

**МИННО-ГЕОЛОЖКИ УНИВЕРСИТЕТ
„СВ. ИВАН РИЛСКИ” – СОФИЯ
МИННО-ЕЛЕКТРОМЕХАНИЧЕН ФАКУЛТЕТ
КАТЕДРА „ЕЛЕКТРИФИКАЦИЯ НА МИННОТО
ПРОИЗВОДСТВО”**

ПРОЕКТ НА АВТОРЕФЕРАТ

дисертация на тема:

**РАЗРАБОТВАНЕ И ИЗСЛЕДВАНЕ НА
УСТРОЙСТВО ЗА НЕПРЕКЪСНАТ КОНТРОЛ
НА ИЗОЛАЦИЯТА В
IT МРЕЖИ**

На дисертационен труд за присъждане на образователна и научна
степен „доктор”. Професионално направление:
5.2. „Електротехника, Електроника и Автоматизация”

РАДИ ПЕТКОВ ТЕНЕВ

Научни консултанти:

Доц. д-р Ангел Зъбчев
Доц. д-р Кирил Джустров

София,
2019 г.

**МИННО-ГЕОЛОЖКИ УНИВЕРСИТЕТ
„СВ. ИВАН РИЛСКИ” – СОФИЯ
МИННО-ЕЛЕКТРОМЕХАНИЧЕН ФАКУЛТЕТ
КАТЕДРА „ЕЛЕКТРИФИКАЦИЯ НА МИННОТО
ПРОИЗВОДСТВО”**

ПРОЕКТ НА АВТОРЕФЕРАТ

дисертация на тема:

**РАЗРАБОТВАНЕ И ИЗСЛЕДВАНЕ НА
УСТРОЙСТВО ЗА НЕПРЕКЪСНАТ КОНТРОЛ
НА ИЗОЛАЦИЯТА В
IT МРЕЖИ**

На дисертационен труд за присъждане на образователна и научна
степен „доктор”. Професионално направление:

5.2. „Електротехника, Електроника и Автоматизация”

РАДИ ПЕТКОВ ТЕНЕВ

Научни консултанти:

Доц. д-р Ангел Зъбчев

Доц. д-р Кирил Джустров

Научно жури:

1.
2.
3.
4.
5.

София,
2019 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от катедра "Електрификация на минното производство" при МГУ „Св. Иван Рилски” – гр. София на 6.11. 2019 г.

Авторът на дисертационният труд е докторант в катедра „Електротехника” при МГУ „Св. Иван Рилски”.

Дисертационният труд е в размер от 166 страници, 108 фигури и 16 таблици. Библиографията обхваща 107 заглавия, от които 91 на български и руски език и 16 на латиница. Във връзка с дисертационният труд са направени 4 публикации.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на.....от.....в зала пред Научно жури, назначено със заповед на Ректора на университета. Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в катедра „Електрификация на минното производство” в МГУ „Св. Иван Рилски”, както и на страницата на университета- www.mgu.bg

Съдържание

Въведение.....	6
1. Състояние на проблема	7
1.1. Влияние на електрическия ток върху човешкото тяло	7
1.2. ИТ- системи.....	7
1.3. Защитното изключване като основно средство за намаляване на пораженията от електрически ток в мините.....	8
1.2. Математически модел на поражение от електрически ток в трифазна мрежа	10
2. Начини на защитно изключване.....	18
2.1. Апаратура за защитно изключване на електросъоръжения и кабелни мрежи с променлив ток.....	18
2.1.1. Класификация на апаратурата за защитно изключване и област на нейното приложение.....	18
2.1.2. Вентилни схеми на устройства за защитно изключване....	20
2.1.3. АЗУР – кратко описание и характеристики	21
2.1.4. АЗУ-АТ-Рис	23
2.2. Устройства за контрол на изолацията BENDER.....	24
2.3. Контрол на изолацията на променливотокова еднофазна и трифазна ИТ система.....	24
2.4. Променливотокови системи с директно свързани токоизправители или мощни конвертори	27
2.4.1. Измерване с инверторно стъпало	27
2.4.2. Наредби и стандарти при установяване на изолационна повреда	28
3. Апарат за контрол на изолацията	29
3.1. Изисквания към апаратите за контрол на изолацията.....	29
3.2. Изисквания на БДС към устройства за контрол на изолацията.....	29
3.3. Принцип на действие. Блокова схема	31
3.4. Входно устройство на апарата за контрол на изолацията	31
3.4.1. Филтър на Сален и Кей.....	33
3.4.2. Пресмятане на филтърното звено.....	37
3.5. Блок Индикация	47
3.6. Пресмятане на обхвата	49
3.7. Компаратор и тригер.....	50

3.8.Изпълнително устройство	51
4.Лабораторни и експериментални изследвания	53
4.1.Изследване на филтъра на устройството за контрол на изолацията	53
4.2.Определяне на бързодействието на апарата за контрол на изолацията	55
4.3.Работа на апарата в трифазна мрежа. Лабораторни изследвания	58
5.Надеждност на апарата за контрол на изолацията	63
5.1.Самоконтрол на елементите	63
Заклучение	65
НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ	66
Публикации във връзка с дисертацията.....	67

Въведение

Развитието на минната промишленост, добиването на въглища, руди на черни и цветни метали както и на други полезни изкопаеми е свързано с нарастване на електроенергията и енергосъоръженията като цяло. Непрестанно се разширява използването на електрическа енергия, повишават се работните напрежения. Всичко това изисква и съответната електробезопасност от обслужващия персонал.

Използването на електрическа енергия в мините крие редица опасности. Това са поражения от електрически ток, пожари, взривове, токове на утечка. Ето защо на преден план излиза разработката на специални мероприятия и средства за постигане на безопасност. Ефективно средство за безопасност при експлоатация на мините се явява използването на различни видове защити при протичане на утечни токове към земята, което се осъществява със защитно прекъсване на аварирани електросъоръжения.

С развитието на механизацията и автоматизацията се е разширил и арсеналът на използваните средства за защитно изключване. Настъпили са редица изменения: нарастват мощностите на рудничните съоръжения, увеличава се напрежението, увеличава се дължината на разклонената електрическа мрежа. Всичко това изисква нова апаратура за защитно изключване основана на задълбочени научни основи. Във връзка с това, става необходимо да се изучи и влиянието на капацитета на рудничните електрически мрежи, теорията за електробезопасност, надеждността на експлоатираната апаратура за защитно изключване. Необходимо е да се разработи апаратура която да осъществява контрол върху изолацията на проводниците и да може да компенсира и капацитета на мрежата.

В последно време се появява тенденцията за разширение на понятието защитно изключване, разбираемо не само като средство за защита от електрически ток, но и като средство за защита от междуфазни съединения и защита на електросъоръженията и др.

1. Състояние на проблема

1.1. Влияние на електрическия ток върху човешкото тяло

Електрическият ток може да причини:

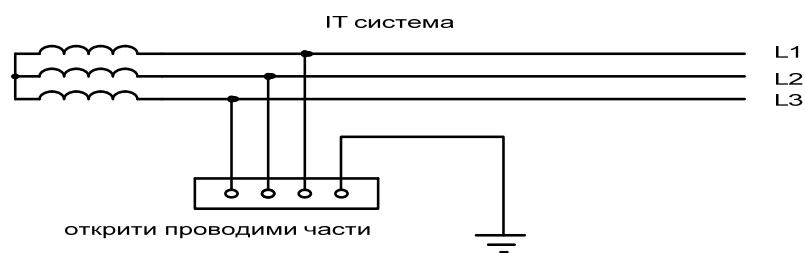
- 1) нарушения на кръвообращението, затруднения на дишането, фибриляция на сърцето;
- 2) изгаряния;
- 3) механични повреди на органите.

Повечето изследователи мислят, че най-опасни за човека са прекратяването на дишането и фибриляцията на сърцето - това е нарушение на ритъма на сърдечния мускул.

Прекъсване на дишането настъпва в резултат на продължително въздействие на електрически ток върху дихателната мускулатура, което води до нейната парализа. Фибриляция може да настъпи и при сравнително кратковременно действие на електрически ток, ако последния минава през сърдечната област.

1.2. IT- системи

На фиг.1.1 е показана схема на IT система.



Фиг.1.1. Схема на IT система

В IT-системите всички активни части са изолирани от земя или една точка е свързана към земя през достатъчно висок импеданс. Проводимите части на електрическата инсталация са заземени индивидуално или по групи. Особеното при тези системи е, че никакъв активен проводник не е свързан към земя. В случай на късо съединение към земя или към открити проводими части, токът който ще протече ще бъде много малък. Този ток зависи от стойността на изолационното съпротивление R и капацитета C на проводниците към земя.

