

инж. Теодора Василева Христова

**ЗАЩИТА НА ПОДЗЕМНИ КОМУНИКАЦИИ ОТ КОРОЗИЯ И
КОНТРОЛ НА ЕФЕКТИВНОСТТА Й**

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертация

за присъждане на образователната и научна степен “ДОКТОР”
по научна специалност “Електрообзавеждане и електрификация”

Научни ръководители:

доц. д-р Стефан Стефанов

проф. д-р. Иван Милев

София, 2011

Защитата на дисертацията ще се състои наот.....
часа в зала на МГУ – София на заседание на Научното жури.

Материалите по защитата са на разположение на интересующите се при секретаря на съвета,
МГУ – София, КЦОК, каб. 4.

Данни за дисертационния труд:

- страници – 150;
- фигури – 54;
- таблици – 4;
- цитирани литературни източници – 160;
- публикации, свързани с темата на дисертацията – 6.

Дисертационният труд е обсъден и предложен за защита на заседание на катедрения съвет на катедра
“Електротехника”, протокол №103 от 11. 04. 2011 г.

Автор: Теодора Василева Христова

Заглавие: ЗАЩИТА НА ПОДЗЕМНИ КОМУНИКАЦИИ ОТ КОРОЗИЯ И КОНТРОЛ ВЪРХУ ЕФЕКТИВНОСТТА
НА ЗАЩИТАТА

Тираж: 20 бр.

Печат: Печатна база на МГУ – София

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

УВОД

Моделите на глобалното развитие до седемдесетте години са фокусирани главно върху производството в индустриалния сектор и пренебрегват непрекъснато увеличаващото се потребление и изчерпване на ограничените и невъзстановими природни ресурси. Като резултат от разрастването на населението непрекъснато се увеличават потреблението и производството, а и замърсяването на околната среда. Докладът "Ограниченията на растежа" на Римския клуб през 1972 година алармира, че природните ресурси на планетата ще бъдат изчерпани в обозримо бъдеще и прогнозира приближаването на края на света. Като резултат големите компании започват да разработват стратегии, в които основно място заема безопасното производство и използването на иновативни технологии при добив и транспорт на енергийни ресурси.

Корозията нанася сериозни повреди на тръбопроводите за пренос и доставка на нефт и газ. При последвали аварии изтичането на нефт или газ води до екологични проблеми, каквото е замърсяването на почвите, водите, атмосферата и последиците от това върху флората, фауната и хората. Замърсената от подобни аварии територия в България е с площ 137 хектара [1]. При изтичане на газ са възможни експлозии, които да причинят човешки жертви. Рискът е особено голям, когато тръбопроводите са в близост до жилищни сгради, или други населени територии.

При липса на защита броят на аварии нараства значително. Всяка авария се свързва със загуба на големи количества невъзобновяеми ресурси и замърсяване на околната среда, както и компенсиращи инвестиции, изразени в материален и трудов ресурс за ремонти, мониторинг, обезщетения.

Основната цел на управлението на корозията е да се удължи живота на подземните комуникации като се използват различни защитни средства. Защитата на подземните съоръжения най-често се извършва чрез изолационни покрития, използване на инхибитори и чрез електрохимична защита.

В контекста на екологичните и икономически проблеми, свързани с глобалното затопляне и повишаването на търсене на „чисти източници“ на енергия, се актуализират научните проекти, свързани с управлението на процесите на корозия. Съвременните управленски стратегии за корозията включват:

- Проучване и разработване на стандарти за изграждане и експлоатиране на подземни комуникационни съоръжения;
- Разработване на по-устойчиви материали за подземните комуникации;
- Разработване на нови, устойчиви на корозия и на други вредни въздействия антикорозионни покрития за подземните комуникации;
- Усъвършенстване на средствата за електрохимическа защита;
- Усъвършенстване на методите за измерване и контрол на параметрите на системите за защита;
- Усъвършенстване на методите за измерване и контрол на процесите на корозия;
- Разработване на нови теоретични и практически модели, свързани с усъвършенстването на антикорозионната защита;
- Разработване на нови стратегии за защита, съгласно с концепцията за устойчиво развитие;

Факторите, определящи избора на стратегия за управление на процесите на защита от корозия са: целите на компанията; пазарния ѝ дял; периода на обвързаност и дългосрочните ангажменти на компанията; интереса да инвестира в безопасно производство; пренос или дистрибуция; тенденциите в добива и проучването в обслужвания регион.

Крайните резултати доказват, че ефективното управление на процесите на корозия удължава периода на работа на съоръженията и допринася за безопасната им и безаварийна работа.

Това е безспорно доказателство за актуалността на предложения дисертационен труд.

Цел и задачи на дисертационния труд

Целта на дисертационния труд е постигане на по-висока точност при определяне на параметрите на елементите на катодна защита, автоматизиране на процеса проектиране на катодната защита и повишаване на надеждността на работа на средствата за наблюдение. За постигане на тези цели се очертават следните основни задачи:

1. Разработване на методика за аналитично предвиждане на скоростта на корозия според параметрите на изолацията и корозиралото петно.
2. Разработване на методика за определяне на разпределението на тока и потенциала в стационарно електрическо поле.
3. Разработване на система за измерване и контрол на състоянието на подземните тръбопроводни структури.
4. Създаване на софтуер за изчисляване на параметрите на катодната защита и тяхното управление в реално време с цел подобряване на технико-икономическите показатели и повишаване на ефективността на защитата

Методологична основа

За решаване на поставените задачи в дисертационния труд са използвани: теоретични изследвания, експериментални изследвания, програмен език C++.

За постигане на поставената цел е направено теоретично изследване на разпространението на ток в почвата при стационарно електрическо поле и е разработена методика за определяне на скоростта на развитие на петното в среда с наличие и липса на блуждаещ ток. Определено е разпространението на тока в почвата в зависимост от разстоянието на хранящите електроди във функция от дълбочината на проникване. Предложен е метод за определяне на степента на корозия на тръбопровод. Предложен е поевтинен метод за определяне на потенциалната разлика „съоръжение-земя“ в почви с високо специфично съпротивление. Създаден е софтуер за изчисление на елементи на катодна защита. Дадени са предложения за датчици за измерване на локална и равномерна корозия. Данните от изследванията са снети чрез предложена дистанционна система на отчитане, която може да е част от система за управление в реално време на параметрите на катодната защита.

Структура и обхват на дисертационния труд

Дисертационният труд включва увод, пет глави, заключение и насоки за бъдеща работа, списък с използвани литературни източници, приноси на дисертационния труд и списък с публикации.

Публикуване на резултатите от дисертационното изследване

Основните теоретични и експериментални резултати на дисертационния труд са изложени в 6 публикации, както следва:

1. 2 в годишник на Минно-геоложки университет.
2. 2- в годишник на ТУ-Пловдив “Fundamental Sciences and Applications”.
3. 2 - списание „Минно дело и геология”

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

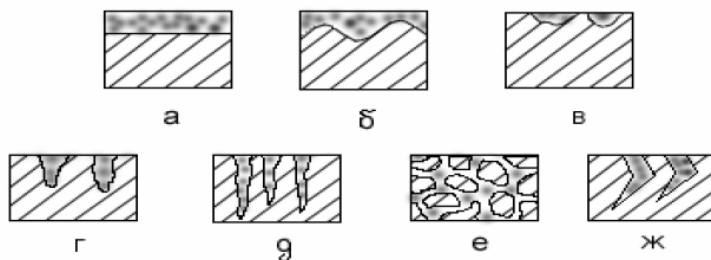
Глава 1. Същност на процеса на корозия. Видове корозия.

В глава първа са представени видовете корозия, причините за възникването ѝ и методите за борба с нея. Прави се критичен анализ на методите за определяне на скоростта на корозия и средствата за защита. Направен е преглед на средствата за контрол на процесите по защита от корозия, като се набляга на предимствата и недостатъците на съществуващите датчици и системи за измерване. На базата на анализа се правят изводи за нерешените задачи в областта на средствата за защита от корозия и контролът на процесите.

I.1. Класификация на корозионните процеси

Направена е класификация на корозионните процеси според:

- химията на протичане на процеса: химическа, електрохимическа и биокорозия;
- вида на разрушението:



Обща корозия: а- обща равномерна корозия; б- обща неравномерна корозия.

Местна корозия. Тя се подразделя на: в- петниста; г- язвена; д – точкова (питингова); е- междукристална корозия; ж – стрес корозия.

Посочени са причините за развитие на всеки тип корозия.

I.2. Методи за борба с корозията

За защита от корозия се предприемат следните мерки: поставяне на защитни покрития върху защитавания обект, контрол на влиянието на заобикалящите условия, избор на устойчиви на корозия материали, катодна защита и избор на подходящ дизайн на подземното съоръжение (подходящ начин на ориентиране на подземните съоръжения, избор на трасе през почви с подходящи физически качества, избягване на заварки, подвижни части и т.н.). Изборът на защита или комбинацията от защитни мерки зависи от условията на средата и параметрите на защитаваното съоръжение.

Защитата на подземните съоръжения се извършва чрез изолационни покрития и чрез електрохимическа защита. Съществуват различни технологии за поставяне на изолационни покрития на метални съоръжения като боядисване, лакиране, галванизация, анодна оксидация и и други.

За допълнителна защита на покритите съоръжения се използва електрохимическата защита. В този смисъл катодната защита се използва за защита от корозия като се използват метални електроди. Използват се два метода за катодна защита:

1. Метод на жертвен анод или галванична катодна защита.
2. Метод чрез пропускане на постоянен защитен ток през електрод към защитаваната конструкция.

I.3. Скорост на корозия

Определянето на скоростта на корозия става според характеристиките за корозионната агресивност на средата, инфраструктурните особености, характеристиките на материала на съоръжението и защитното покритие. За определяне на скоростта на корозия има разработени алгоритми и теоретични изследвания. Основни величини за определянето на скоростта са съпротивлението на изолацията, специфичното съпротивление на почвите, плътността на корозионния ток и потенциалите земя-тръбопровод.

Направен е преглед на теориите за развитие на корозията на едно петно. Установява се, че петното расте на диаметър при ниска скорост, а в дълбочина при ускоряване на корозията. Остава нерешен въпросът за взаимовръзката на размера на дефекта и възможната скорост на корозията при наличие и липса на блуждаещ ток в почвата.

Плътността на корозионния ток е един от основните параметри, определящ скоростта на корозия. Известно е, че плътността на тока се повишава при намаляване на дефекта в изолацията, а следователно нараства скоростта на корозия независимо от формата на дефекта. Средната плътност на корозионния ток за повечето изследвания е $i_{кор}=0.01\text{A}/\text{m}^2$.

При оценка на скоростта на корозия повечето автори се спират на няколко параметъра, като изключват останалите. Друга неточност е, че се разглежда само един тип корозия. Най-често това са питингова или стрес-корозия, като най-опасни. При различни влияещи външни фактори се развиват различни по вид и размери язви по тръбопроводите.

Може да се обобщи, че скоростта на корозия е случаен процес и той не се развива в линейна зависимост от причините. Установено е, че тя трябва да се разглежда в три етапа на развитие на корозията. Остава нерешен въпросът за взаимовръзката на размера на дефекта и възможната скорост на корозията. На настоящия етап не са известни разработени модели, осигуряващи определена степен на защита според плътността на защитния ток.

Проектирането на катодната защита е свързано с определянето на параметрите на анодните заземители въз основа на известна скорост на корозия и желаният срок на служба.

I.4. Параметри на анодните заземители

За осигуряване на ефективна защита е необходимо точно определяне на параметрите на защитаваното съоръжение и най-вече на анодните заземявания. За целта е необходимо проучване на почвения слой или слоеве и определяне на големината на тока, необходима за поддържане на защитния потенциал. От значение е местоположението на защитаваното съоръжение, прогнозният срок на служба и дълбочината на проникване на блуждаещите токове. Затова за проектирането на анодните заземявания са необходими точни изчисления на стойностите на тока и напрежението по дължината на заземяванията и техните гранични стойности. Трудност представлява изчисляването на разпределението на тока при преминаване от един слой към друг и особено когато в слоя има включения с малка площ.

В предложените методики не се определя интензитетът на стационарното електрическо поле и потенциалът в произволна точка, намираща се в проводящата среда (земята), както и разпределението на плътността на тока, като функция от дълбочината, на която се намира разглежданата точка в проводящата среда. В тях не се отчита формата на върха на анода, което също има своето значение.

Плътността на тока, преминал през анода, влияе на срока му на служба T , но в научната литература не се среща теория или алгоритъм, където този показател да е разгледан и приложен, особено при наличие на многослойна почва.

За определяне дълбочината на забиване на електродите при наличие на блуждаещи токове е важно да се проучи дълбочината, до която достигат тези токове. Това зависи от факторите на средата и на защитаващото съоръжение и обикновено е в границите от няколко сантиметра до няколко метра. Съществуват методи за изчисляване на съпротивлението на разтичане R и на взаимното влияние F на основните групови заземявания за еднослоен и многослоен почвен слой само при полагане на анода на повърхността на почвата. В практиката такива случаи почти липсват, затова е необходимо разглеждането на теоретична постановка за поставяне на анодите в дълбочина. В описаните в литературата методи за изчисление се прилагат и компютърни програми.

Необходимо е да се създаде методика за изчисляване на промяната на плътността на тока по дължина на линията на дълги тръбопроводи, в зависимост от диаметъра на анода и промяната на специфичното съпротивление на почвата в различните слоеве. Всички посочени фактори трябва да участват в алгоритъм и той да е база за разработване на софтуер за изчисляване на анодните заземители в системата на катодната защита в зависимост от тяхната подреденост, предназначение, материал, среда и прогнозиран срок на служба, както и с оглед на равномерно разпределение на тока по цялата дължина на тръбопровода. Такава методика допринася за оптимизиране на параметрите на катодните станции, както и за повишаване на тяхната ефективност.

