближений розрахунок [4] показав, що при температурі струмопровідної жили 1, яка дорівнює $t_m = 90^\circ \text{C}$, витраті води 20 літрів за хвилину скрізь одну охолоджуючу трубу 8 та довжини будівельної ділянки кабельної лінії 600 м середня температура води 9 в охолоджуючій трубі буде дорівнювати $t_{oc} = 47 \div 50^\circ \text{C}$.

Таким чином, максимально допустима величина фазного робочого струму в струмопровідній жилі 1 трифазної силової КЛ кабельної лінії з зовнішнім примусовим охолодженням, яка пропонується, буде дорівнювати при використанні (3)

$$I_m = 1373 \div 1324 \text{ A,}$$

що на 58-53 % більше, ніж в конструкції найближчого аналога трифазної силової кабельної лінії.

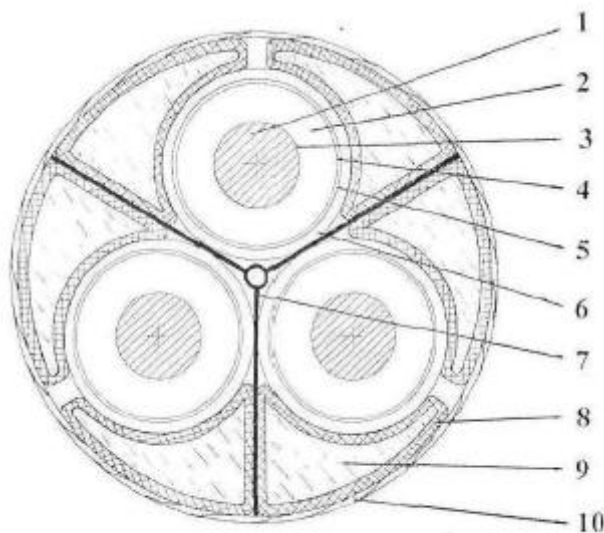
Представлені переваги дозволяють у цілому зробити висновок про позитивний ефект конструкції та принципу дії трифазної силової кабельної лінії з зовнішнім примусовим охолодженням, що пропонується.

Джерела інформації:

1. Патент України на корисну модель № 99421 Н01 9/00, опубл. 10.06.2015, Бюл. №11.
2. М.Н. Бронгулеева, С.С. Городецкий. Кабельные линии высокого напряжения.-М.: ГЭИ, 1963, 437 с.
3. Основы кабельной техники. Под ред. В.А. Привезенцева. Изд. 2-е. -М: "Энергия", 1975, 472с.
4. Я. Туровский. Техническая электродинамика. Пер. с польск. -М: "Энергия", 1974, 488с.

ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

Трифазна силова кабельна лінія з зовнішнім примусовим охолодженням, що містить три однакові одножильні кабелі, осі яких знаходяться у вершинах рівностороннього трикутника, у площині перпендикулярного перерізу кабельної лінії, кожен з яких має, як мінімум, мідну або алюмінієву струмопровідну жилу, основну електричну ізоляцію струмопровідної жили, два напівпровідні екрани, розташовані на поверхнях струмопровідної жили і основної електричної ізоляції струмопровідної жили, мідний електромагнітний екран, ізоляційну зовнішню оболонку і розташований у одній, з трьох однакових за розмірами, частині корпусу кабельної лінії, яка відрізняється тим, що у кожній частині корпусу кабельної лінії, окрім одножильного кабелю, розташовані по дві пластмасові охолоджуючі труби однакового фасонного перерізу, в яких у протилежних напрямках протікає охолоджуюча вода, і при цьому кабельна лінія має дві труби, розташовані поруч з корпусом кабельної лінії, які з'єднані за допомогою патрубків на кінцях будівельної ділянки кабельної лінії з пластмасовими охолоджуючими трубами фасонного перерізу, а корпус кабельної лінії містить три радіально розташовані сталеві магнітні листи і зовнішню оболонку, яка виконана із немагнітного непровідного вологостійкого стрічкового матеріалу.



Фіг. 1

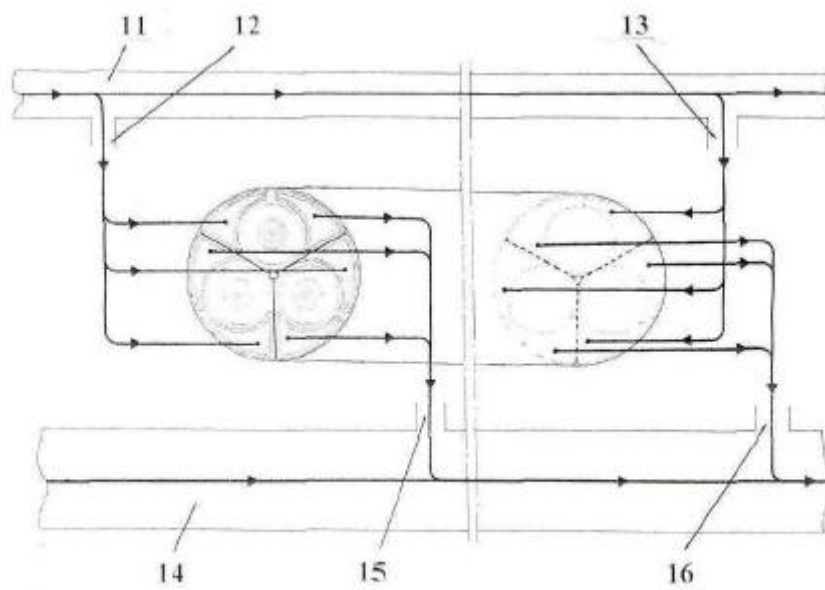


Fig. 2