Статистически е доказано, че най-вероятната повреда е еднофазната повреда ($p > 90\%$) и рискът от нещастен случай, дължащ се на втора повреда, е малко вероятен. В стандарта IEC60364-4-41, това е взето предвид и се препоръчва първата изолационна повреда да се отстрани във възможно най-къс срок.

1.3.Защитното изключване като основно средство за намаляване на пораженията от електрически ток в мините

Под защитно изключване се разбира бързо изключване на напрежението в електросъоръженията при наличие на повреда, например пробив в изолацията, утечка на тока към земя или към тоководещи части.

За да се реализира защитно изключване, системата трябва да е снабдена със специално устройство за бързо изключване и прекъсване на веригата за време по-малко, от допустимото за човек. Това устройство трябва да бъде снабдено с чувствителен датчик, който да контролира утечния ток към земя и при превишаване на някаква предварително зададена стойност да подаде сигнал към съответното реле, което да извърши изключването.

Статистически е потвърдено, че електротравматизма в мините възниква главно при допир на човек до една от фазите на мрежата, ето защо тялото на човека се разглежда като съпротивление на еднофазна утечка.

Времето за изключване на мрежата трябва да бъде достатъчно малко, за да не настъпят опасни последствия за здравето и живота. При напрежение на мрежата до 1000V, времето на задействане трябва да бъде не повече от 0,1s.

Изолационното съпротивление на мрежата се състои от два компонента: активно съпротивление, което е обусловено от качеството на изолационните материали, и капацитивно съпротивление, което се обуславя от това, че тоководещите части и заземените елементи се оказват разделени от изолационен слой като плочите на кондензатор.

Когато инсталацията е исправна, активното съпротивление на изолацията е голямо, но може да се намали под действието на различни фактори като влага, прах, стареене и т.н.

Капацитивното съпротивление зависи от дължината на мрежата, доколко тя е разклонена, от диелектричните свойства на използваните материали и от други фактори.

Обикновено се счита, че електрическият капацитет на мрежата зависи линейно от нейната дължина.

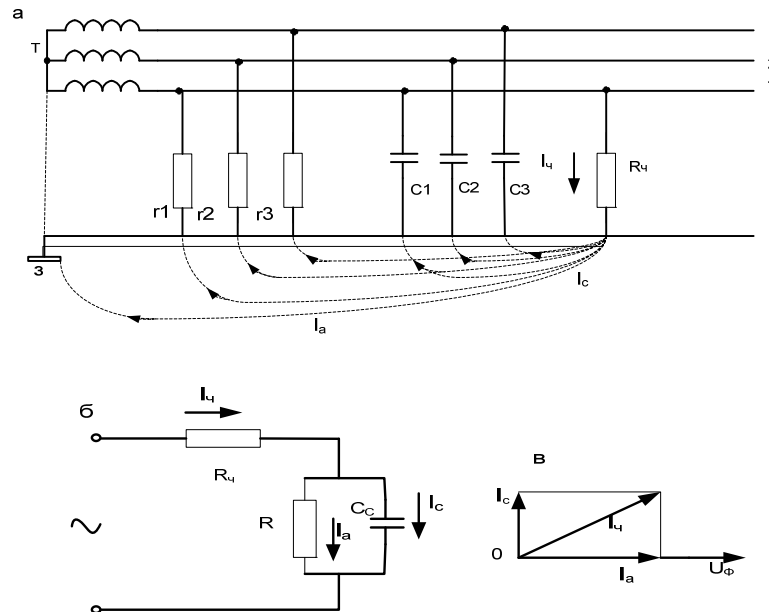
Средно може да се приеме за 1 км мрежа има общ капацитет за трите фази 1 μF . При използването на екранирани кабели тази стойност е по-голяма.

Капацитет има при всяка мрежа, дори и при напълно „исправна” такава.

Протичащият ток през тялото на човека се разглежда като съставен от две компоненти, активен ток I_a , който се образува от активното изолационно съпротивление на всички фази на мрежата, и капацитивно I_c ,

който се образува от капацитивното изолационно съпротивление на всички фази относно земя.

В мрежите с изолирана неутрала токът, който минава през човека, се увеличава, ако стойностите на активното и капацитивно съпротивление се намалят. Затова е необходимо да се ограничи намаляването на съпротивленията r и X_c (фиг.1.2).



Фиг.1.2. Роля на активното съпротивление на изолацията и капацитета на мрежата при възникване на ток през тялото на човека

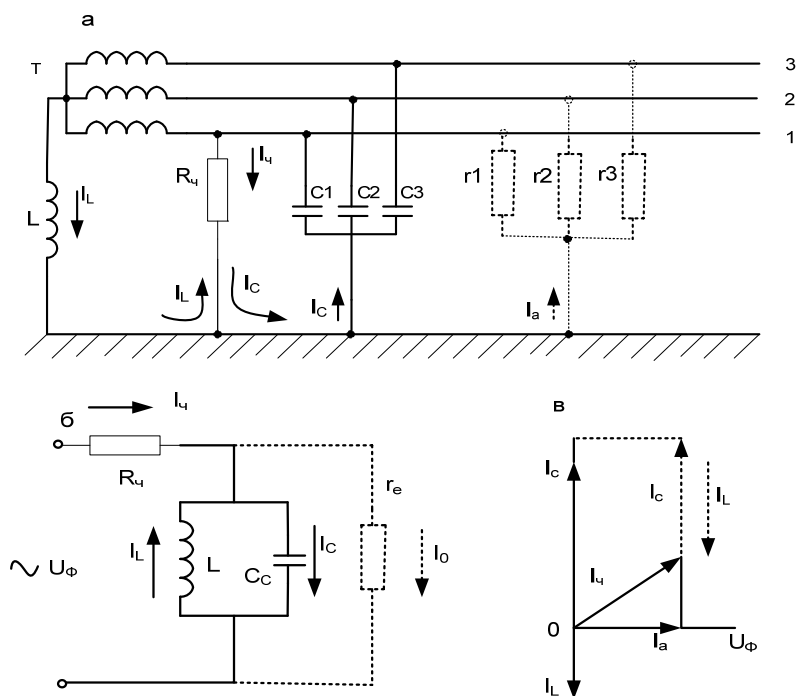
а)схема на мрежата; б) заместителна схема; в) векторна диаграма на токовете

От всичко гореизложено следва, че съпротивлението на изолация трябва да бъде достатъчно високо. Ето защо то се проверява преди монтирането, както и в процеса на експлоатация. Контролът се осъществява със специални уреди.

Освен това, активното съпротивление на изолация е необходимо да се контролира в процеса на експлоатация непрекъснато с помощта на устройства за защитно изключване.

При капацитивното съпротивление на изолация нещата стоят по друг начин. И най-изправната мрежа има някакъв капацитет, не може да се влияе върху капацитивното съпротивление освен чрез ограничаване на дължината на мрежата (капацитивното съпротивление намалява с увеличаване дължината на мрежата), или чрез така нареченото компенсиране посредством индуктивни съпротивления, които се включват между трите фази и земята или нулевата точка на трансформатора и земята.

Принципът на компенсацията е показан на фиг.1.3.