I.5. Станции за електрохимическа защита

В практиката се използват различни електрически противокорозионни защиты: електрически дренаж, катодна защита, протекторна защита [24, 151].

При проектирането и осъществяването на катодна защита от особена важност е да се проучи трасето, където преминава защитаващия тръбопровод [62, 67]. Съгласно стандартите се определят параметрите на защитата, като се отчита наличието на блуждаещи токове, пресичане на тръбопроводи, състав и влажност на почвите, наличие и вид на изолацията и т.н. Установено е, че катодната защита трябва да се проектира според изходящата мощност и стойностите на поляризационното съпротивление или според икономическата ефективност.

Катодните станции могат да имат три канала на регулиране:

- Регулиране на изходното напрежение;
- Регулиране на изходния ток;
- Регулиране на защитното напрежение.

Тенденциите през последните години са автоматизирането на катодните станции, прилагането на дистанционно управление и поставянето на автономни източници на ток [23, 54, 143, 158, 159].

I.6. Контрол на състоянието на подземните комуникационни съоръжения

Основен възел в защитата на подземни комуникационни съоръжения са анодните заземители. Изчисляването на анодните заземители и поддържането на ефективността на катодната станция зависи пряко от входните данни за състоянието на управлявания обект, в случая на тръбопровода. Съществено значение при управление на процесите на защита е наблюдението на корозията, вида и скоростта на корозия, стойността на защитния потенциал чрез сензори.

Контролът на състоянието на подземните съоръжения става по преки или косвени методи. В случаите, когато датчиците измерват косвени величини и трябва да са свързани с обработващи устройства, измерването се осъществява заради нуждата от преместване или монтиране на контролно-измервателните пунктове. Основните методи за измерване са: резистивен, магнитоиндукционен, капацитивен, магнитоелектричен, ултразвуков и радиоактивен.

Датчиците се класифицират според функциите, които изпълняват:

- датчици за установяване на корозия [34, 48, 50, 51, 103, 111, 124];
- датчици за измерване на ефективността на прилаганата катодна защита: измерване на съпротивлението на защитавания материал, измерване на потенциалната разлика "земя-защитавано съоръжение" [85, 106];
- датчици за изследване на корозионността на почвата [123, 147];
- датчици за определяне на устойчивостта на материалите [35, 96, 97, 125, 134];
- датчици за определяне на процесите на корозия в анодите [112].

Изброените методи имат предимства и недостатъци, като те трябва да се имат предвид при избор на принцип на измерване. Резистивните са неточни, защото се влияят от промените в температурата и състава на транспортираното вещество, удобни са за поддръжка. Датчиците, работещи на този принцип, се характеризират с лесен монтаж върху съоръжението и кратък експлоатационен живот. Те не регистрират корозията, която се появява под изолационното покритие. Измерването на корозия чрез изследване на поляризационната крива е неточен метод, поради наличие по повърхността на продукти на корозията.

Датчиците, работещи на принципа на резистивните, магнитоиндуктивните методи и тези основани на промяна на магнитното поле работят определен период от време, нямат дълъг експлоатационен живот. Датчиците, работещи на принципа на измерване на магнитното поле, се прилагат основно в лабораторни условия, при което се използва липсата на разпространение на вихрови токове в порестата структура на ръждата [25, 122]. Точността на такива устройства е ниска. Предимство на метода е нечувствителността на магнитното поле към диелектричната проникваемост и електропроводимостта на корозионната среда. Електромагнитният принцип е подходящ при наличие на агресивен флуид и има дълъг експлоатационен живот [127, 137]. Капацитивните датчици са точни, но изискват тръбата да е от проводим материал.

Ултразвуковите методи са приложими в полеви и лабораторни условия. Точни са, но поставянето и обслужването им е свързано с големи разходи. Недостатък е, че прецизността на регистриране промените в долната част на тръбите и резервоарите е ниска. Използването на свръхзвукови сигнали [149] позволява да се диагностицира корозията от разстояние дори и в изградени тръбопровода. Радиоактивните методи са подходящи единствено в лабораторни условия, в полеви условия излъчвателят и приемникът трябва да са защитени.

В областта на измерванията е нужно да се следи изменението на потенциала електрод-земя. Тези стойности са необходими, за да се следи нивото на защитния потенциал при електрохимична защита на подземните съоръжения и степента на корозия на електродите и самите защитавани обекти.

Изводи към първа глава

На базата на направения критичен анализ относно методите и средствата за защита на подземните съоръжения от корозия са направени следните изводи:

1. В предлаганите методики липсва зависимост, обхващаща всички фактори на средата и скоростта на корозия. Остава нерешен въпросът за взаимовръзката на размера на дефекта и възможната скорост на корозията

2. В предложените методики не се определят интензитетът на стационарното електрическо поле и потенциалът в произволна точка, намираща се в проводящата среда (земята), както и разпределението на плътността на тока, като функция от дълбочината, на която се намира разглежданата точка в проводящата среда. В тях не се отчита формата на върха на анода, което също има своето значение.

3. Не съществуват много системи за дистанционно следене на процесите на корозия. Съществуващите такива са скъпи. Неточни са уредите за диагностициране на локалната корозия.

4. При съществуващите програми и алгоритми за изчисляване на параметрите на катодна защита не се разглежда промяната на плътността на тока при преминаване през слоеве на почвата с различно специфично съпротивление. В известните от литературата изчислителни алгоритми данните от измерващата система не се използват като входни за промяната на параметрите на катодната защита.

I. 7. Основни задачи на дисертационния труд

От направения анализ на съществуващите решения за защита на подземни съоръжения от корозия следва, че за повишаване на ефективността на защитата е необходимо създаването на катодна защита с управляеми параметри в реално време. В тази връзка основните задачи на дисертационния труд са:

1. Разработване на методика за аналитично предвиждане на скоростта на корозия според параметрите на изолацията и корозиралото петно.
2. Разработване на методика за определяне на разпределението на тока и потенциала в стационарно електрическо поле.
3. Разработване на система за измерване и контрол на състоянието на подземните тръбопроводни структури.
4. Създаване на софтуер за изчисляване на параметрите на катодната защита и тяхното управление в реално време с цел подобряване на технико-икономическите показатели и повишаване на ефективността на защитата.

Глава втора.

Метод за определяне на скоростта на корозия при липса и при наличие на блуждаещи токове

В главата са направени теоретични изводи за определяне на влиянието на размерите на дефекта в изолацията върху скоростта на корозията в подземните тръбопроводи. Предложен е метод за определяне на скоростта на корозия по изменение на електрическото съпротивление и загуба на тегло на стоманени образци - на плътен цилиндричен образец (прът) и на кух цилиндричен образец (тръба).

II. 1. Влияние на размерите на дефекта в изолацията върху скоростта на корозията в подземните тръбопроводи

В резултат на несъвършенството на изолационните покрития, дефектите в тях, могат да бъдат твърде разнообразни по форма и да са различни по размери. В литературата нерешен остава въпросът за влиянието на размера на дефекта върху скоростта на корозията. Разглеждат се два случая на корозия на образци: от блуждаещи токове и от свободна почвена корозия.

Плътността на корозионния ток е равна на

$$\delta = \frac{U_{m-3}}{R_o \cdot S_o}, \quad (\text{II.4})$$

където U_{m-3} е потенциалната разлика тръба-далечна земя, V, а R_o е съпротивлението на дефекта, S_o сечението на дефекта на изолацията, m^2 ;.

Известно е, че съпротивлението R_o е сума от съпротивлението на разтичане, поляризационното съпротивление и съпротивлението на електролита (почвата) в канала на изолацията, т.е.

$$R = R_p + R_{pol} + R_o$$

За развитието на корозия при наличие на блуждаещ ток са характерни следните два случая:

Първи случай

За опростяване на задачата се полага, че поляризационното съпротивление и съпротивлението на канала на дефекта са малки в сравнение със съпротивлението на разтичане и се пренебрегват. Изведен е изразът за определяне на плътността на тока δ :

$$\delta = \frac{U_{m-3}}{R_o \cdot S_o} = \frac{U_{m-3}}{\frac{\sqrt{\pi} \cdot \rho}{4 \cdot \sqrt{S_o}} \cdot S_o} = \frac{4 \cdot U_{m-3}}{\rho \cdot \sqrt{\pi} \cdot S_o} \quad (\text{II.8})$$

където ρ е специфичното съпротивление на почвата

Следователно, ако плътността на тока нараства с намаляване на размера на дефекта в изолацията, нараства и скоростта на корозията независимо от формата на корозионното поражение. При сферична форма на развитие на язвата началната скорост на корозията е висока, но с времето бързо намалява. Такава корозия е опасна при малка дебелина на стената на тръбата.

Втори случай

Съпротивлението на електролита (почвата) в канала на единичния дефект не се пренебрегва, поради което за плътността на тока се получава: $R_o = R_p + R_o'$.

$$\frac{U}{\frac{1}{\sigma} \sqrt{\frac{4h}{\pi D}}} = \frac{U}{\frac{1}{\sigma} \sqrt{\frac{4h}{\pi D}}} = \frac{4h}{\pi D} \quad (II.10)$$

където h е дебелината на слоя на изолацията.

От израз (II.10) може да се направи изводът, че плътността на тока нараства не само с намаляване на размера на дефекта в изолацията, но и с намаляване на дебелината на тръбата. От изрази (II.8) и (II.10) следва още, че плътността на тока е функция и на специфичното електрическо съпротивление на почвата. Така, според предложената методика, се установява, че с намаляване на ρ , плътността на тока δ нараства.

Направен е анализ за влиянието на съпротивлението на изолацията върху скоростта на корозията. Използвайки известните от литературата зависимости за съпротивлението на тръбопровод с изолация, вземайки предвид ниското надлъжно съпротивление на тръбата, се получава израз:

$$R_{об} = R_{изол} + R_{тр} = \frac{h_{из} \cdot \rho_{из} \cdot 10^6}{\pi \cdot D} + \frac{\rho}{\pi} \ln \frac{2.8}{\alpha_m \sqrt{\frac{D \cdot H}{2}}} \quad (II.14)$$

От израз (II.14) се вижда, че колкото $h_{из}$ и $\rho_{из}$ имат по-малки стойности, толкова корозионният процес ще бъде по-силно изразен.

По предложената методика се установява, че най-опасна корозия на тръбопроводите от блуждаещи токове се извършва в дефектите на изолацията с размери, съизмерими с дебелината на стената на тръбопровода. При свободна почвена корозия най-дълбоки поражения следва да се очакват в големите дефекти. Размерът на дефекта не е единственият фактор, определящ интензивността на корозията. При обследване и диагностика на изолационното състояние на тръбопроводите е необходимо да се отчита преди всичко специфичното електрическо съпротивление на почвата, нейната влажност, литологичните ѝ характеристики, рН и други влияещи фактори. Предложената методика трябва да се вземе предвид при изработването на алгоритъм за изчисляване на автоматична катодна станция с регулируеми параметри.

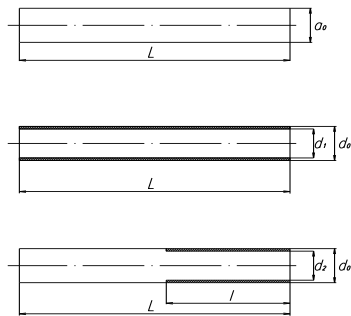
II. 2. Метод за определяне на скоростта на корозия по изменение на електрическото съпротивление и загуба на тегло на стоманени образци

За по-точна и всестранна оценка на процеса на равномерната и локална корозия в дисертационния труд се предлага метод, като се измерва изменението на електрическото съпротивление на цилиндрични образци (стоманени едножилни проводници) положени в корозионната среда. Методът се основава на констатацията, че продуктите от корозията на метала имат електропроводимост, значително по-малка, отколкото от метала и следователно всеки процес на преминаване на йони в корозионната среда ще предизвика нарастване на електрическото съпротивление на изследвания образец.

В качеството на изследван образец се използва плътен цилиндричен проводник (прът) или кух цилиндричен проводник (тръба), които по химичен състав съответстват на най-използваните стомани за производство на тръбопроводи.

Плътен цилиндричен проводник (прът)

Измерването на електрическото съпротивление на проводников образец, поместен в корозионна среда се усложнява поради неточността, предизвикана от изменението на температурата. За да се изключи влиянието на температурата, в дисертационния труд е предложена конструкция на индикатор на корозията, състоящ се от две разположени паралелно, свързани в мост, еднакви по дължина и диаметър жични образци, условно наречени „работен“ и „еталонен“. Работното рамо на индикатора се подлага на въздействието на корозионната среда, а „еталонното“ е покрито със защитен слой от корозионно устойчив неелектропроводим слой.



Фиг. 11.1. Схема на разпределение на корозията по повърхността на образца:

ΔR е нарастване на съпротивлението на работното рамо за сметка на корозията. Отношението $\frac{\Delta R}{R_0}$ характеризира степента на корозионното поражение на образца и в процеса на изследването се измерва непосредствено с помощта на магазинно съпротивление.