Фиг.1.3. Принцип на компенсацията на капацитетата:
 а) схема на мрежата; б) заместителна схема;
 в) векторна диаграма на токовете

1.2. Математически модел на поражение от електрически ток в трифазна мрежа

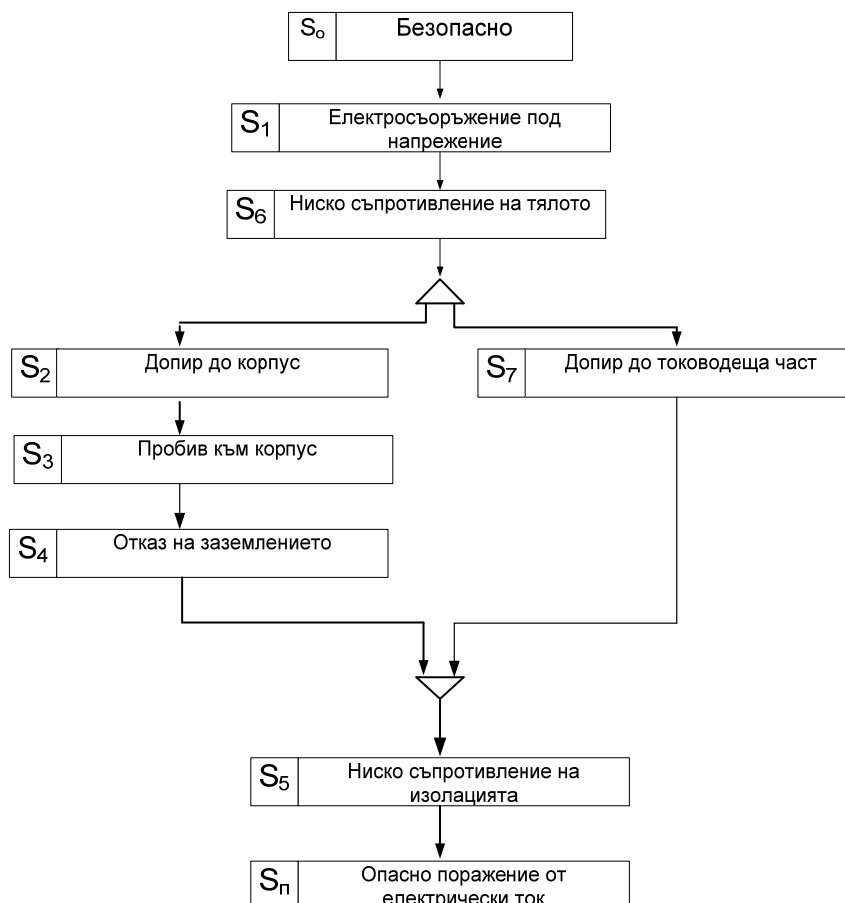
Удар от електрически ток в трифазна мрежа се случва:

- при допир на човек до токоведеща част;
- допир до корпус който е съединен с фазов проводник;
- допир до два корпуса които са съединени с различни фази.

Преходът от безопасно в опасно състояние може да се покаже с модел.

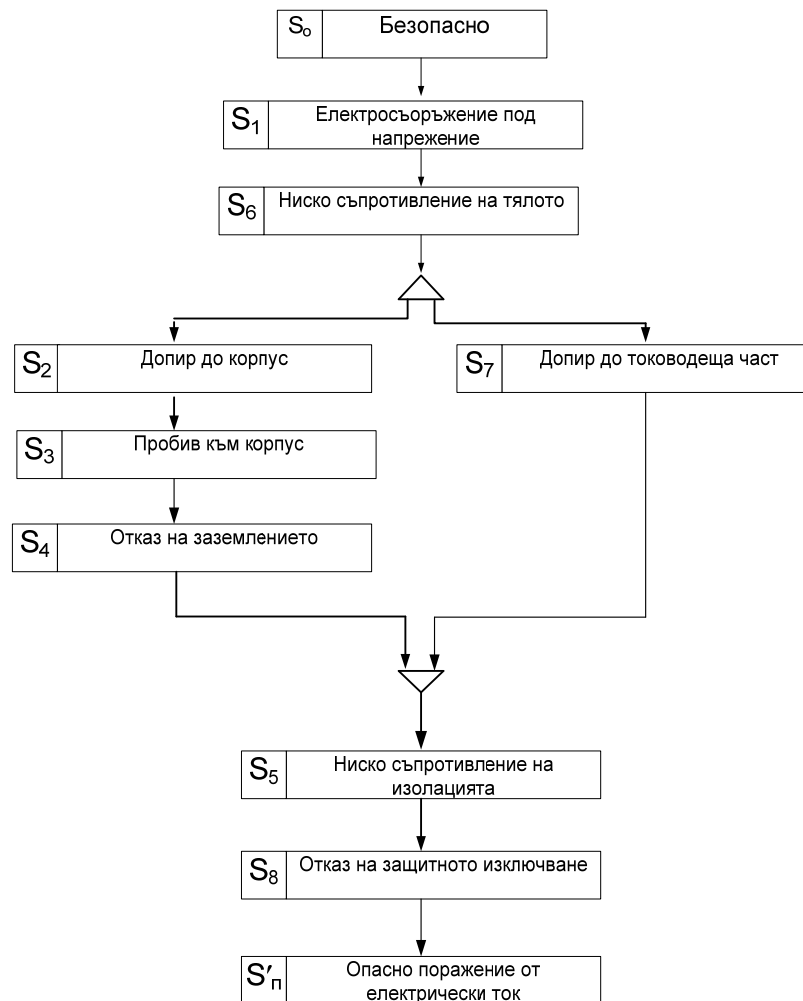
При допир на човек до токоведеща част поражението настъпва когато съпротивлението на тялото и изолационното съпротивление на съоръжението са ниски. Ако едно от тези две съпротивления не са под някаква критична стойност, човек може да се освободи от контакта с токоведеща част без опасност за здравето.

Преходът от състояние „безопасно” в състояние „опасно” може да се покаже със структурна схема. На фиг.1.4 е показана структурната схема без наличие на апарат за защитно изключване.



Фиг.1.4. Структурна схема на поражение от електрически ток за електросъоръжение, захранващо се от трансформатор с изолирана неутрала, при отсъствие на защитно изключване

Когато е налице пробив към корпус (опасно състояние S_3), условията за опасност възникват едновременно с другите опасни състояния - допир на човек до корпус (опасно състояние S_2), прекъснатата верига на заземлението (опасно състояние S_4), ниски съпротивления на човешкото тяло и изолацията (опасни състояния S_6 и S_5). На фиг.1.5 е показана структурната схема при наличие на апарат за защитно изключване.



Фиг.1.5. Структурна схема на поражение от електрически ток за електросъоръжение, захранващо се от трансформатор с изолирана неутрала, при използване на защитно изключване, обезпечаващо защита при допир до корпус и до тоководеща част.

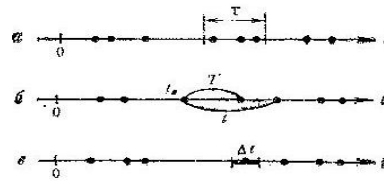
При използването на апарат за защитно изключване към схемата с опасните състояния се добавя още едно - отказ на защитно изключване (S8).

Допуска се, че параметрите на защитното изключване са идеални т.е. бързодействието и чувствителността гарантират безопасност на човека, а отказът прекъсва защитните функции.

Опасното състояние S₈ в структурната схема заема съответното място според принципа на действие на защитното изключване. То намира място в общата структурна схема в „ствола на дървото” (фиг.1.5).

Структурните схеми се преобразуват във вероятностни схеми с въвеждането на вероятности за опасните ситуации за всяко описано състояние.

Опасните състояния и случайни събития следват едно след друго в случайни моменти от време и могат да се разглеждат като потоци от случайни състояния и събития. Представени са на фиг. 1.6.



Фиг.1.6. Графично представяне на времеви интервал

Вероятността за попадане на събитие в участък от време σ се изразява с формулата:

$$Q_m = \frac{a}{m!} e^{-a} \quad , \quad (1.1)$$

където $a = \lambda t$ е средната стойност на събитията в участъка σ . При $m=0$ за вероятността се получава:

$$Q_0 = e^{-\lambda t} \quad . \quad (1.2)$$

Вероятността за попадане на поне едно събитие от потока върху участък t в близост до точка t_0 (фиг. 2.3.б) е формулата:

$$F(t) = 1 - Q_0 \quad . \quad (1.3)$$

Законът за разпределение в интервала от време T между съседни събития в потока се изразява с функцията:

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (t > 0) \quad . \quad (1.4)$$

Плътноста на разпределение на случайната величина T е:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad . \quad (1.5)$$

Математическото очакване на случайната величина T (средно значение):

$$m(t) = \frac{1}{\lambda} \quad . \quad (1.6)$$

Дисперсията на T :

$$Dt = \frac{1}{\lambda^2} \quad (1.7)$$

Средното квадратично отклонение на случайната величина T :

$$\sigma_t = \sqrt{Dt} = \frac{1}{\lambda} \quad (1.8)$$

Вероятността за попадане на опасно състояние в участък от време зависи от дължината на участъка и не зависи от разположението на този участък по оста $0t$.

Потокут от опасни събития в голям интервал от време е еднороден, т.е. плътността на потока от събития за единица време остава постоянен. Така вероятностните характеристики на потока не се променят в зависимост от времето и са еднородни по време.