R_0 - началното съпротивление на образца, Ω ;

d_1 - диаметърът на равномерно корозирания образец, mm;

d_2 - диаметърът на корозирания участък при локално разрушаване, mm;

L - дължината на образца, m;

l - дължината на корозирания участък при локално разрушаване, m;

При равномерна корозия на образца, на основание на закона на Ом, за некорозирания образец следва:

$$R = \frac{L}{S} \cdot \frac{L}{S} = \frac{L^2}{S^2} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{1}{d^2} \quad (11.20)$$

където ρ_m е специфичното електрическо съпротивление на материала на образца Ωm ; S - сечението на образца, m^2 ;

Тегловните загуби на метал за целия образец в дадения случай се определят с израза:

$$\Delta G = \frac{\pi d_0^2}{4} L \gamma - \frac{\pi d_1^2}{4} L \gamma = \frac{\pi}{4} L \gamma (d_0^2 - d_1^2), \quad (II.24)$$

където γ е плътност на материала на образца, g/cm³

d_0 - начален диаметър на образца, mm;

t - времетраенето на експеримента, h;

За скоростта на равномерната корозия на образца (СРК) е изведен израза:

$$CPK = \frac{\Delta G}{S \cdot t} = \frac{\frac{\pi}{4} L \gamma (d_0^2 - d_1^2)}{S \cdot t} = \frac{\pi \gamma L (d_0^2 - d_1^2)}{4 S t} \quad (II.26)$$

Кух цилиндричен проводник (тръба)

Когато на корозионно въздействие е подложен кух цилиндричен проводник с външен диаметър d_0 и вътрешен диаметър d_1 , електрическото съпротивление на некорозирания образец R_0 се определя с израза:

$$R_0 = \frac{L}{S} = \frac{L}{\frac{\pi}{4} (d_0^2 - d_1^2)} = \frac{4L}{\pi (d_0^2 - d_1^2)} \quad (II.27)$$

Когато разглежданият образец е засегнат от равномерна корозия и неговия външен диаметър е d_2 , електрическото съпротивление на корозирания образец R_1 се определя с израза:

$$R_1 = \frac{L}{S} = \frac{L}{\frac{\pi}{4} (d_2^2 - d_1^2)} = \frac{4L}{\pi (d_2^2 - d_1^2)} \quad (II.28)$$

Загубата на метал се определя по зависимостта:

$$\Delta G = \frac{\pi d_0^2}{4} L \gamma - \frac{\pi d_1^2}{4} L \gamma = \frac{\pi L \gamma}{4} \left(d_0^2 - \frac{d_0^2 \frac{\Delta R}{R_0} - d_1^2}{1 + \frac{\Delta R}{R_0}} \right) \quad (II.31)$$

За скоростта на равномерна корозия на образца (СРК) получава се:

$$CPK = \frac{\Delta G}{S \cdot t} = \frac{d_0^2 \frac{\Delta R}{R_0} - d_1^2}{4 \cdot t \left(\frac{\Delta R}{R_0} + 1 \right)} \gamma \quad (II.32)$$

От зависимости (II.26 и II.32), може да се направи изводът, че скоростта на равномерната корозия се определя от стойността на повишеното електрическо съпротивление и продължителността на експозицията t , при приети плътност γ на материала и начален диаметър на образца d_0 . Електрическата схема за измерване позволява да се получат стойностите на нарастването на електрическото съпротивление и на

отношението $\frac{\Delta R}{R_0}$. За ускоряване и опростяване на изчисленията на стойността на $\frac{\Delta R/R_0}{1+\Delta R/R_0}$, в зависимост от полученото от експеримента отношение $\frac{\Delta R}{R_0}$ може да се построи диаграма.

При неравномерна корозия, ако се допусне условно, че образуващите се „язви“ са групирани на едно място, както е показано на фиг. II.1. в, електрическото съпротивление на локално корозирания образец се определя с израза:

$$R_{\text{е}} = \frac{R_0}{1 + \frac{\Delta R}{R_0}} \quad (II.33)$$

В случай на неравномерна корозия се определя поразената част от дължината на образца. На базата на изведената методология може да се направи извода, че величината $\frac{l}{L}$ представлява частта от площта на образца, поразена от локалната корозия. Изразена в проценти, тази величина представлява показател на повърхностно разпределение на корозията (ПРК):

$$ПРК = \frac{l}{L} \cdot 100\% = \frac{\Delta G \cdot R_1}{\Delta G_0 \cdot R_1 - \Delta G \cdot R_1} \cdot 100\% \quad (II.40)$$

За характеристика на локалната корозия, характерна и най-показателна величина е скоростта на проникване на корозията в дълбочина – ПКД (mm/год). Скоростта на проникване на корозията в дълбочина се дава с израза:

$$ПКД = 4380 \frac{d_0}{t} \left(1 - \sqrt{\frac{\Delta G/G_0}{\Delta R/R_1}} \right), \text{ mm/год} \quad (II.41)$$

Отношението $\frac{\Delta G}{\Delta G_0}$ е величината на относителната тегловна загуба на метал на образца, за сметка на корозията, за периода на опитното изследване.

Този метод за измерване на скоростта на корозията може с успех да се използва при избор на оптималните режими на работа на отделни възли на оборудванията, изпитване на инхибиторите на корозията, изследване на кинетиката на корозионните процеси.

Изводи към втора глава:

Създадена е методика за определяне на плътността на тока при корозия, предизвикана от блуждаещи токове. Основен извод от тях е определянето на нарастването на плътността на корозионния ток с намаляване на специфичното електрическо съпротивление на почвата, площта на дефекта и дебелината на стената на тръбопровода. Направен е анализ на причините, които ускоряват корозионния процес при свободна почвена корозия. Предложена е методика за определяне на диаметъра на корозирал образец, чрез изменение на съпротивлението му при равномерна и локална корозия, за определяне на скоростта и определяне на показателя на повърхностно разпределение на корозията на образца при равномерна и неравномерна (локална) корозия. С методиката може да се определи и скоростта на проникване на корозията в дълбочина. Направените анализи и създадените методики са насочени към създаването на софтуер за изчисляване на параметрите на регулируема катодна защита и управлението им в реално време. За ефективното функциониране на такъв софтуер е необходимо изследване на

разпределението на плътността на тока в земята, създаден от източници на ток и определяне на параметрите на анодните заземители.

Глава трета. Определяне на разпределението на плътността на тока в земята във функция от плътността на проникване и от разстоянието между източниците на ток. Метод за определяне на потенциала „съоръжение-земя“ в почви с високо специфично съпротивление

С цел определяне и точно измерване на стойностите на тока и напрежението в стационарното електрическо поле в дисертационния труд се разглежда разпределението на тока и напрежението при условия, които не са разглеждани в литературата т.е. когато източникът е на повърхността на земята. Определено е изменението на плътността на тока, протичащ в земята, създаден от разнополярни сферични източници. Даден е израз за определяне на потенциала на електрическото поле в произволна точка в земята, създаден от разнополярни линейни източници на ток и линейен и точковиден източници на ток. Предложен е метод за определяне на потенциалната разлика „съоръжение-земя“ в почви с високо специфично съпротивление чрез волтметър.

III.1. Разпределение на тока и напрежението в стационарно електрическо поле

За повишаване на надеждността на катодната защита е необходимо да се определи относителната плътност на защитния електрически ток, създаден от два разнополярни източника (заземители) като функция от разстоянието между тях и от дълбочината на разпространението на тока в земята.

Разглежда се точковиден електрод, захранван с ток със сила I , поставен в еднородна, изотропна и безгранична среда. В дисертационния труд се разглежда случаят, когато източникът на ток е разположен на повърхността на земята, която в случая е проводящо полупространство, граничещо със среда с безкрайно голямо съпротивление – въздух.

За конкретния разглеждан случай в точка M потенциалът на електрическото поле е равен на алгебричната сума от потенциалите на полетата, създадени от източниците на ток A и A' . Ако източникът на ток A е разположен на повърхността на земята, т.е. $h = 0$, уравнението за потенциала има вида:

$$U_M = \frac{\rho I}{2\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad (\text{III.8})$$

Интензитетът на електрическото поле и плътността на тока за разглеждания случай са известни от литературата и съответно са равни на:

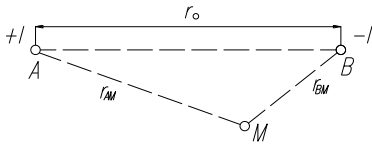
$$E = \frac{\rho I}{2\pi r^2} \quad (\text{III.9}) \quad , \quad \delta = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (\text{III.10})$$

От изрази (III.8), (III.9) и (III.10) може да се направи изводът, че при разполагане на захранващия електрод на границата „земя-въздух“, екипотенциалните повърхнини са полусфери с център в източника на ток и удовлетворяват равенството $r = \text{const}$.

Линиите на интензитета на полето и на тока са радиални прави, излизащи от източника на ток, а потенциалът на електрическото поле и плътността на тока намаляват обратно пропорционално на квадрата на разстоянието от източника на ток. От практическа гледна точка са възможни случаите, когато електрическото поле е създадено от:

1. два разнополярни точковидни източници на ток;
2. два разнополярни линейни източници на ток;
3. два разнополярни линейен и точковиден източници на ток.

При първия случай, двата разнополярни точковидни заземители А и В са поставени в еднородно и изотропно пространство на разстояние r_0 един от друг (фиг. III. 2).



Фиг. III. 2. Разнополярни сферични източници

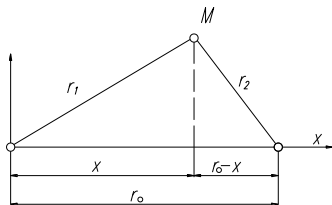
В произволна точка М на проводящото полупространство потенциалът на точка М е:

$$U_M = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} \right) \quad (III.11)$$

където r_{AM} и r_{BM} са разстоянията между точка М и заземителите А и В.

От зависимост (III.11) следва, че екипотенциалните повърхнини на електрическото поле на две заземявания не са концентрични сфери и удовлетворяват условието: $\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} = \text{const.}$

Ако точка М е разположена на повърхността на полупространството (фиг. III.3), то $r_{AM} = \sqrt{x^2 + y^2}$ и $r_{BM} = \sqrt{(r_0 - x)^2 + y^2}$.

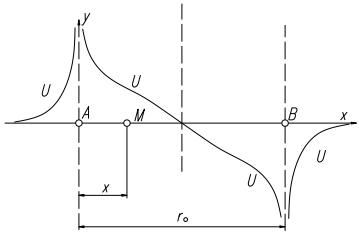


Фиг. III. 3. Изчисляване на електрическото поле на два точковидни заземителя

Тогава, потенциалът в произволна точка от земната повърхност М от електродите А и В е равен:

$$U_M = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2}} - \frac{1}{\sqrt{(r_0 - x)^2 + y^2}} \right) \quad (III.12)$$

От израз (III.12) следва, че потенциалът U_M , когато $y = 0$ (точката М е разположена на линията АВ) в точка А е равен на безкрайност. С увеличаване на x , той намалява. В точка $x = \frac{r_0}{2}$, потенциалът U_M е равен на нула, след това се увеличава по абсолютна стойност, но с обратен знак и в точка В е равен на безкрайност (фиг. III. 4)

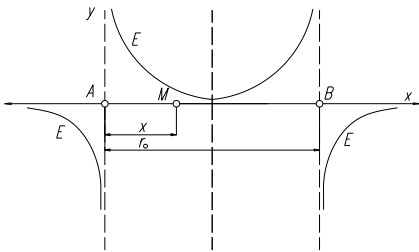


Фиг. III. 4. Разпределение на потенциала

От направения анализ следва, че изразът за интензитета на електрическото поле в точките от правата, съединяваща източниците на ток А и В (при $y = 0$), придобива вида

$$E = \frac{\rho I}{2\pi} \left[\frac{1}{x^2} + \frac{1}{(r_0 - x)^2} \right] \quad (\text{III.15})$$

В точките А и В (зависимост III.15), интензитетът на полето е безкрайност (фиг. III. 5)



Фиг. III. 5. Интензитет на полето в точки А и В

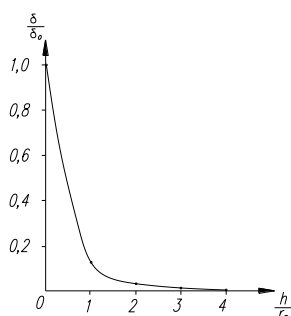
III. 2. Изменение на плътността на тока, протичащ в земята, създаден от разнополярни сферични източници

В произволна точка М от равнината Q-Q (фиг. III. 6), преминаваща през средата на отсечката А-В, на дълбочина h , общата плътност на тока δ_{AB} , предизвикана в земята от разположените в нея точковидни източници А и В, е равна на геометричната сума от плътността на токовете $+I$ и $-I$.

На земната повърхност в точка О, където $h = 0$, $\cos\alpha = 1$, $r = \frac{r_0}{2}$, а плътността на тока е $\delta_0 = \frac{4I}{\pi r_0^2}$ (III. 17)

При $h = 0$, ъгълът $\alpha = 0$, то
$$\delta = \frac{4I}{\pi r_0^2} \sqrt{\frac{r_0^2}{r^2} - 1} \quad (\text{III. 18})$$

На база на теоретичния анализ може да се направи изводът, че с увеличаване на дълбочината h (израз III. 18) плътността на тока намалява от стойността $\frac{4I}{\pi r_0^2}$ до нула (при $h \rightarrow \infty$), при което в началото плътността на тока намалява по-малко интензивно, отколкото по обратноквадратична зависимост, тъй като нараства не само знаменателят, но и числителят. Намаляването на плътността на тока с увеличаване на h е по-интензивно, отколкото по обратноквадратична зависимост. Кривата на изменение на плътността на тока в зависимост от дълбочината h е показана на фиг. III.7.



Фиг. III. 7. Графика на изменението на плътността на тока с изменение на дълбочината h

Отношението на плътността на тока δ в дълбочина, към плътността на тока δ_0 на земната повърхност в точка О е:

$$\frac{\delta}{\delta_0} = \frac{I \cos \theta}{\pi r^2} \cdot \frac{4}{\pi r_0^2}$$

За изменение на плътността на тока се получава зависимостта:

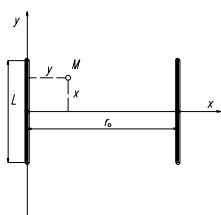
$$\frac{\delta}{\delta_0} = \frac{\left(\frac{r_0}{2}\right)^3}{r^3} = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{2h}{r_0}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}} \quad (\text{III.19})$$

От израза (III. 19) и кривата (фиг. III. 7) може да се направи изводът, че разпределението на плътността на тока с изменение на дълбочината зависи от разстоянието между захранващите електроди А и В. Колкото е по-голямо разстоянието между електродите, толкова е по-голяма дълбочината h , на която може да се наблюдава стойността δ/δ_0 .