- При голям отрязък от време потоците на опасните състояния и събития могат да се разглеждат като еднородни. Приема се че плътността на потока от събития или интензивността - средно число на събитията за единица време е постоянна. Така вероятностните характеристики на потока не се променят във времето и се явяват еднородни.
- Потоците нямат закономерен характер и средната стойност на събитията, попадащи в единичен участък от време, остава постоянна за целия разглеждан период и могат да се приемат за стационарни.
- Електротравмите и опасните състояния възникват в последователни моменти от време независимо един от друг и се приемат за потоци без последствие.
- Анализът на електротравматизма показва, че пораженията от токови удари не са групово явление. Вероятността за попадане на два или повече случаи в елементарен участък от време е безкрайно малка в сравнение с вероятността за един случай. За модела се допуска събитията да са ординарни.

Наличието на трите свойства за потока - стационарност, без последствие и ординарност, го класифицират като елементарен (поасонов) поток.

Средната аритметична на събитията за единица време е const както и плътността на входящия поток е const - $\lambda = \text{const}$

Вероятността за събитие от поток в участък Δt фиг.2.3 е:

$$Q_1(\Delta t) \approx 1 - Q_0(\Delta t); \quad (1.9)$$

$$Q_0(\Delta t) \approx e^{-\lambda \Delta t}; \quad (1.10)$$

$$Q_1(\Delta t) \approx 1 - e^{-\lambda \Delta t} . \quad (1.11)$$

За практиката при разлагане на $e^{-\lambda \Delta t}$ се приема, че е пренебрежимо малка стойност и

$$Q_2(\Delta t) \approx \lambda \cdot \Delta t . \quad (1.12)$$

Вероятността за поява на опасно събитие от електрически удар или опасно състояние в елементарен участък от време Δt е приблизително равна на произведението от интензитета на потока λ и стойността на времевия интервал Δt .

Всяка опасна ситуация е характеризирана със своята вероятност при възникването на съответното събитие. Въвеждат се следните обозначения:

Q_1 - вероятност електросъоръжението да е под напрежение за разглеждания период от време;

Q_2 -вероятност човек да се допре до корпус;

Q_3 -вероятност от пробив към корпус;

Q_4 -вероятност от отказ на заземлението (прекъснат заземителен проводник);

Q_5 -вероятност от ниско изолационно съпротивление на мрежата;

Q_6 -вероятност от ниско съпротивление на човека и опасно физиологично състояние;

Q_7 -вероятност от допир до тоководеща част;

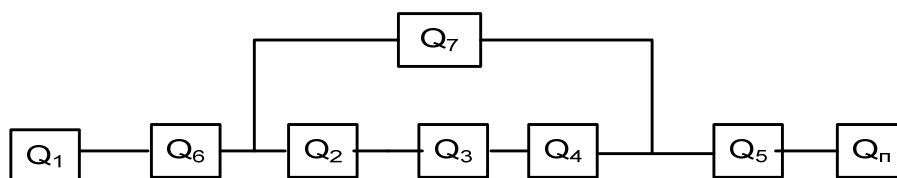
Q_8 -вероятност от отказ на защитното изключване;

Q_{Π} -вероятност от поражение на човек от електрически ток при отсъствие на защитно изключване;

Q'_{Π} -вероятност от поражение на човек от електрически ток при наличие на защитно изключване.

Всички вероятности са функции на времето и се описват с формулите (2-28,2.29).

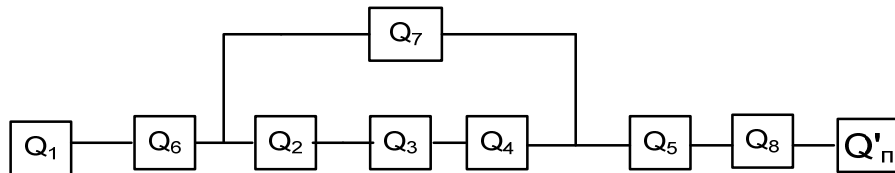
Структурната схема от фиг.1.4 се трансформира във вероятностна схема показана на фиг.1.7.



Фиг.1.7. Вероятностни схеми за поражение от електрически ток за електрически съоръжения, захранвани от трансформатор с изолирана неутрала без защитно изключване

При някои вероятности в случай на използване на защитно изключване имат друго значение, отколкото при неговото отсъствие.

Например, ако се използва защитно изключване, което по своя принцип на действие реагира на изолационното съпротивление на електрическата мрежа, то вероятността за допир до корпус и ниско изолационно съпротивление е по-малко от аналогичните вероятности за случая, когато не се използва защитно изключване. Структурната схема от фиг.1.5 е трансформиран във вероятностна схема на фиг.1.8.



Фиг.1.8. Вероятностни схеми на поражение от електрически ток за електросъоръжения, захранвани от трансформатор с изолирана неутрала при използване на защитно изключване обезпечаващо защита от допир до корпус и тоководещи части

Математическият модел за вероятност от токов удар се базира на общата вероятност на групата от събития, последователно разположени в схемата и едно след друго с логическа операция „И“, изчислена по теоремата за умножение на вероятностите.

Общата вероятност на групата събития, разположени в схемата успоредно, се пресмята с логическа операция „ИЛИ“ по схемата за сумиране на вероятностите.

Теоремата за умножение на вероятностите е:

$$Q(\prod_{i=1}^n S_i) = \prod_{i=1}^n Q(S_i) . \quad (1.13)$$

А теоремата за събиране на вероятности е:

$$Q(\sum_{i=1}^n S_i) = \sum_i Q(S_i) - \sum_{i,j} Q(S_i S_j) + \sum_{i,j,k} Q(S_i S_j S_k) + (-1)^{n-1} (S_1 S_2 S_3 \dots A_n) . \quad (1.14)$$

Вероятността за протичане на две независими събития А и В е произведението от двете събития:

$$Q(AB) = Q(A) \cdot Q(B) . \quad (1.15)$$

Ако се приложи горната формула при използването на защитно изключване, реагиращо на изолационното съпротивление и допир до корпус, се получава:

$$Q'_5 = Q_5 \cdot Q_8 ; \tag{1.16}$$

$$Q'_2 = Q'_2 \cdot Q_8 .$$

Общата вероятност за групата събития при липса на защитно изключване в мрежата съгласно фиг.2.4 е:

$$Q_{\text{п}} = Q_1 Q_6 Q_5 [1 - (1 - Q_2 Q_3 Q_4)(1 - Q_7)] \tag{1.17}$$

Общата вероятност за групата събития при наличие на защитно изключване по фиг.2.5 е:

$$Q'_{\text{п}} = Q_1 Q_6 Q_5 Q_8 [1 - (1 - Q_2 Q_3 Q_4)(1 - Q_7)] \tag{1.18}$$

Обект на настоящият труд е апарат за непрекъснат контрол на изолацията в IT мрежи.

Предмет на дисертацията е свойството защитно изключване на апарата.

Целта на дисертационният труд е да се разработи и изследва устройство за непрекъснат контрол на изолацията в IT мрежи и да отговаря на изискванията на БДС. За реализирането ѝ трябва да бъдат решени следните **задачи**:

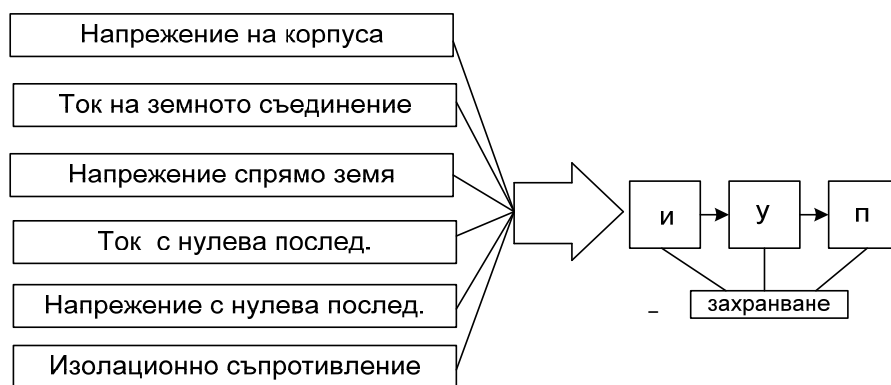
1. Анализ на съвременното състояние на проблема.
2. Оценка на методите.
3. Моделиране на характеристики на апарата.
4. Провеждане на теоретични и експериментални изследвания на апарата.

2. Начини на защитно изключване

Защитното изключване е система за защита, която обезпечава бързо изключване на мрежата или отделни нейни участъци при понижаване на съпротивлението на изолация под предварително установена граница, а така също и при офазяване на корпус или допир на фаза към земя.