III.3. Потенциал на електрическото поле в произволна точка в земята, създаден от разнополярни линейни източници на ток и линеен и точковиден източници на ток

На практика от значение са случаите, когато източниците на ток са линейни. В някои случаи, при голямо разстояние между захранващия източник и електродът, може да се приеме, че единият източник е точковиден.

Предполага се, че стационарното електрическо поле е създадено от два разнополярни линейни източници на ток. Определя се разпределението на потенциала на точки от площта на правоъгълник, от двете противоположни страни на който се намират двата линейни електрода, чрез които в земята постъпва ток със сила $+I$ и $-I$ (фиг. III. 8).



Фиг. III. 8. Два линейни разнополярни електрода

Предполага се, че съпротивлението на разтичане на тока за всеки от електродите по цялата им дължина е едно и също. Приема се, че елемент с дължина dL от електрода е еквивалентен на точковиден електрод, захранван с ток със сила $\frac{I}{L} dL$.

Положителният потенциал създаден от точковиден електрод, в която и да е точка М от правоъгълника с координати x и y е равен на:

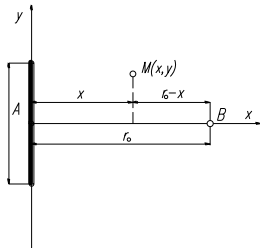
$$U_+ = \frac{\rho I}{2\pi L} \ln \frac{\sqrt{x^2 + \left(y - \frac{L}{2}\right)^2} - \left(y - \frac{L}{2}\right)}{\sqrt{x^2 + \left(y + \frac{L}{2}\right)^2} - \left(y + \frac{L}{2}\right)} \quad (\text{III.21})$$

За изчисляване на потенциала на втория анод се заменя $+I$ с $-I$ и x с $(r_0 - x)$ и се получава стойността на потенциала U_- на целия втори електрод, захранван със сила на тока $-I$:

$$U_- = \frac{\rho I}{2\pi L} \ln \frac{\sqrt{(r_0 - x)^2 + \left(y - \frac{L}{2}\right)^2} - \left(y - \frac{L}{2}\right)}{\sqrt{(r_0 - x)^2 + \left(y + \frac{L}{2}\right)^2} - \left(y + \frac{L}{2}\right)} \quad (\text{III.22})$$

Потенциалът в точка М е равен на сумата от потенциалите U_- и U_+

На фиг. III. 9 е показана схема на линеен електрод и точковиден електрод. Линеиният източник на ток е електродът А с дължина L , захранван със сила на тока $+I$. Точковидният източник на ток е електродът В, захранван със сила на тока $-I$ и е разположен на перпендикуляра от средата на електрода А, на разстояние r_0 .



Фиг. III. 9. Линеен и сферичен разнополярни електрода

Резултатният потенциал е равен:

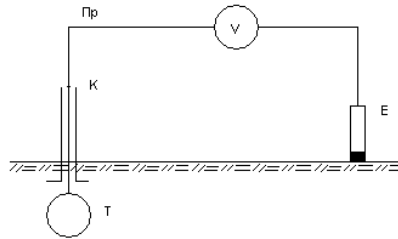
$$U_M = U_+ + U_- = \frac{\rho I}{2\pi L} \ln \frac{\sqrt{x^2 + \left(y - \frac{L}{2}\right)^2} - \left(y - \frac{L}{2}\right)}{\sqrt{x^2 + \left(y + \frac{L}{2}\right)^2} - \left(y + \frac{L}{2}\right)} - \frac{\rho I}{2\pi \sqrt{(r_0 - x)^2 + y^2}} \quad (\text{III.24})$$

В системата за електрохимическа защита електродите се използват не само за осъществяване на контакт между тръбопровода и захранващата верига, а и за измерване.

III.4. Определяне на потенциалната разлика „съоръжение-земя” в почви с високо специфично съпротивление

За степента на защитеност на подземните стоманени комуникации от корозия при наличие на електрохимична защита се съди по потенциалната разлика “съоръжение-земя”. За определяне на тази потенциална разлика обикновено се използва измервателен апарат с високо входно съпротивление, а в качеството на заземител – медносулфатен електрод за сравнение.

Установено е, че интензивна корозия на металите се наблюдава в почви не само с ниско, но и с високо специфично съпротивление. В този случай преходното съпротивление “медносулфатен електрод – земя” достига големи стойности и води до чувствителна разлика между действителните стойности на потенциалната разлика и тези, получени чрез измерване.



Фиг. III. 10 Схема за измерване на потенциалната разлика “съоръжение-земя”, Т- тръбопровод; Пр – присъединителни проводници; V - волтметър; Е – медносулфатен електрод; К – контролно-измервателна колонка

Общото съпротивление на измервателната верига е:

$$R_{об} = R_{т-з} + R_{пр} + R_{вхV} + R_{ел} + R_{прех. е-з}, \quad (III.25)$$

където $R_{об}$ е общо съпротивление на веригата;

$R_{т-з}$ – съпротивлението “тръбопровод – земя”;

$R_{пр}$ – съпротивлението на съединителните проводници;

$R_{вхV}$ - вътрешно съпротивление на волтметъра;

$R_{ел}$ – съпротивлението на електрода;

$R_{прех. ел-з}$ – преходно съпротивление “медносулфатен електрод-земя”;

Обикновено $R_{т-з}$, $R_{пр}$ и $R_{ел}$ са значително по-малки от $R_{вхV}$. Така за потенциалът “тръбопровод-земя” се получава изразът:

$$U_{т.з} = I \cdot R_{об} \approx I \cdot R_{вхV} + I \cdot R_{прех. е-з} = U_v + I \cdot R_{прех. е-з} \quad (III.28)$$

От (III. 28) следва, че разликата на потенциалите “съоръжение – земя” е сума от показаниято на измервателния уред и падът на напрежение върху медносулфатния електрод, обусловен от преходното съпротивление “електрод-земя”.

Ако се проведе измерване на напрежението $U_{т-з}$ с един уред в два обхвата на измервания с различни входни съпротивления, може да се определи стойността на $R_{прех. е-з}$ и $U_{т-з}$. Ако с U' , I' , R' и U'' , I'' ,

R'' се означат съответно стойностите на разликата на потенциалите отчетени от уреда, силата на тока във веригата и входното съпротивление на волтметъра при двата случая на измерване, то е установено, че:

$$U_{m-3} = U' + I' \cdot R_{\text{прех-3}} = \frac{U' \cdot U'' \left(1 - \frac{R'}{R''}\right)}{U' - \frac{R'}{R''} U''} \quad (\text{III.38}) \quad \text{и} \quad R_{\text{прех-3}} = \frac{U'' - U'}{I' - I''} = \frac{(U'' - U') \cdot R' \cdot R''}{R'' U' - R' U''}, (\text{III.39})$$

Посредством двете измервания на U_{m-3} може да се определи стойността на специфичното съпротивление на почвата с волтметър в мястото на поставянето на медносулфатния електрод за сравнение. Въз основа на направеното теоретично изследване може да се определи разпространението на тока, създаден от анодните заземители. За постигане на необходимия защитен потенциал трябва точно да се определят параметрите на самите заземители.

Изводи към трета глава:

Чрез изведените изрази и методики може да се определи разпределението на тока в дълбочина при различни схеми на хранящите електроди. Създадените методики трябва да са теоретична основа за изчисляване на параметрите на анодните заземители в системата на катодна защита, регулируема в реално време. Предложен е опростен метод за определяне на потенциала U_{m-3} и на специфичното електрическо съпротивление без използването на специален за целта измервателен уред. Резултатите от прилагането му са съкращаване на периода и поевтиняване на метода. За получаване на по-малка грешка при измерване на потенциалната разлика “съоръжение – земя” при почви с високо специфично съпротивление и голямо преходно съпротивление на медносулфатния електрод за сравнение, трябва да се използва измервателен уред с голямо вътрешно съпротивление.

Глава четвърта. Разработване на методика и софтуер за определяне на параметрите на катодна защита

Въз основа на известни зависимости е изработен алгоритъм за изчисляване съпротивлението и взаимното влияние на анодни заземители при кръгова схема и при едноредна схема на подреждането им за еднослойна, двуслойна и многослойна почва. Дадени са и коригиращи коефициенти с цел намаляване на грешката при промяна на дълбочината на полагане на анодите. За тези случаи е определен и срокът на експлоатация T на анодите.

IV. 1. Определяне на параметрите на анодните заземители

Основните параметри на анодните заземители са съпротивление на разтичане R и степен на екраниране F . Разглеждат се следните варианти за изчисляване на съпротивлението на разтичане R в зависимост от разполагането на заземителите в средата, в която те са поставени:

1. Едноредово разполагане на АЗ в еднопластова и еднородна почва;
2. Анодно заземяване в двуслойна почва;
3. Анодно заземяване в многослойна почва;
4. Кръгово разполагане на АЗ в еднопластова и еднородна почви;

1. Анодно заземяване в еднослойна почва. За еднослойна почва за съпротивлението на разтичане R се дават двата израза:

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d}, t=0 \quad (\text{IV.1})$$

$$\text{и } R = \frac{\rho}{2\pi d} \ln \left(\frac{2l}{d} \sqrt{\frac{4t+3l}{4t+l}} \right), t \gg d \quad (\text{IV.2})$$

където l е дължина на анодния заземител, d - диаметър, t - дълбочина на забиване.

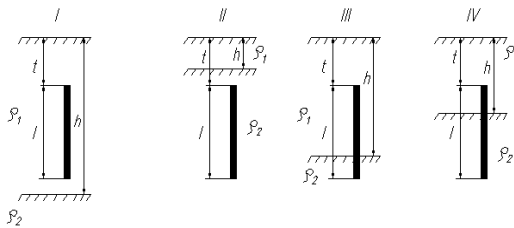
За взаимното влияние се дава
$$F_{t=0} = 1 + \frac{\rho}{\pi s R_0} \sum_{m=2}^n \frac{1}{m}, \quad (\text{IV.3})$$

F – коефициентът на взаимното влияние на анодите, отразяващ интерференцията на техните електрически полета, зависещ от n (брой на анодите), s (сечение на анода, мм^2), l , d и от дълбочината t на поставяне на анодите в почвата, т.е. от дълбочината на челния горен край на анода под повърхността на земята. В тях не е отчетена грешката от промяна на дълбочината на полагане на анода. Коригиращите коефициенти за такива случаи са:

$$\bar{f}_{t,l=s} = \left\{ 1.007 - [t(0.0043l^{-0.5} - 0.001)]^{0.5} \right\}^2 \quad (\text{IV.4})$$

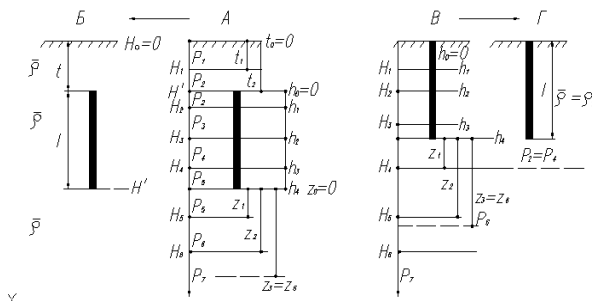
$$\varphi\left(\frac{S}{l}\right) = \left\{ [1.027 + 0.124(\ln l)^{-2}] \exp \left(\left(4l^{-1} - 2.66 \frac{l}{S} \right)^{0.5} \ln [2.731 - 0.0309(\ln l)^{-4}] \right) \right\}^{0.5} \quad (\text{IV.4 а,б})$$

2. Анодно заземяване в двуслойна почва. За двуслойна почва се използват зависимостите на Бургсдорф за четирите основни случая:



фиг. IV.1. Схема на разположение на анодите в двуслойна почва.

3. Анодно заземяване в многослойна почва. При многослойна почва има различни варианти за разполагане на анодите в слоевете. Челата им могат да са на границите на пластовете или вътре в тях. Разположението на анодите се онагледява на следната фигура.



Фиг. IV.2. Схема на разположение на анодите в многослойна почва

За многослойна почва първо се определя средното специфично съпротивление

$$\bar{\rho} = \frac{l}{\left(\frac{h_1 - h_0}{\rho_2}\right) + \left(\frac{h_2 - h_1}{\rho_3}\right) + \left(\frac{h_3 - h_2}{\rho_4}\right) + \left(\frac{h_4 - h_3}{\rho_5}\right)} \quad (\text{IV.12})$$

Съпротивлението на разтичане се определя от израза:

$$R_{t=0} = \frac{\rho_1}{2\pi l} \left[\ln(4ld^{-1}) + \sum_{m=1}^{\infty} K_{12}^m \ln \frac{m+0.5}{m-0.5} \right] \quad (\text{IV.14})$$

с използване на коригиращият коефициент

$$K_{12} = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \text{ и } m - \text{текущ брой на анода.}$$

4. Кръгово анодно заземяване. За защита на комунални тръбопроводи в населени места при голям брой на анодните заземители не е удобно те да бъдат разположени в ред с голяма дължина, тъй като участъкът обикновено е ограничен от съседни здания, улици и т.н.

В подобни ситуации се използват дълбочинните или така наречените контурни заземявания. В този случай вертикалните аноди се поставят по периметъра на кръг, квадрат, правоъгълник, диаметърът и страните на които в градски условия, имат като правило неголеми размери, по-малки от 5-6 метра.

При кръгова схема на разположение на анодите взаимното влияние се определя по зависимостта

$$s > l; \quad F = 1 + \frac{nl}{D \ln \frac{4l}{d}} f(n), \quad (\text{IV.15})$$

и $s < l; \quad F = \ln \left(\frac{4l}{d} \right)^{-1} \left(n \ln \frac{4l}{D} - \ln \frac{4d}{D} \right)$

$$s > l \quad (\text{IV.16})$$

Съпротивлението на разтичане е: $R = \frac{\rho}{2\pi \ln \left[\ln \frac{4l}{d} + 0.5(n-1) \right] \rho}, \quad (\text{IV.17})$

където $\bar{\rho}$ е усреднен член на реда $\bar{\rho} = \frac{\sqrt{s_m^2 + l^2} + l}{\sqrt{s_m^2 + l^2} - l}$, а s_m е усредненото разстояние между анодите

$\bar{s}_m = K_y D$. Дадени са основни зависимости при проектирането на кръгова схема – диаметър на кръга, брой електроди и т.н..

$$R_{t>0} \approx \frac{R_{0,t=0}}{n} F_{t=0} f(t) = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \left(\frac{4l}{d} \right) \left[1 + \left(2 \ln \frac{4l}{d} \right)^{-1} \sum_{m=3}^n \ln \frac{\sqrt{s_m^2 + l^2} + l}{\sqrt{s_m^2 + l^2} - l} \left\{ 1.007 - \left[t(0.0043l)^{-0.5} - 0.001 \right]^{-0.5} \right\}^2 \right]$$

IV. 2. Период на експлоатация на вертикалните анодни заземители

За определяне на параметрите на катодната станция е нужно да се заложи период на експлоатация на анодите, който зависи най-много от специфичното съпротивление на почвата и от големината на тока.

Изведени са зависимости за определяне на периода на служба на анодите в еднослойна, двуслойна и многослойна почва. Основа за извеждането на зависимостите за отделните случаи е изразът:

$$Q'_d = \frac{\varepsilon M}{B_e} \alpha_e \frac{(1 + \lambda')}{\lambda} \quad (\text{IV.29}), \quad \text{където } \alpha_e = \frac{l_2}{l}, \quad \rho_2 < \rho_1. \text{ и}$$

$$Q''_d = \frac{\varepsilon M}{B_e} \alpha_l (1 + \lambda'), \quad \text{където } \alpha_l = \frac{l_1}{l}, \quad \rho_1 < \rho_2 \quad (\text{IV.30})$$

B_e - количеството електричество от реакцията на анодното разтваряне на материала на анода.

При изразяване на I_B в амperi, M в kg и T в години; B_e има размерност kg/A год. Величината ε

представлява „коефициент на запас“ – допустимата част от масата на анода, която може да бъде изразходена за времето Т. Обикновено $\varepsilon=0.7-0.75$.

За целта е удобно въвеждане на величината εM , определена като разлика от изходния D_0 и допустимият краен D_k външен диаметър на заземителя. На практика става въпрос само за разтворими аноди. Съпоставяйки Q''_o , изчислено по (IV.29) и (IV.30) и Q'_o - по (IV.27) и (IV.28), може да се оцени грешката на обикновения метод за изчисление, основан на идеалното разпределение на токовете.

Когато са известни параметрите на анодните заземители (размери и срок на служба) се изчислява разпределението на потенциала и тока по дължина на защитааното подземно съоръжение.

IV.3. Разпределение на потенциала и на тока по дължината на защитааното подземно метално съоръжение (тръбопровод) от корозия при използване на катодна защита

При голяма дължина на защитааното съоръжение, каквато е подземен тръбопровод, определянето на потенциала е трудно, тъй като той се изменя по дължината на линията, намалявайки от дренажната точка към краищата на тръбопровода. При това изменението на потенциала зависи от разположението на катодната станция, т.е. дали тя действа самостоятелно или в близост до нея съществуват и други катодни станции.

Разгледани са три случая за разпределяне на потенциала по дължина на линията:

- Безкрайна дължина

Ако с $l_1 = \frac{r}{2}$ се означи дължината на участъка от едната страна на дренажната точка, а с $U_{\min}$ минималният защитен потенциал в най-отдалечената точка, за стойностите на тока и напрежението се получава съответно:

$$U_A = U_{\min} e^{\rho l_1} \quad \text{(IV.38)} \quad \text{и} \quad I_A = I_{\min} e^{\rho l_1} \quad \text{(IV.39)}$$

- Крайна дължина

$$U_{\min} = U_A \frac{ch[\rho(l_2 - l_1)]}{ch(\rho l_2)} \quad \text{(IV.47)}$$

- Крайна дължина с товар

$$U_A = U_l ch \rho l_1 + \frac{U_l r}{Z_{l_1} \rho} sh \rho l_1 \quad \text{(IV.53)}$$

Създадена е възможност на базата на анализа на параметрите на анодните заземители, срока им на служба и на разпределението на тока и потенциала по линиите за създаване на компютърни програми за бързото и точно определяне на съпротивлението на разтичане за различни варианти на разположение на анодите в почвата, при различни структури на последната и различни геометрични размери на анодите.

IV.4. Автоматизирана система за изчисление на елементи от система за катодна защита

Въз основа на селектираните изрази за изчисляване на параметрите на анодните заземители е разработен алгоритъм за изчисляване на параметрите на катодна защита. Алгоритъмът е се състои от следните етапи:

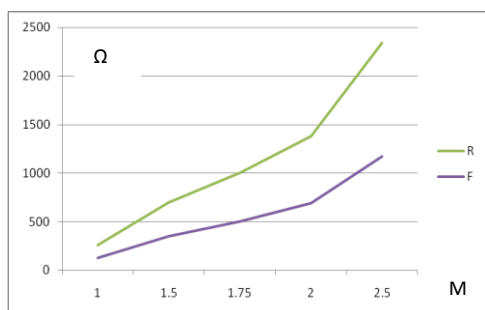
- I. Задаване на входни данни.

- За почвата се задават стойностите на специфичното електрическо съпротивление; вид на почвата; при многопластова почва – брой, дебелина и специфично електрическо съпротивление за всеки пласт.
 - Въвеждане на данни за структурата – диаметър на съоръжението, материал, определяне на защитаваната площ, за изолацията – дебелина, съпротивление.
 - Инфраструктурни данни за защитаваното съоръжение. Място на полагане на съоръжението (извън или в населено място), описание на схема на подредба на електродите.
- II. Задаване на специфични коефициенти за автоматичен избор. Такива са определяне на стойността на защитния ток и определяне на вида на засипката.
 - III. Въвеждане на основните зависимости и изчисляване им.
 - IV. Преглед на основните технически параметри. При недостигане на нужните защитни стойности изчислителният процес започва отначало, ако не се продължава към етап 5.
 - V. Оценка на технико-икономическите показатели. При нежелани икономически параметри се налага промяна на част от техническите параметри. При достигане на желаните икономическите показатели се продължава към стъпка 6. Въвежда се анюитетна оценка на разходите.
 - VI. Определяне на параметрите на работа на защитата при променени условия за единица време.
 - VII. Сравнение на режимите на работа и избор на окончателен вариант на защитата.

IV. 5. Резултати от изпълнение на алгоритъма

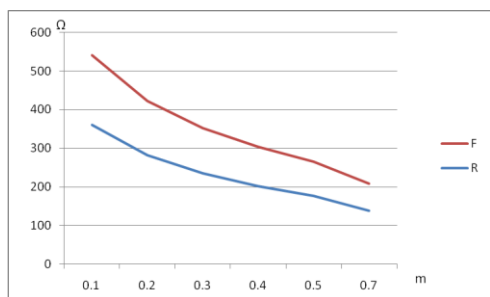
Програмата е изпълнена на C++. Въз основа на промяна на входните данни са направени различни симулации за промяната на крайните параметри на катодната защита при промяна на входните данни.

Промяната на параметрите на анодите води до промяна на взаимното им влияние и съпротивлението на разтичане на анода R. За линии с безкрайна дължина, при запазване на тока, напрежението и на всички останали параметри на анода, е характерно, че при повишаване на дължината на анодите расте съпротивлението на разтичане и взаимното им влияние. (Фиг. IV.9)



Фиг. IV.9 Промяна на дължината на анодния заземител

При запазване на дължината, формата, материала на анода, дълбочината на залагане с повишаване на диаметъра на заземителя тези величини намаляват. (фиг. IV.10)



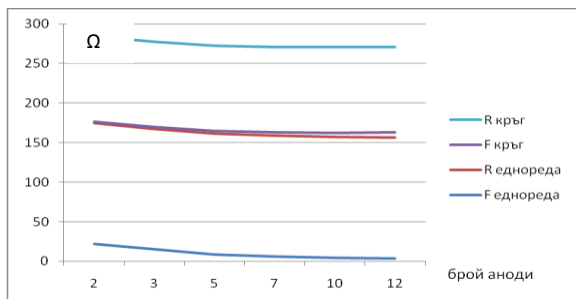
Фиг. IV.10. Промяна на диаметъра на анодния заземител.

При изследване на величините на тока и напрежението се вижда, че за системи с еднакъв брой аноди и еднакви параметри на съоръжението нужните стойности на тока и напрежението са (табл. IV.2):

с товар	107.39V	-124A
безкр	30V	3A
крайна	138V	948A

Таблица IV. 2.

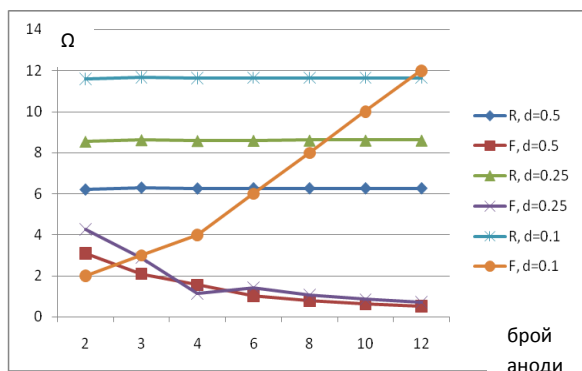
На фиг.VI.11 са представени резултатите при определяне на съпротивлението на разтичане и взаимното влияние на кръг и едноредова крайна линия при петслойна структура на почвата. Зависимостта е изведена при константни стойности на параметрите на анодите и защитаваното съоръжение.



Фиг. IV.11. Разпределение на R и F при петслойна структура при едноредова и кръгова схема на подреждане на електродите.

При петслойна почвена структура съпоставянето на анодната система при едноредова схема и кръг се вижда, че при кръг съпротивлението на разтичане на анодите е най-високо, а взаимното влияние намалява слабо с увеличаване броя на анодите. При едноредова схема съпротивлението и взаимното влияние също намаляват, докато при крайна се увеличават. Затова е подходящо при проектиране на система за катодна защита с увеличаване на броя на слоевете и броя на анодите да се избира едноредова схема. Същата тенденция се наблюдава и при други параметри на анодните заземители и съоръжението.

Съпоставяне на диаметъра на анода при едноредова схема е представено на фиг IV.12. Тази характеристика дава само промяната на диаметъра, а всички останали параметри не се променят.

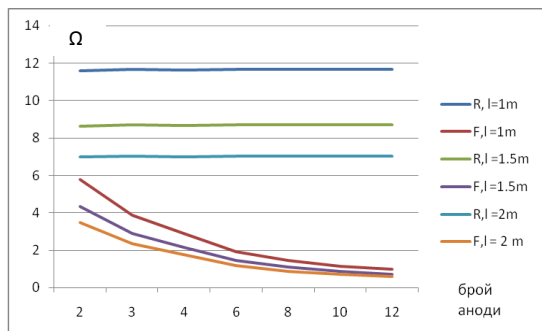


Фиг. IV. 12. Влияние на диаметъра при едноредова схема на анодите.

При повишаване на диаметъра на заземителя съпротивлението на разтичане на анода се понижава. При повишаване на броя на анодите съпротивлението малко намалява. Взаимното влияние на анодите също намалява, но с понижаване на диаметъра промяната става по-голяма. С повишаване на броя на анодите влиянието между тях намалява с изключение на много тънките аноди, където има обратната тенденция. Освен това и съпротивлението на разтичане на тези аноди е най-голямо, което се отразява в повишаване на стойността на нужния защитен ток. Това води до повишане на разходите за енергия.

Все пак, диаметърът на анода не трябва да е много по-малък от дължината при голям брой аноди във веригата.

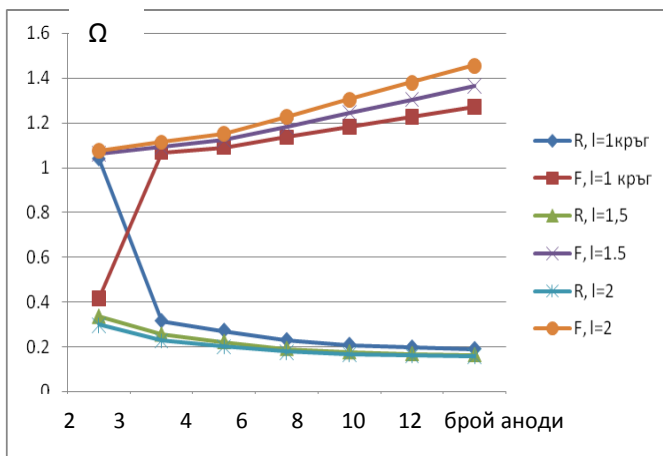
Промяната на съпротивлението на разтичане при повишаване на дължината на анодите и техният брой е слабо, но взаимното влияние намалява. Най-голямо е намалението на взаимното влияние при по-късите аноди с повишаване на техния брой. При проектиране на системата за катодна защита икономически по-изгодно е да се слагат по-дълги аноди, защото съпротивлението им на разтичане е по-ниско, а оттам и цената за поддръжка и разходи за енергия ще е по-ниска (фиг. IV.13).