В IT мрежите защитното изключване изпълнява и следната задача - изключва мрежата от напрежението при допир на човек до някоя от фазите, което се явява най-честата причина за поражение от ток при съоръженията захранвани с напрежение до 1000V.

Фиг.2.1 показва величините, които се използват за определяне на опасните ситуации. Ако защитното изключване използва една от тях, се нарича еднофакторна, при две – двуфакторна и т. н.



Фиг.2.1. Величини които се използват за регистриране на опасни ситуации

Устройствата за защитно изключване трябва да са чувствителни, бързи, надеждни и селективни, като първите две: чувствителност и бързодействие са определящи за работата на защитното изключване, тъй като степента на поражение от електрически ток върху човека зависи главно от два фактора: големина на тока и времето, за което той протича през човека.

2.1. Апаратура за защитно изключване на електросъоръжения и кабелни мрежи с променлив ток

2.1.1. Класификация на апаратурата за защитно изключване и област на нейното приложение

В практиката съществуват голямо количество устройства, осъществяващи защитно изключване. Според устройството и принципа на

действие на електрическите схеми те могат да се класифицират по следния начин:

- 1) реагиращи на напрежение с нулева последователност;
- 2) реагиращи на ток с нулева последователност;
- 3) работещи с постоянен ток, получаван от допълнителен източник;
- 4) работещи с постоянен ток, получен от вентилни схеми от силовата мрежа;
- 5) основани на контрола на изолацията с постоянен ток и едновременно реагиращи на ток и напрежение с нулева последователност;
- 6) работещи с променлив ток, чиято честота се различава от честотата на тока в мрежата.

При устройствата, реагиращи на напрежение или ток с нулева последователност, се използва принципа на възникване на напрежение или ток с нулева последователност, в случая несиметрия на проводимостите на фазите на мрежата относно земя. За датчици се използват трансформатори на напрежение (или ток) с нулева последователност.

При устройствата, работещи с постоянен ток, получен от допълнителен източник или изправен от мрежата с вентилни схеми, се използва принципа за контрол на изолацията на постоянният ток, наложен на тоководещите части на работещата мрежа.

Като датчици в тези устройства се използват елементи с релеен ефект, чувствителни към постоянния ток, протичащ през изолацията на мрежата към земя, или към съпротивлението на изолацията на мрежата към земя.

В комбинираните устройства намират приложение обикновено и двата принципа на контрол на изолацията с постоянен ток и възникването на напрежение или ток с нулева последователност. Такова приложение е свързано с корекция на характеристиките, повишаване на чувствителността на схемите за защита или обезпечаването на тяхното избиращо действие.

В устройствата, работещи с променлив ток, честотата на който се отличава от честотата на мрежата е използван принципа за контрол на изолацията с променлив ток, чиято честота е по-висока или по-ниска от честотата на мрежата.

В качеството на чувствителни елементи в схемите за защитно изключване могат да намерят приложение различни видове релета, в това число електронни, транзисторни, тиристорни и други усилвателни и ключови елементи и устройства.

Устройствата, основани на контрола на изолацията с постоянен ток, са получили най-широко приложение в минната промишленост в страните, където се използва трансформатор с изолирана неутрала.

При това наред с обикновените схеми, в които присъстват допълнителни източници на ток или се използва изправен ток от мрежата,

широко се използват и комбинирани схеми с допълнително използване на напрежението или ток с нулева последователност.

Предимствата на тези схеми за защитно изключване, се състоят в способността на контрол на повредената изолация и нивото на нейното съпротивление, а също и възможността да се обезпечат зададените нива на сработване. Техен недостатък се явява контрола на омичното съпротивление на изолацията, който се осъществява с постоянен ток вместо с променлив ток.

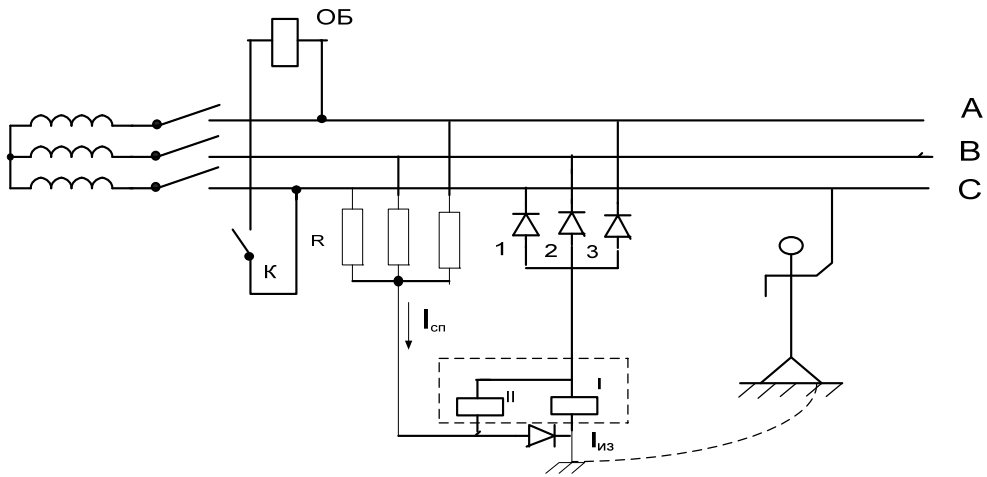
2.1.2. Вентилни схеми на устройства за защитно изключване

Много варианти са предложени на такива схеми на релета за утечки. Най-типично от тях се явява устройството за контрол на изолацията на тип УАКИ в вентилна схема, разработена съвместно от донУГИ, ДПИ, МакНИИ и ДЗША. Схемното решение на това устройство е разработено от А.Я.Фанин, В.Д.Кочетков и Х.М.Желиховски, които са обосновали и неговите основни параметри що се отнася до статическия компенсатор на капацитивни токове на утечка.

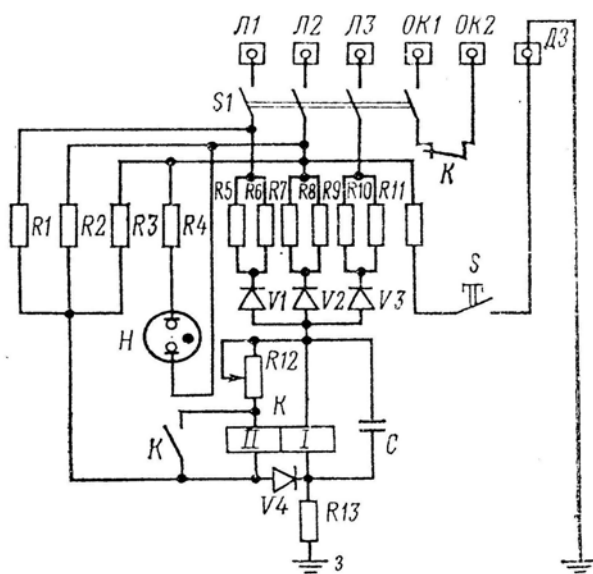
Ново разработеното реле за утечки е поставено за промишлено производство през 1963 г. Принципът на защитното изключване и контролът на изолация при използването на реле за утечки тип УАКИ е показан на опростената схема (фиг.2.2.).

В опростената схема за защита тип УАКИ (фиг.2.2) се използва едно реле с две намотки за постоянен ток K , чийто намотки са съединени така, че техните магнитни потоци са насочени срещуположно. До момента, в който изолацията на мрежата не е повредена, оперативният ток през изолацията ($I_{из}$) отсъства. Двете намотки на релето се обтичат от спомагателния изправен ток ($I_{сп}$), благодарение на наличието на три изправителя 1,2,3, и филтър от три резистора R . Тъй като намотките са включени противоположно, резултантният магнитен поток на релето не е достатъчен то да сработи.

При наличието на понижено съпротивление на изолацията, или при допир на човек към фаза възниква постоянен ток през изолацията ($I_{из}$), която в релето протича ток само през намотка II, доколкото веригата на намотка I е затворена от вентила 4. При това разликата на магнитните потоци, създадени от намотки II и I, става достатъчна за сработване на релето, чийто контакти затварят веригата на изключващата бобина на автоматичния изключвател, който на свой ред изключва мрежата с повредената изолация или мрежата с допир до фазата.