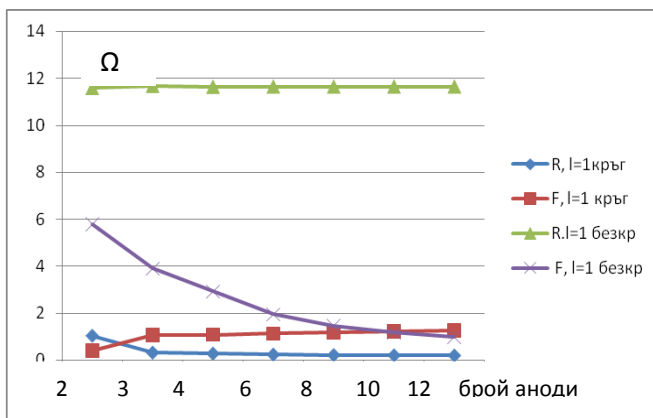
Фиг. IV.13. Едноредова схема, промяна на дължината и броя на анодите.

На фиг. IV.14 е показана тенденцията на промяна на R и F при изменение на дължината на анодите в кръгова схема на подредба на анодите, като останалите параметри не се променят. Съпротивлението на разтичане при кръгова схема намалява много по-бързо в сравнение с това при едноредова схема на подреждане на електродите с увеличаване на техния брой. За разлика от едноредовата схема взаимното влияние е много по-голямо от съпротивлението на разтичане и то се повишава с увеличаване на броя на анодите.

Всъщност стойностите на R и F при кръгова схема са по-ниски от тези при едноредова схема на подреждане на анодите, което е онагледено на фиг. IV.15.



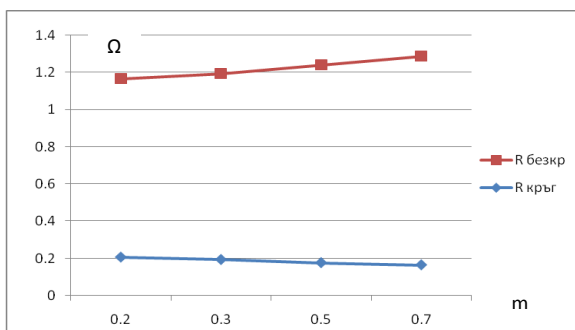
Фиг. IV.14. Кръгова схема на подреждане на анодите, промяна на дължината и броя на анодите.



Фиг. IV.15. Едноредова и кръгова схема на подреждане на анодите.

При повишаване на диаметъра на анодите с повишаване на броя им съпротивлението им на разтичане при кръгова схема намалява, а при едноредова схема расте (фиг. IV.16). И при този симулационен анализ останалите параметри на анода и съоръжението не се променят.

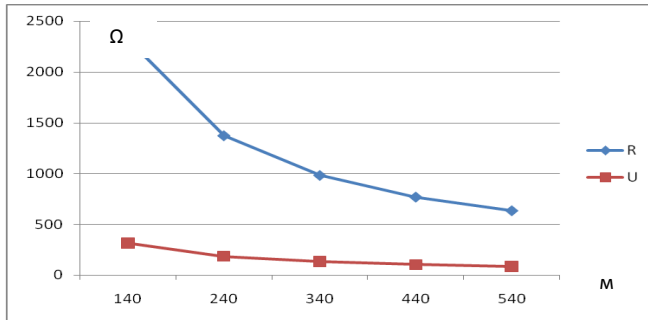
Съпротивлението на разтичане на анодите при кръгова схема е по-ниско, но тази схема е подходяща само за градски условия.



Фиг. IV.16. Промяна на диаметъра при едноредова и кръгова схема.

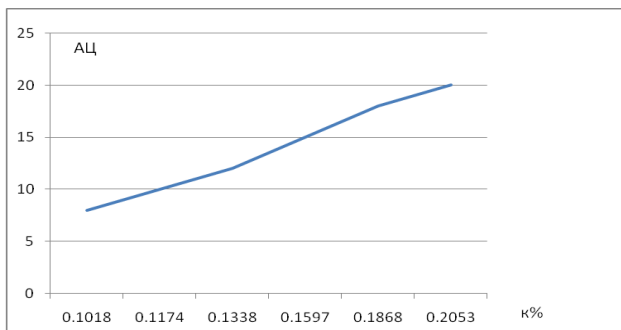
Броят на пластове на почвата не влияе върху съпротивлението на разтичане на анода и взаимното им влияние. При многослойна почва значение има слой с най-ниско специфично съпротивление, който води до по-високо съпротивление на разтичане на анода и по-високо взаимно влияние. В слой с ниско специфично съпротивление животът на анода се съкращава. Затова, когато се определят параметрите на заземителите в системата за катодна защита трябва да се има предвид слой с най-ниско специфично съпротивление.

На фиг. IV.17 е показано, че с понижаване на дебелината на защитаваната конструкция се понижават общото съпротивление на веригата и на изходящото напрежение. Симулацията е направена при запазване на стойностите на анодите и останалите елементи в съпротивителната верига. Също така с повишаване на диаметъра тези стойности отново намаляват.



Фиг. IV. 17. Понижаване на дебелината на тръбата.

Определянето на икономическите параметри е един от последните етапи при проектиране на параметрите на защитата. Разгледан е пример за връзката между АЦ и цената на капитала (κ) при постоянна ОС - осъвременена стойност на разходите на управление на корозията. Примерът е за период от 20 години.



Фиг. IV.18 Промяна на анюитетната цена спрямо цената на капитала

Чрез софтуера се стигна до следните изводи за съпротивителната верига при изменението единствено на следните параметри:

Увеличаването на съпротивлението на дренажния кабел намалява силата на тока I_{kam} и довежда до равномерно намаляване на стойността на потенциала по цялата дължина на съоръжението. Изменението на R_{dp} и R_{uz} довежда до преразпределение на плътността на тока в земята, а следователно и на потенциала U_{m-3} по дължината на съоръжението.

Изводи от глава четвърта:

Подбрани са и са изведени изрази за изчисление на основните параметри на анодните заземители с коригиращи коефициенти, с цел намаляване на грешката съпротивлението на разтичане и на взаимното влияние. Дадени са изрази за определяне на срока на служба, което е определящо при двуслойна и многослойна структура. На базата на общите уравнения на линиите с разпределени параметри са изведени зависимости за определяне на разпределението на потенциала при различни видове линии.

На база на синтезирания алгоритъм е създаден софтуер за изчисляване на параметрите на катодна защита. Чрез симулационен анализ са направени изводи за изменение на основни характеристики на КЗ по отношение на промяна на параметрите на анодните заземители. На база на софтуера могат да се правят и други симулации. При наличие на функционираща система за следене на нивото на корозия в подземните комуникации създаденият софтуер може да се използва за промяна в реално време на параметрите на катодната станция.

Глава пета. Контрол на корозионното състояние на подземните метални съоръжения с помоща на датчици с цел управление на параметрите на катодна защита

Въз основа на направената касификация на методите за измерване и контрол на корозионните показатели в глава пета са изведени тенденциите в разработване на датчици и е синтезиран алгоритъм за прозводството на датчик. От направения преглед се установи, че най-евтини и надеждни са датчиците на резистивен и капацитивен принцип.

V. 1. Тенденции в изработването на датчици, обслужващи системите за катодна защита на подземни тръбопроводи

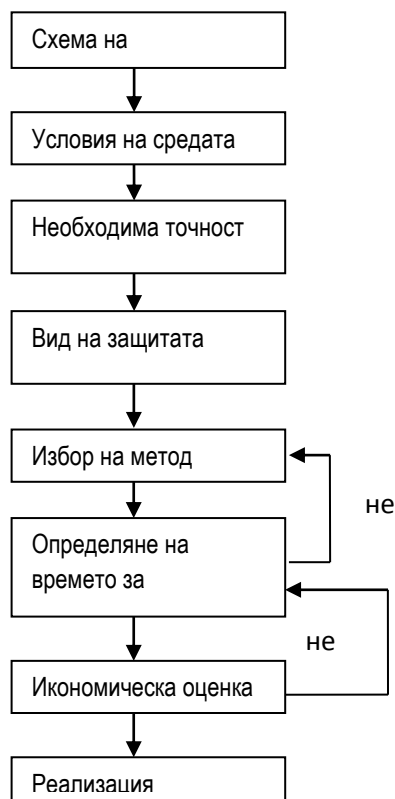
Въз основа на направения анализ контролът на датчиците в системите за катодна защита се развиват в следните насоки:

- GPS системи за подаване на информацията;
- Компютърна обработка на данните, като обикновено процесорът е на разстояние;
- Ниски материални капиталовложения;
- Стремех към ниски материални и енергийни загуби и консумативи;
- Съвместяване на няколко датчика в едно устройство;
- Едновременно следене на процесите на корозия на два или повече обекта– например проводници и тръби;
- Работа на датчиците съвместно с компенсиращи устройства с цел понижаване на грешката;

- Изработване на станциите за катодна защита така, че да се спазват правилата за безопасност на живота на обслужващия персонал;
- Усъвършенстване на влаганите материали с цел повишаване на точността на работа и понижаване на материалните капиталовложения;
- Използване на импулсно захранване с цел намаляване на зашумяването;
- Поставяне на защитни покрития по повърхността на датчици и електроди с цел повишаване на периода на работа;
- Внедряване на различни дизайнерски решения в оформлението на датчиците и електродите с цел повишаване на точността на измерване и повишаване на живота на датчиците.

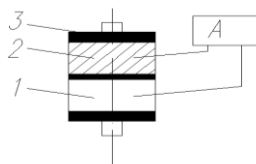
V. 2. Алгоритъм за избор на датчик

Предлага се следния алгоритъм за изработването или избор на датчик.



V.3. Датчик на корозия галваничен елемент

Въз основа на направените изводи в дисертацията се поставят цели за разработването на датчик, работещ на резистивен принцип, изработен от материал съобразен с метала на защитаваната структура и осъществяването на система за дистанционно наблюдение.



Фиг. V.1 Датчик на корозия – галваничен елемент

- Катоден електрод (форма на диск)- 1 от мед;
- Аноден електрод 2 (форма на диск) - изпълнен от стомана или чугун в зависимост от материала, от който е изработено изследваното съоръжение.

За провеждане на експеримента са изработени три датчика с размери на шайбите 20 мм диаметър и 5 мм дебелина. Те са поставени в различни корозионни среди, съответно - разтвор на NaCl 15%, NaCl 18% и в почва. Почвата е киселинна (велинградски регион), а избраните концентрации на NaCl имитират условията на Черно море.

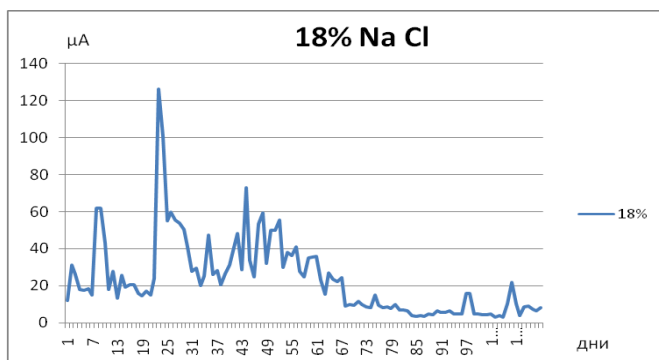
При обработването на резултатите от проведения експеримент са измерени следните стойности на тока за трите датчика (фигури V. 2, 3 и 4)



Фиг. V.2 Промяна на тока на образеца в почва

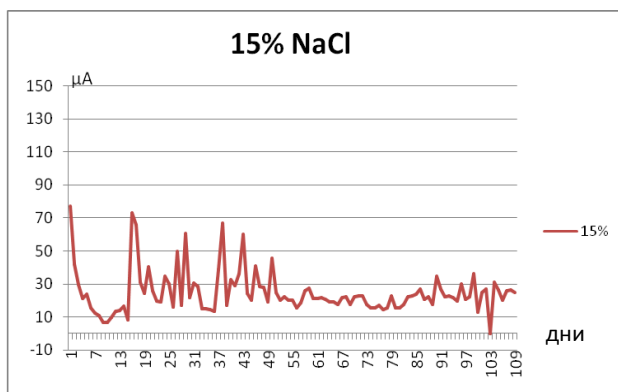
Стойността на тока на датчика в почвата показва слаба промяна. Има трайна тенденция за намаляване на стойността му. Причината за колебанията на измерените стойности е промяна на влажността на почвата и развитието на неравномерна корозия по повърхността на анода.

Стойността на тока в датчика потопен в 18% разтвор на NaCl също намалява. Пиковите могат да се обяснят и с промяна на температурата (фиг. V.3).



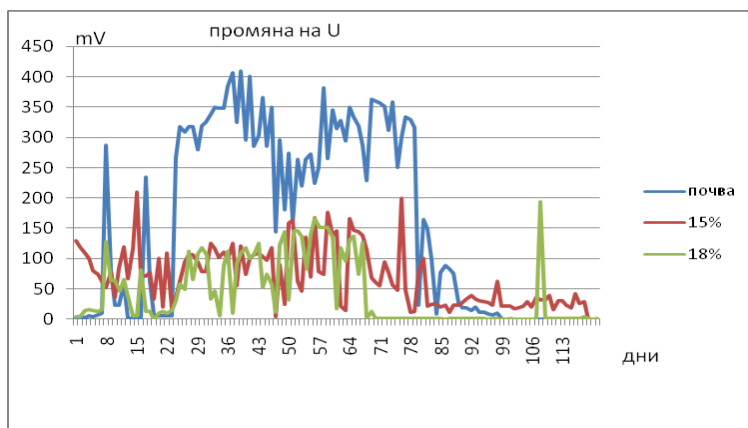
Фиг. V.3 Промяна на тока в разтвор от 18% на NaCl

Най-нестабилни са стойностите на тока на датчика третиран с 15% разтвор на NaCl. И в този случай се забелязва тенденция към намаляване на стойността на тока (фиг V.4).