а)



б)

Фиг.2.2. Опростена схема за защита тип УАКИ (а) и принципна схема на реле за утечки УАКИ-127-III(б)

За дълги и разклонени електрически мрежи с ниско съпротивление на изолацията са разработени устройства за защита с деформирани характеристики, при които чувствителността към несиметрични повреди на изолацията остава висока, а чувствителността към симетрични повреди на изолацията на всичките три фази е значително снижена. Смята се, че такава деформация може да се допусне, тъй като допир на човек до тоководещ проводник е еквивалентно на несиметрично понижение на изолацията.

2.1.3.АЗУР – кратко описание и характеристики

Апаратът Азур се използва за защита на хора от поражения от електрически ток и други опасни последствия от утечни токове при

трифазни електрически мрежи с променлив ток, при честота 50 Hz и напрежение 380V и 660 V с изолиран звезден център в минните предприятия в условията на хладен, умерен и тропичен климат. Апаратът има три варианта на изпълнение – А1, А2 и А3. Може да работи при отклонение на напрежението в мрежата от 85 до 110% от номиналното му значение. Апаратът АЗур се състои от два блока:

- блок за контрол на изолацията и защитно изключване;
- устройство за автоматична компенсация на капацитета.

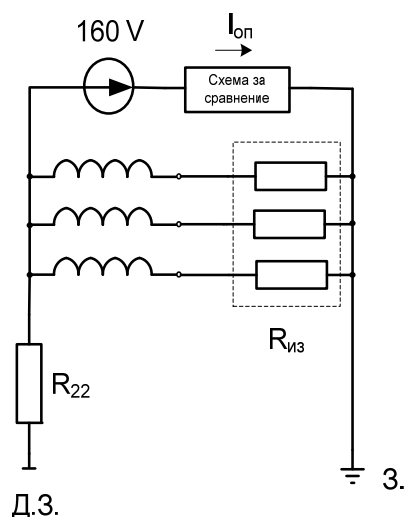
Схемата за контрол на изолацията и защитното изключване е съставена по такъв начин, че при излизане от строя на елементи от веригата за контрол на изолацията и защитното изключване, да сработва схемата за изключване на веригата или да се повишава съпротивлението на сработване т.е. нараства чувствителността на апарата.

Устройството за контрол на изолацията се състои от следните възли:

- източник на еталонно напрежение;
- източник на оперативно напрежение;
- генератор на повишена честота;
- изпълнително устройство с реле КЗ.1.

Устройството за автоматична компенсация на капацитивната съставяща се състои от дросел-трансформатор, компенсиращ дросел, разделителен кондензатор и електрическа схема за настройка.

Техническите характеристики на устройството са обобщени в таблица 2.1, а опростената схема на апарата АЗУР е показана на фиг.2.3.



Фиг.2.3. Опростена схема на апарата АЗУР

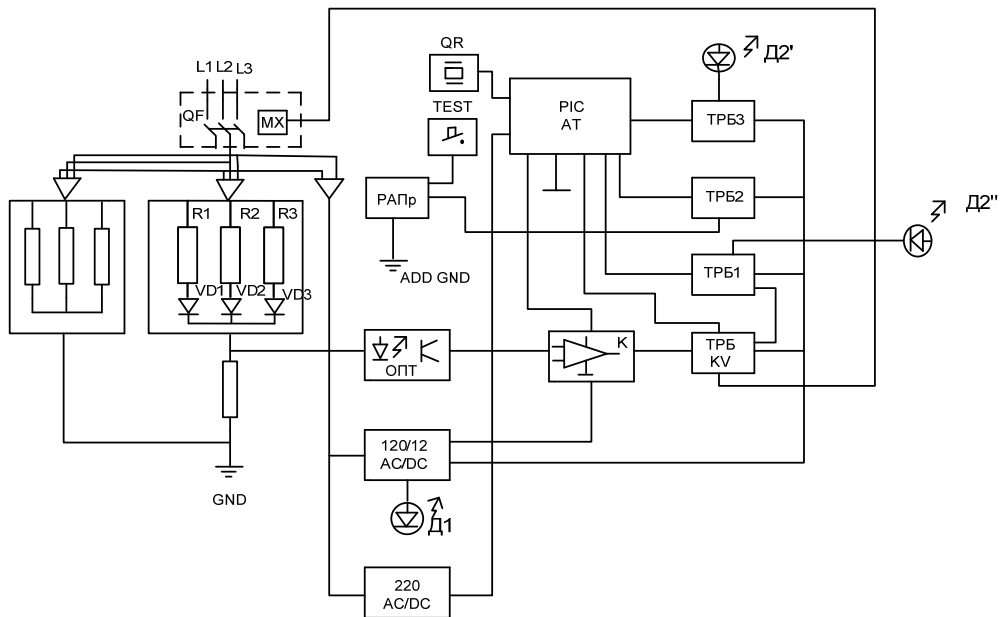
Таблица 2.1.

Номинално напрежение на защитаваната трифазна променливотокова мрежа с честота 50 Hz, V	380/660
Консумирана мощност, kVA	0,13
Съпротивление на сработване при симетрична трифазна утечка (критично съпротивление на изолацията) и капацитет на мрежата от 0 до 1 μ F на фаза, k Ω на фаза, не по малко от При напрежение 380 V При напрежение 660 V	10 k Ω 30 k Ω
Съпротивление на сработване при еднофазна утечка и капацитет на мрежата от 0 до 1 μ F на фаза, k Ω не повече При напрежение 380 V При напрежение 660 V	12 k Ω 20 k Ω
Собствено време на сработване на апарата при съпротивление на еднофазна утечка 1 k Ω и капацитет на мрежата от 0 до 1 μ F на фаза, s не повече	0,1
Продължителен ток на утечка при изменение на капацитета на мрежата от 0 до 1 μ F на фаза, A, не повече	0,025
Минимално напрежение на мрежата, при което се обезпечава нормална работа на компенсатора то номиналното напрежение не повече	0,5U _{ном}
Маса на апарата, kg	17

2.1.4.АЗУ-АТ-Рис

Апаратите АЗУ-АТ-Рис за напрежение 220 V са разработени от специалисти на фирма СМС-С и МГУ „Св. Иван Рилски”. Предназначени са за защита от токови утечки, с непрекъснат контрол на изолационното съпротивление в еднофазни и трифазни мрежи. Конструирани са от електронни елементи със средна и висока степен на интеграция.

Блоковата схема е показана на фиг.2.4.



Фиг.2.4. Блокова схема на АЗУ-АТ-Рис

2.2. Устройства за контрол на изолацията BENDER

Поради причини от техническо естество, различните измервателни методи са използвани за различни типове разпределителни системи. Съществува различие между:

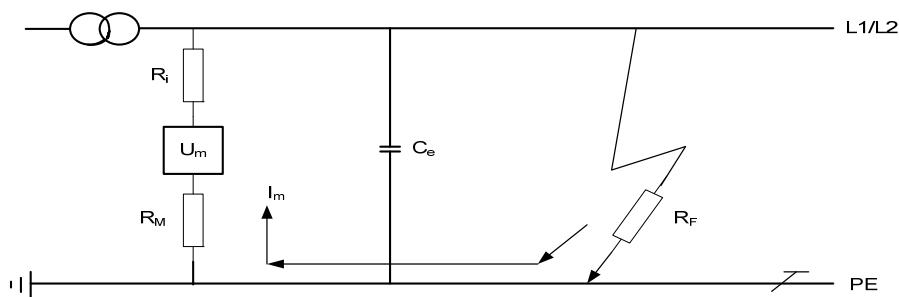
- променливотокова или трифазна система;
- променливотокови системи с директно свързани токоизправители (смесени системи);
- постояннотокови системи.

2.3. Контрол на изолацията на променливотокова еднофазна и трифазна IT система

При тези системи се прави разлика между омичното измерено съпротивление на изолацията и утечния капацитет на предпазния проводник.

Измерване на съпротивлението на изолация

Най-често използвания метод е основан на наслагване на постояннотоково напрежение между системата и защитния проводник. Този принцип е реализиран отдавна и е показан на фиг.2.5.



Фиг.2.5. Устройство за контрол на изолацията

Измервателното напрежение е генерирано в УКИ и приложено към системата посредством високото омично съпротивление R_i . Тъй като вторичната намотка на разделителния трансформатор е нискоомна, за постояннотокото измервателно напрежение, то това постояннотокото напрежение е наложено върху всички проводници на системата, които са подложени на контрол, което е еквивалентно на една контактна шина. В случай на повреда в изолацията, измерваната верига между мрежата и земя се затваря през съпротивлението на изолация R_F , така че постояннотоковият измервателен ток I_m е пропорционален на даденото изолационно съпротивление и се описва с формулата:

$$I_m = \frac{U_m}{R_i + R_M + R_F}, \quad (2.1)$$

където:

I_m – постояннотоков измервателен ток;

U_m – постояннотокото измервано напрежение;

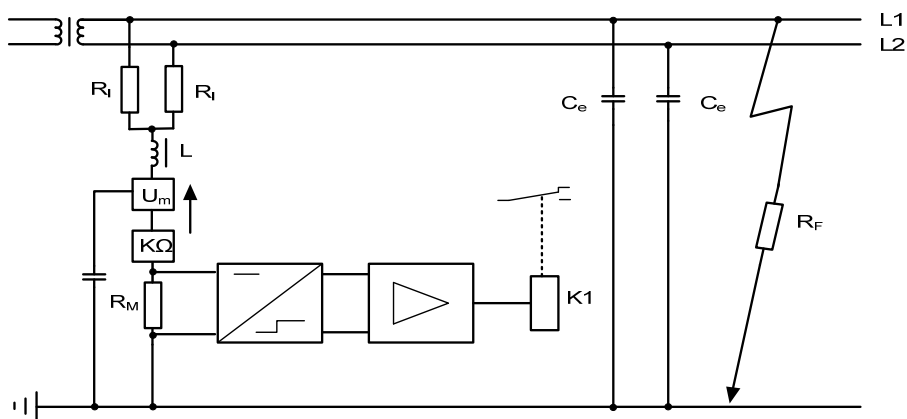
R_i – вътрешно съпротивление на устройството за контрол на изолацията;

R_M – измервано съпротивление на УКИ;

R_F – пълно изолационно съпротивление на системата.

Утечният капацитет на системата само натоварва постояннотокото измервателно напрежение и не влияе върху измерването след малък интервал от време. С този метод се измерват всички изолационни повреди. Устройства, които използват този метод на измерване, определят „абсолютното“ изолационно съпротивление на системата са познати под името А-изометър (А-абсолютно, Изолация), регистрирани са от производителя BENDER, Grunberg, Germany.

На фиг.2.6 е показана елементарна схема на устройство за контрол на изолацията.

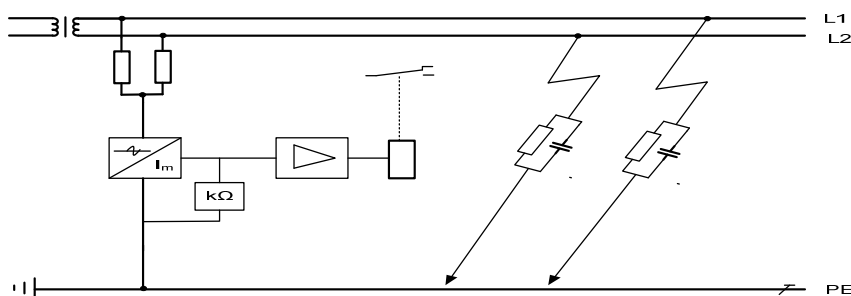


Фиг.2.6. Схема на устройство за контрол на изолация

Устройството е свързано между системата и земя през измервателния резистор R_M , постояннотоковото измервателно напрежение U_m и съединителните резистори R_i . При наличие на изолационна повреда R_F , напрежението измерено на резистора R_M е пропорционално на съпротивлението на изолация. Това напрежение се сравнява с фиксиран източник. Когато се надвиши стойността на този източник, релето $K1$, свързано към усилвателното стъпало се задейства. Веригата има известен хистерезис, който да предпази релето от фалшиви сработвания. $K\Omega$ метъра е свързан последователно с измерваната верига (последователно на R_M) показва пълното изолационно съпротивление на системата.

Измерване на утечния капацитет

На фиг.2.7 е показана основна схема за измерване на импеданс.



Фиг.2.7. Основна схема за измерване на импеданс

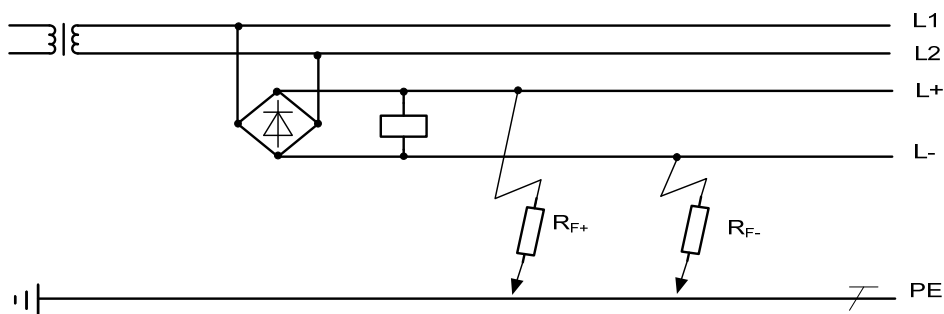
Принципът на измерване е основан на наслагване на променлив ток между системата и земята. Фазовата връзка на системата се променя постоянно. При наличие на утечен импеданс фазата се променя на „изместено напрежение”, между мрежата и земя се генерира наслагване с честота съответстваща на диференциалната честота. Когато се прилага измервателен ток с постоянна амплитуда, амплитудата на наложеното напрежение е право пропорционално на общия утечен капацитет към земя.

Високоомният резистор позволява точна оценка и ниски измервани токове. По този начин токът на грешка, генериран от устройството, е по-малък от $35 \mu\text{A}$.

2.4. Променливотокови системи с директно свързани токоизправители или мощни конвертори

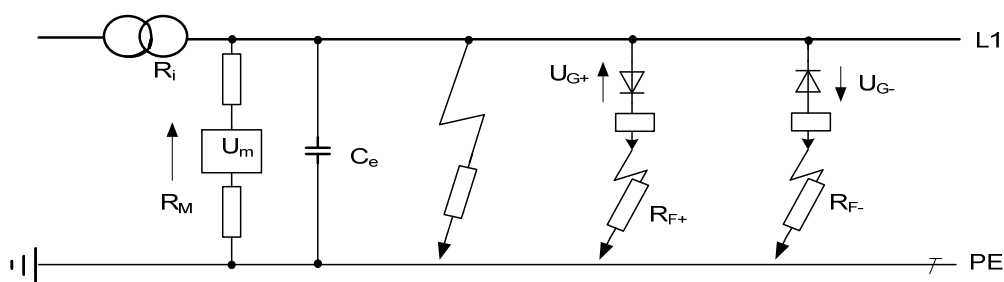
2.4.1. Измерване с инверторно стъпало

Този метод се използва за контрол на мрежи, свързани с електрически двигатели, преси, както в металургичната и химичната промишленост (фиг.2.8, 2.9, 2.10).



Фиг.2.8. Променливотокови товари с изправители

При наличие на повреда в изолацията, в постояннотоковата страна на товарите, външните постояннотокови напрежения се сумират с постояннотоковото напрежение.

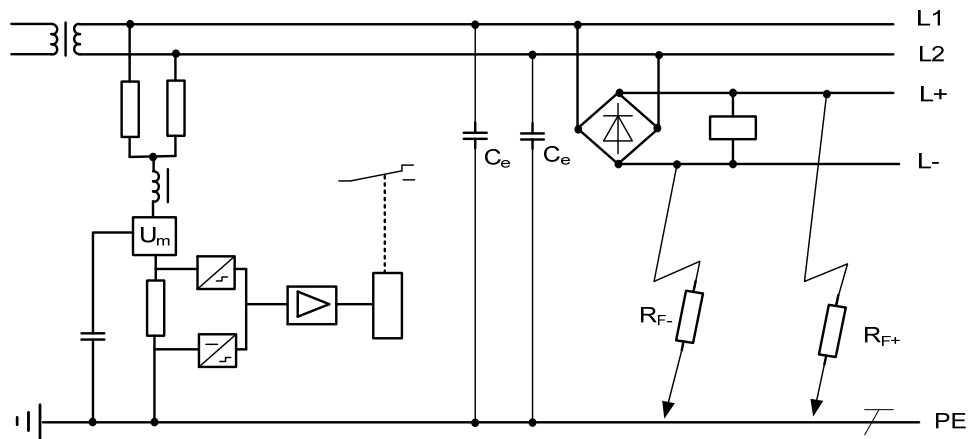


Фиг.2.9. Променливотокова система с токоизправители

Тези постояннотокови напрежения могат да бъдат положителни или отрицателни според установената повреда и да изопачат измерването на изолацията.