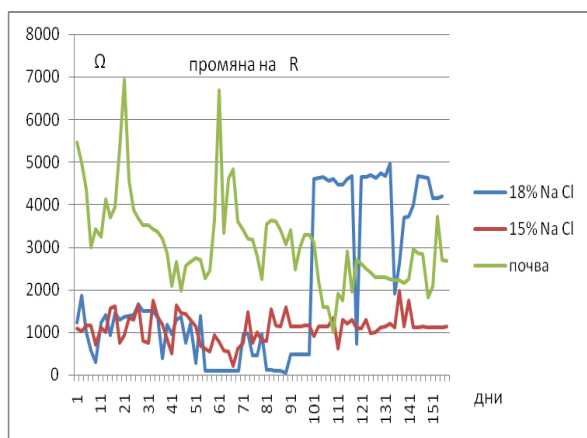
Фиг. V.4 Промяна на тока в разтвор от 15% на NaCl

Стойностите на напрежението между двата електрода остават сравнително постоянни за част от периода на провеждане на изследването, а след това те намаляват (фиг. V.5). Резкият спад се обяснява с образуването и последващо отделяне на оксид от повърхността на шайбата на датчика.



Фиг. V.5 Промяна на напрежението

Стойностите на измереното съпротивление между електродите на датчика имат колебания, но се наблюдава постоянна средна стойност. Причина за колебанията е отделянето на оксид от повърхността на анода. При този процес рязко се повишават стойността на тока, пада на напрежението, но тяхното отношение остава относително постоянно. Ето защо стойността на съпротивлението не се променя в широки граници (фиг. V.6). Единствено съпротивлението на датчика третиран в по-концентрирания разтвор се повишава, поради отделяне на по-голямо количество окис.



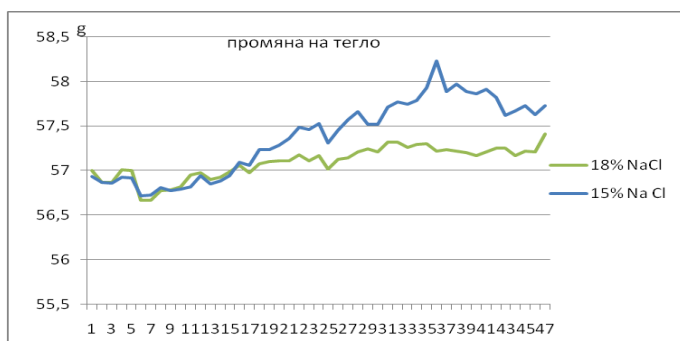
Фиг. V.6. Промяна на съпротивлението

От графиките се вижда, че в началото на изследването има пикове в стойностите на измерваните величини. Това се обяснява с образуването на оксиден слой. Измерваните величини се влияят и от промяната на условията на околната среда. Например на 12 януари и 10 февруари 2009 година стойностите и на трите величини са много високи – има пик. В тези дни температурите са били ниски.

От направения експериментален анализ може да се обобщи следното:

1. С намаляване на стойността на тока расте корозията по образеца.
2. За точното установяване на нарастване на корозията по датчика е удачно да се следи не само токът, но поне още една електрическа величина, например съпротивлението, което зависи много от условията на средата.
3. Най-големи колебания при следене на нарастването на оксидиращия слой по образеца показват стойностите на измерваното напрежение.
4. В резултат на разгледаните експериментални данни от измерването като основна следена величина за определяне на корозията е промяната на големината на тока, защото има най-стабилна тенденция на промяна.
5. За доказване на достоверността на резултатите от измерването е нужно да се направят сравнителни анализи с металографски и тегловен анализ.

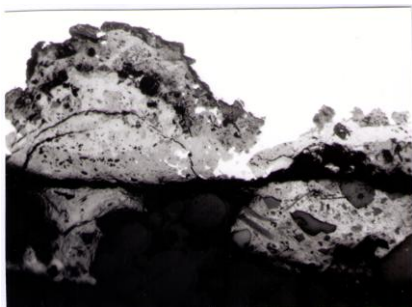
Стойностите на промяна на теглото са дадени на фиг. V.7.



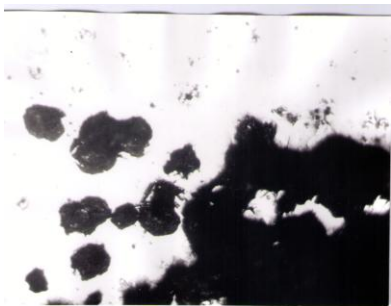
Фиг. V.7 Промяна на теглото на образца

При повишаване на стойността на съпротивлението следва да се наблюдава намаляване на теглото на образците. Това може да се обясни с отделянето на окисния слой, което променя електрическите параметри на образца. Повишаването на теглото на образца е в резултат на натрупване на окисен слой. Отношението между напрежението и тока се запазва и следователно стойността на съпротивлението също не се променя. С наличието на повишен оксидиран слой може да се обясни нелогичната промяна на стойностите на електрическите величини, тъй като той има различно съпротивление.

Наличието на защитен (пасивиращ) слой се доказва с термоелектричен фазов анализ. При фазовия анализ са сравнени стойностите на потенциала на метала U_a за некорозирал образец и за корозирал (третиран) образец. Въз основа на анализа се установи, че за нетретираната стомана съществува нехомогенност на материала по дължина. Няма различия и промяна на фазов състав и структура. При третираната стомана се наблюдава спад в стойността на U_a . Вероятно, сред третирането, под окислената повърхност също е образуван хомогенен по дебелина и състав слой. Паралелно с фазовия анализ е направено и металографско изследване. То показва развитието на обща неравномерна, питингова и стрес корозия (фиг. V.9, V.10, V.11, V.12).



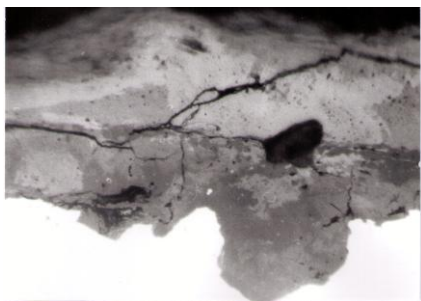
Фиг. V.9. Неравномерна корозия



Фиг. V.10. Питингова корозия

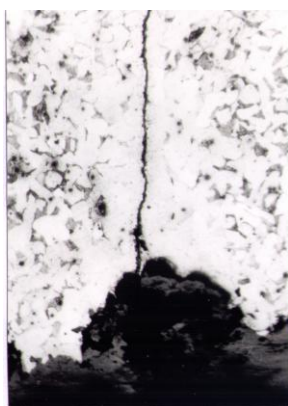
На места по повърхността на стоманата се вижда развитие на питингова корозия, а на други и пукнатини, както предполагат резултатите от фазовия анализ.

Пукнатините са хоризонтални и вертикални навътре в материала. На следващата фигура има показана пукнатина по повърхността на образца.



Фиг. V.11. Стрес и неравномерна корозия.

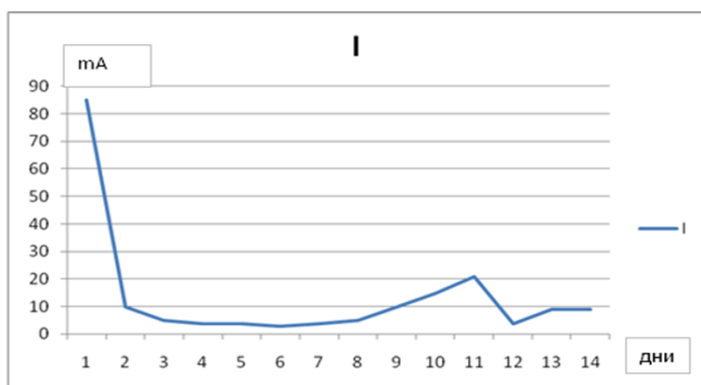
На фиг. V. 12 е показана и пукнатина във вътрешността на метала (стрес корозия). Това е една от най-опасните видове корозии.



Фиг. V. 12. Стрес корозия в дълбочина.

На илюстрираните фигури от металографското изследване се вижда неравномерното навлизане в оксидиращия слой. При този начин на оксидиране резултатите получени от електрическото измерване не дават пълна картина на процеса на развитие на корозия в случай на почви с високо съдържание на хлорни йони.

Датчикът е изследван и в 20% разтвор на H_2SO_4 (процесът е водородна деполяризация и се очаква равномерна корозия) с датчик – галваничен елемент, като единият диск е изработен от стомана ASTM A106 GRB, материалът, от който се правят повечето тръби за пренос и дистрибуция на нефт и газ. Тенденцията на промяна на електрическите величини е аналогична на предходните измервания (фигури V.13, V.14, V.15), но без колебания в стойността на тока. На фиг. V. 13. е показана тенденцията на промяна на тока.



Фиг. V. 13 Промяна на тока в 20% разтвор на H_2SO_4

За изследване на поведението на стоманата ASTM A106 GRB в корозионна среда паралелно с описаните образци е изследвана същия тип стомана според Делахей по метода на волтамперометрия при зададена сила на тока [111]. Чрез него се определят характеристиките и поведението на материала в използваните при опита среди.

Резултатите от измерването показват, че при постоянно поддържане на стойността на тока се повишават стойностите на съпротивлението и напрежението (фигури V.14 и V.15).



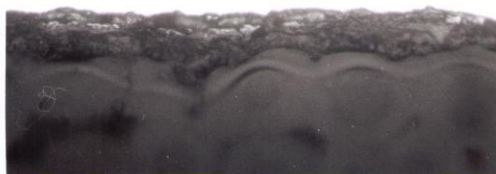
Фиг. V.14 Промяна на напрежението при волтамперометрията



Фиг. V. 15 промяна на съпротивлението при волтамперометрията

Количеството на отнетия от образца материал в мм много точно отразява повишението на съпротивлението. Съотношението е 0.02 мм за 1 mV, което прави 0.34 мм намаление на дебелината на материала. Толкова е измерено намалението на дебелината на стената на изследвания образец - тръба.

При металографското изследване на корозия на такъв материал в 20% разтвор на сярна киселина е даден следният резултат, което показва, че този материал е подходящ за изработването на датчик, галваничен елемент (фиг.V.16). При фазовия анализ се забелязва получаването на тънък дифузен слой с дебелина няколко ангстрема. Той показва обедняването на стоманата в тази зона. От фазовия анализ се вижда получаването на тънък оксидиращ слой, който играе ролята на пасивиращ слой и показва корозионната устойчивост на хромовите неръждаеми стомани.



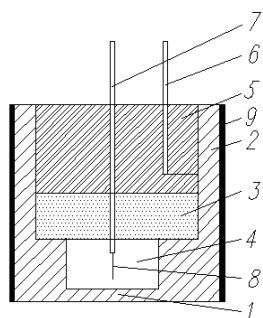
Фиг. V. 16. Равномерна корозия.

На фигурата се вижда равномерен оксидиращ филм, което доказва развитието само на равномерна корозия в този вид стомана. С това се доказва, че датчикът галваничен-елемент отчита точно равномерна корозия, а материал за неговото изработване трябва да е материалът на изследвания тръбопровод.

Предложеният датчик не отчита питингова и стрес корозия. Това наложи да се проектира датчик, който отчита развитието на неравномерна питингова или стрес корозия.

V. 4. Датчик за контрол на степента на локална корозия.

Датчик за контрол на степента на локална корозия.



Фиг. V.17. Датчик за отчитане на локална корозия

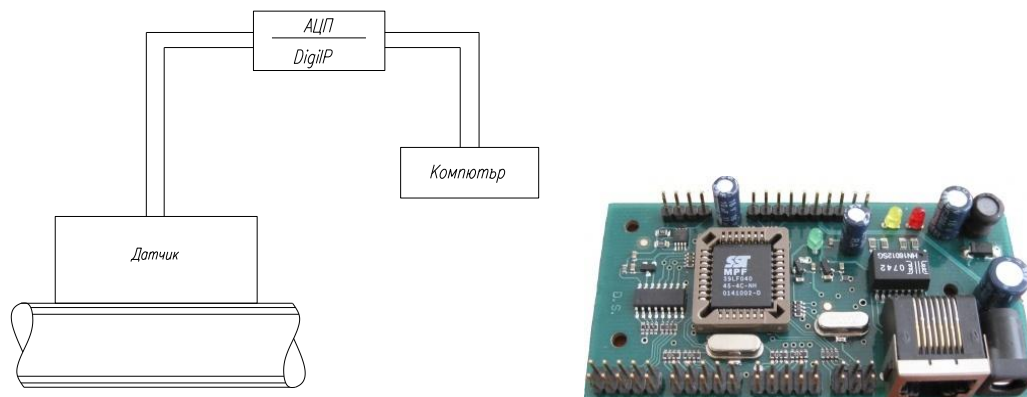
- Работна част 1 на корпуса 2. Дъното 1 на работната част на датчика е по-тънко, отколкото останалата му част;
- Неработна външна цилиндрична повърхност на корпуса 2, защитена с изолационно покритие 9;
- Кухина на корпуса 4. Запълнена е с капилярно-порест материал;
- Непроводима твърда тапа 3;
- Част от кухнята на корпуса 2 под тапата 3 е херметизирана с непроводяща твърда маса 5;

- През тапата 3 и херметизатора 5 преминава изолиран проводник 7, скритият край на който в пълнителя 4 служи за електрод 8 (от меден или алуминиев проводник);
- Проводникът 6 е включен към тестваното съоръжение (което не е показано на фигурата) и към корпуса 1 посредством проводник 7;

Разработените образци са с дебелина на дъното 1, 2, 3, 4 мм за стоманени дъна и съответно - 1, 2, и 4 мм за алуминиеви дъна. Образците са изследвани в разтвор на Na Cl 15% в лабораторни условия.

V. 5. Система за измерване с използване на резистивен датчик и предаване на данните на разстояние

Направена е и система за дистанционно измерване на поведението на датчика, която се състои от датчик, АЦП модул и компютър.



Фиг. V.18. и Фиг. V.19 Система за дистанционно отчитане и АЦП DigilP Универсален модул за наблюдение, автоматизация и контрол

ADC values		Threshold		Hyst		Others				Description
Curr	Refresh	Low	High	Low	High	Mode	SNMP trap	to GPIO	relay	
899	1	200	500	5	5	Low/High	☒	☐	☒	max 14 ch.
510	10	2	2	2	7	Acc	☐	☒	☐	channel 1
0	0	0	0	3	6	Low	☐	☐	☐	channel 2
0	0	0	0	4	5	Low	☐	☐	☐	channel 3
0	0	0	0	5	4	Low	☐	☐	☐	channel 4
0	0	0	0	6	3	Low	☐	☐	☐	channel 5
0	0	0	0	7	2	Low	☐	☐	☐	channel 6
0	0	0	0	8	1	Low	☐	☐	☐	channel 7
0	80	0	0	8	1	Low	☐	☐	☐	channel 8
SetRefresh		SetThr		SetHyst		SetMode				SetDescr

Фиг. V.20 Панел за настройка

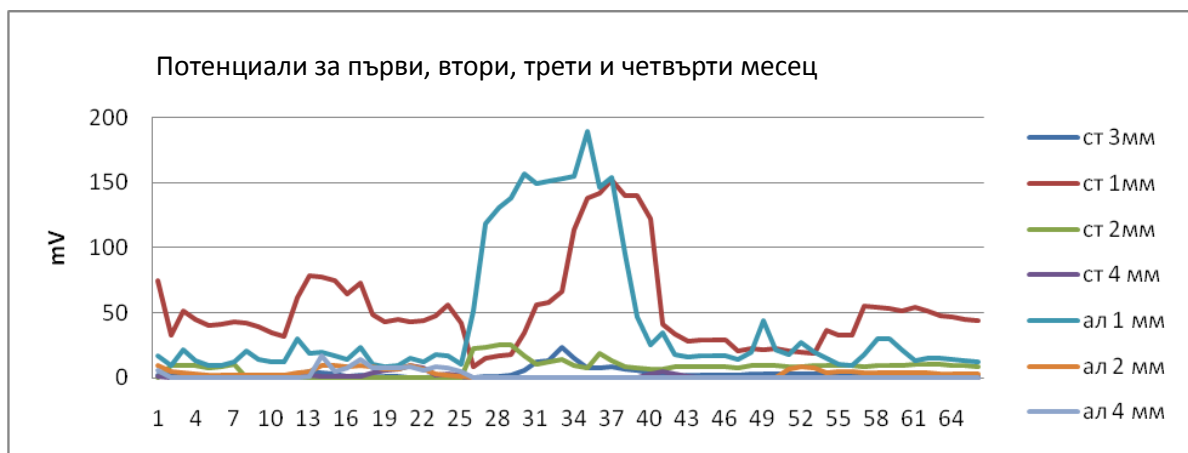
Предложеният начин на измерване и обработка на данните е съобразен със съвременните тенденции в проектирането и производството на сензорни устройства. При подобряване на параметрите на тези системи могат да се постигнат следните предимства:

- Възможност за използване на GPS системи за подаване на информацията;
- Компютърна обработка на данните, като обикновено процесорът е на разстояние;
- Ниски материални капиталовложения;
- Стремех към ниски материални и енергийни загуби и консумативи;

- Едновременно следене на процесите на корозия на два или повече обекта– например проводници и тръби;
- Възможно е да се използват различни типове датчици според принципа си на работа: резистивен, магнитоиндукционен, капацитивен, магнитоелектричен, ултразвуков и радиоактивен.

Според данните от направените измервания по предложената схема се установи, че потенциалът измерван чрез АЦП и друг уред – волтметър са идентични т.е. системата с проводници от 20 см не дава отклонения.

Резултатите от измерванията са визуализирани на фигури V.21 и V.22. Заснетите и визуализирани стойности са на всеки 2 дена от експеримента.



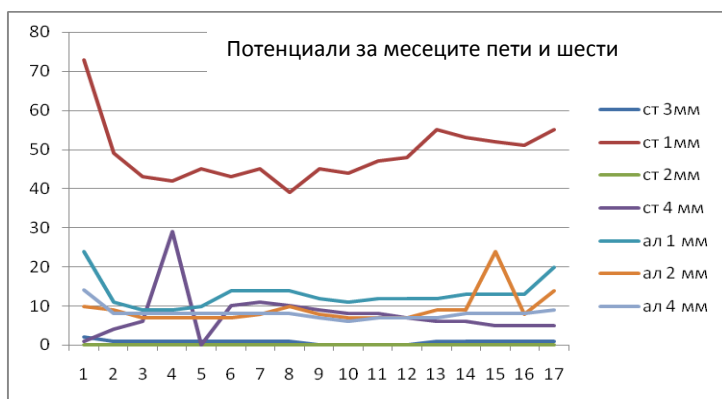
Фиг. V.21. Промяна на потенциалите за месеци първи втори, трети и четвърти

При провеждане на експеримента първо се установи пробив в дъното на датчика с най-тънко алуминиево дъно. Това е идентифицирано с рязко повишаване на стойността на потенциала. Пробиването на дъното беше видимо при стойност на потенциала 150 миливолта (това е между 8-9 стойност на фигурата).

Вторият пик е на датчик със стоманено дъно с дебелина 1 мм, което не е видимо нарушено, но явно в случая има локална корозия. Данните от промяна на потенциалите на образеца през следващите месеци имат колебания с ясно изразена тенденция към понижаването му, което също доказва пробив.

На графиката се виждат леки пикови стойности на потенциала на разглеждания образец, като постепенно те спадат, но те не достигат стойностите от предишната фигура. Може да се направи изводът, че при пробив на дъното на датчика могат да се очакват леки колебания на потенциала, но стойността му не достига тази при пробив.

Стойностите на потенциалите на останалите образци остават сравнително постоянни. Колебанията на другите канали на измерване могат да се коментират с промяна на условията на средата – промяна на температура, концентрация на разтвора. При измерването на потенциалите за месеците юни и юли 2009 година не се наблюдава рязка промяна в стойността на потенциалите. Може да се заключи, че активност и пробив на дъна на датчици липсват.



Фиг. V.22 Потенциали за месеците пети и шести

На фона на постоянните ниски стойности скокът в стойността на напрежението на датчика с алуминиево дъно 2 мм показва пробив. Същото се отнася и за датчика със стоманено дъно 4мм, който е потопен в по-агресивен разтвор.

Стойностите на потенциалите остават сравнително постоянни, от което може да се направи изводът, че липсват пробиви в дъната на образците.

Предложената система може да се прилага за всеки тип датчици, които имат като изходящ аналогов сигнал напрежение. Ако те дават на изхода си друга величина то трябва да се направи приставка пред АЦП, която да преобразува този сигнал в напрежение. Реализираната система за дистанционно измерване е точна, евтина, приложима за дълги и къси транспортни мрежи, бързодействаща за условията на корозионните измервания, гъвкава – може да се променят настройките при промяна на изискванията и параметрите на системата.

С предложените модели на датчици може да се следи нивото на корозия при защитаван или незащитаван тръбопровод. При показания за началото на корозионен процес се препоръчва промяна на параметрите на защитния ток на катодната защита. За сега това може да се осъществи чрез намесата на диспечер. Предстои да се създаде приложение към съществуващия софтуер, чрез което сигналите предадени от измервателната система да служат като входни данни за определяне на стойността на защитния ток.

Изводи от глава пета:

Въз основа на литературен обзор е избран метод за измерване и е са изработени и изследвани датчици за отчитане на равномерна и неравномерна корозия. Направена е дистанционна система за измерване, позволяваща управлението на параметрите на катодната защита в реално време.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И НАСОКИ ЗА БЪДЕЩА РАБОТА

В дисертацията са разработени методика за определяне на скоростта на корозия при наличие на дефекти в изолацията и методика за разпределението на тока на дълбочина в почвата. Синтезиран е алгоритъм и е написан софтуер за изчисляване на параметрите на катодната защита. Дадени са предложения за системи за контрол на състоянието на подземните тръбопроводи. Задачи за бъдеща работа:

1. Създаване на методика за определяне на живота на анода при храняване на анода в няколко точки в условията на почвен слой с ниско специфично съпротивление в многослойна почвена структура.

2. Разработване и изследване на сензори, работещи и на друг принцип, освен резистивния.
3. Синтезиране на алгоритъм за изчисляване на цялостна катодна защита с параметри на катодна станция, осигуряващи висок КПД.
4. Създаване на методика за разработване на автономни източници на ток.
5. Теоретично изследване на разпределението на тока и потенциала по дължината на защитаваното подземно съоръжение в линии с нееднородни, променящи се параметри, каквито са газопреносните линии.
6. Създаване на система за лесно определяне на зоните, в които да се прилага само пасивна защита, която е значително по-евтина от активната защита.
7. Създаване на софтуер за включване на данните от измерване на нивото на корозия за определяне на големината на изходния ток в системата за катодна защита.

ПРИНОСИ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Създадени са методики за определяне на скоростта на корозия при наличие на блуждаещи токове и определяне на скоростта на развитие на равномерна и неравномерна корозия.
2. Изведен е израз за определяне на относителната плътност на тока в зависимост от разстоянието между разнополярни точковидни източници на ток и дълбочината на проникването му в земята. Предлага се опростен метод за измерване на потенциала U_{m-3} и преходното съпротивление на електрода за сравнение в почви с голямо специфично електрическо съпротивление, без използване на потенциометър. Резултатите от прилагането му са съкращаване на периода на измерване и поевтиняване на метода.
3. Създадена е методика за определяне на потенциала в точка в стационарно електрическо поле, създаден от два разнополярни линейни източника на ток и разнополярни линейни и точковиден източници на ток.
4. Въз основа на направения анализ на различните аналитични методи е разработена методика за извършване на изчисленията на R , n , коефициента на взаимно влияние между анодите, периода на служба за случаите без посочените ограничения. На базата на общите уравнения на линиите с разпределени параметри са изведени зависимости за разпределението на потенциала и на тока по дължината на защитаваното подземно съоръжение от корозия за три частни случая.
5. На базата на методиката са разработени алгоритъм и софтуер за изчисляване на катодна защита. Чрез софтуера са направени изводи за влиянието на промяната на отделни параметри от елементите на катодната защита върху живота на анода, цената на защитата и други.
6. Направена е класификация на методите за измерване и са разработени и изследвани датчици за следенето на равномерна и локална корозия, което създава възможност за управление на параметрите на катодната станция в реално време. Реализирана е дистанционна система за следене на локална корозия.

ПУБЛИКАЦИИ КЪМ ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Теодора Христова **«НАБЛЮДЕНИЕ НА КОРОЗИОННОТО СЪСТОЯНИЕ НА ПОДЗЕМНИ ТРЪБОПРОВОДИ С ПОМОЩТА НА СЕНЗОРНИ УСТРОЙСТВА»** МГУ, 2008, том 51, стр. 161-165
2. Теодора Христова **„УПРАВЛЕНИЕ НА КОРОЗИЯТА НА ПЕТРОЛОПРОВОДИТЕ В УСЛОВИЯТА НА УСТОЙЧИВО РАЗВИТИЕ”** – Минно дело и геология – брой 10, 2008г. стр. 40-44
3. Стефан Стефанов, Теодора Христова **„МЕТОД ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ НА СКОРОСТТА НА КОРОЗИЯ ПО ИЗМЕНЕНИЕ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКОТО СЪПРОТИВЛЕНИЕ И ЗАГУБА НА МАСА НА СТОМАНЕНИ ОБРАЗЦИ (ДАТЧИЦИ)”** Journal of the Technical University at Plovdiv “Fundamental Sciences and Applications”, Vol. 14, 2009 International Conference Engineering, Technologies and Systems TechSys '2009, стр. 291-297
4. Стефан Стефанов, Теодора Христова **„ВЛИЯНИЕ НА ГОЛЕМИНАТА НА ДЕФЕКТА В ИЗОЛАЦИЯТА ВЪРХУ СКОРОСТТА НА КОРОЗИЯ НА ПОДЗЕМНИ ТРЪБОПРОВОДИ”** Journal of the Technical University at Plovdiv “Fundamental Sciences and Applications”, Vol. 14, 2009 International Conference Engineering, Technologies and Systems TechSys '2009, стр. 285-290
5. Стефан Стефанов, Теодора Христова, Любомир Атанасов, **„ОТНОСИТЕЛНА ПЛЪТНОСТ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКИЯ ТОК СЪЗДАДЕН ОТ ДВА РАЗНОПОЛЯРНИ ИЗТОЧНИКА НА ТОК (ЗАЗЕМИТЕЛИ) ВЪВ ФУНКЦИЯ ОТ РАЗСТОЯНИЕТО МЕЖДУ ТЯХ И ОТ ДЪЛБОЧИНАТА НА РАЗПРОСТРАНЕНИЕТО НА ТОКА В ЗЕМЯТА”**, МГУ, 2009, том 52, стр.123-128
6. Т. Христова, П. Христов Ст. Стефанов **„ДИСТАНЦИОННА СИСТЕМА ЗА СЛЕДЕНЕ НА КОРОЗИЯТА НА ПОДЗЕМНИ ТРЪБОПРОВОДИ”** – Минно дело и геология, брой 1, 2010г., стр.42-45