Към измервателната апаратура може да се монтира инверторно стъпало, което дава възможност да се измерят повредите в изолацията както от положителната, така и отрицателната страна на токоизправителя.

Този измервателен метод като цяло се характеризира с по-висока чувствителност към повредите откъм постояннотоковата страна на токоизправителите отколкото към повредите на променливотоковата.



Фиг.2.10. Устройство за контрол на изолацията с инверторно стъпало

2.4.2. Наредби и стандарти при установяване на изолационна повреда

IT мрежата с контрол на изолацията е нужно да се изключи при първото показание за изолационна повреда. При това наредбите изискват установената повреда да бъде отстранена колкото е възможно по-скоро. Тези наредби могат да се открият в: IEC 60364-4-41;1992-10, точка 413.1.5.4.

Ако едно УКИ е предназначено да показва първата повреда на фаза към земя, трябва да се задейства звуков и /или визуален сигнал.

Екипировката за установяване на изолационна повреда е обхваната от проект IEC 61557-9.

3. Апарат за контрол на изолацията

3.1. Изисквания към апаратите за контрол на изолацията

Приборите за контрол на изолацията трябва да удовлетворяват следните изисквания:

а) работата на прибора не трябва да зависи от капацитета на фазите на мрежата, т.е. приборът трябва да реагира на активното съпротивление на изолацията и не е нужно да реагира на капацитета на фазите на мрежата спрямо земя;

б) приборът трябва да реагира както на симетричното, така и на несиметричното понижение на съпротивление на изолация;

в) схемата на прибора трябва да има достатъчно високо вътрешно съпротивление, така че при включването на апарата към мрежата да не се получи значително намаление на общото съпротивление спрямо земя;

г) приборът трябва да има достатъчна чувствителност;

д) приборът не трябва да подава фалшиви сигнали при различни комутационни преходни процеси (включване на мрежата или отделни нейни участъци под напрежение, изключване и др.);

е) приборът трябва да обезпечава необходимата точност на измерване при колебания на напрежението на контролираната мрежа;

ж) приборът трябва да обезпечи както измерване на съпротивлението на изолация, така и да осъществи предупредителна (звукова или светлинна) сигнализация при понижаване на изолационното съпротивление под установеното ниво;

з) приборът следва да е достатъчно надежден по време на работа за всички видове повреди, за които е проектиран.

Колкото е по-проста схемата на контрол и колкото по-малко релета и контакти съдържа, толкова тя е по-надеждна.

3.2. Изисквания на БДС към устройства за контрол на изолацията

БДС 10880 – 1983

От -10°C до $+35^{\circ}\text{C}$ – околна среда, капацитет на мрежата – до $1\mu\text{f}$ на фаза

2000 V- изпитващо напрежение, изолацията на апарата – 5 МΩ.

Съпротивлението на задействане на апарата при симетрична трифазна утечка трябва да съответства на стойностите, посочени в таблица 3.1.

Съпротивлението на задействане при еднофазна утечка е такова, че при $R_{\text{зад}}$ (симетрично) – продължителният ток на утечка през $R_{\text{зад}}$.

(еднофазно), да бъде не по-голям от 0,025 А (при отчитане на измерителния ток).

В апаратите от I група $R_{зад}$ (еднофазно) не трябва да бъде по-голямо от $1,2 \cdot R_{зад}$ (симетрично).

Време на действие – до 1000V при R (еднофазно) = 1kΩ $t=0,103$ s.

Напрежението на източника на измерителен ток не трябва да бъде по-голямо от ефективната стойност на фазовото напрежение на мрежата.

Таблица 3.1.

U, V	I група $R_{зад}, k\Omega$	II група $R_{зад}, k\Omega$	III група $R_{зад}, k\Omega$
127	12	3,3	3,3
220	21	10	7
380	–	10	10
500	45	25	15
660	–	30	20
1000	90	50	30
1140	–	60	35

Препоръчва се към фазата да се присъедини отрицателният полюс на $U_{изм}$.

$I_{изм}$ да не бъде по-голям от 0,01 А.

1.2.9 Апаратите за общомрежова защита трябва да имат:

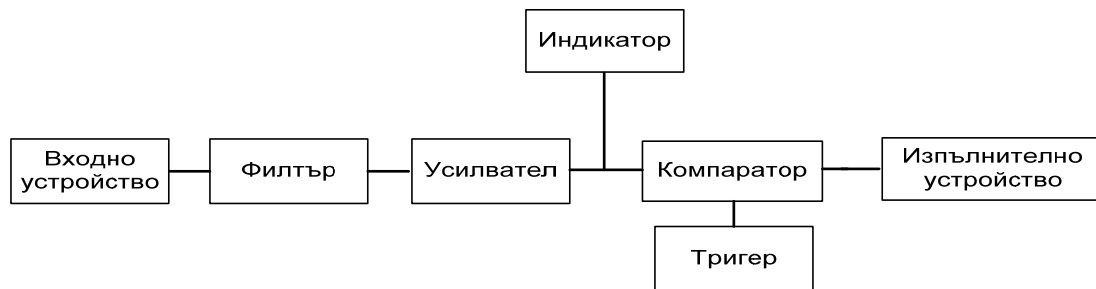
- 1) бутон за проверка;
- 2) индикация за изолационното съпротивление (127 V, 220V - не е задължително);
- 3) изолирана от корпуса клемма за присъединяване на ДЗ (допълнителна земя);
- 4) разединител;
- 5) блокиращо устройство, недопускащо включване на защитаваната мрежа при задействан апарат за защита.

БДС 1.2.11. Повреда на отделни елементи от функционални вериги трябва да предизвика действие на апарата или не трябва да води до намаляване на съпротивлението на действие.

БДС 1.2.12. Възможност за периодична проверка чрез $R=0,8R_{зад}$.

3.3. Принцип на действие. Блокова схема

Устройството за контрол на изолацията, което е представено в настоящата дисертация, има следната блокова схема (фиг.3.1).



Фиг.3.1. Блокова схема

3.4. Входно устройство на апарата за контрол на изолацията

Вместо трифазен присъединителен дросел, който изпълнява функцията на филтър с нулева последователност, устройството за контрол на изолацията се присъединява към мрежата с активно съпротивление R_2 от 200 К Ω .

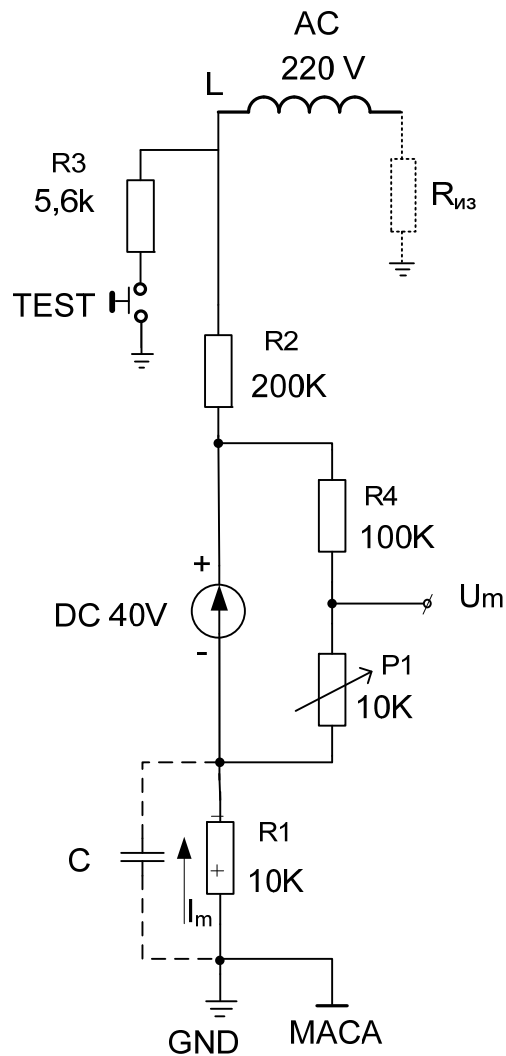
Във входният контур са маса-резистор R_m , 10k Ω - постояннотоков източник 40V-присъединително съпротивление R_i , 200k Ω - фаза L-намотка на трансформатора 220V 50Hz- $R_{из}$, действат два източника на напрежение: постояннотоков DC40V и променливотоков 220V.

Входното устройство в завършен вид има следната схема, фиг.5.7 и изпълнява следните функции.

1. Осигурява висок входен импеданс на апарата за контрол на изолацията благодарение на което не се шунтира контролираната верига.

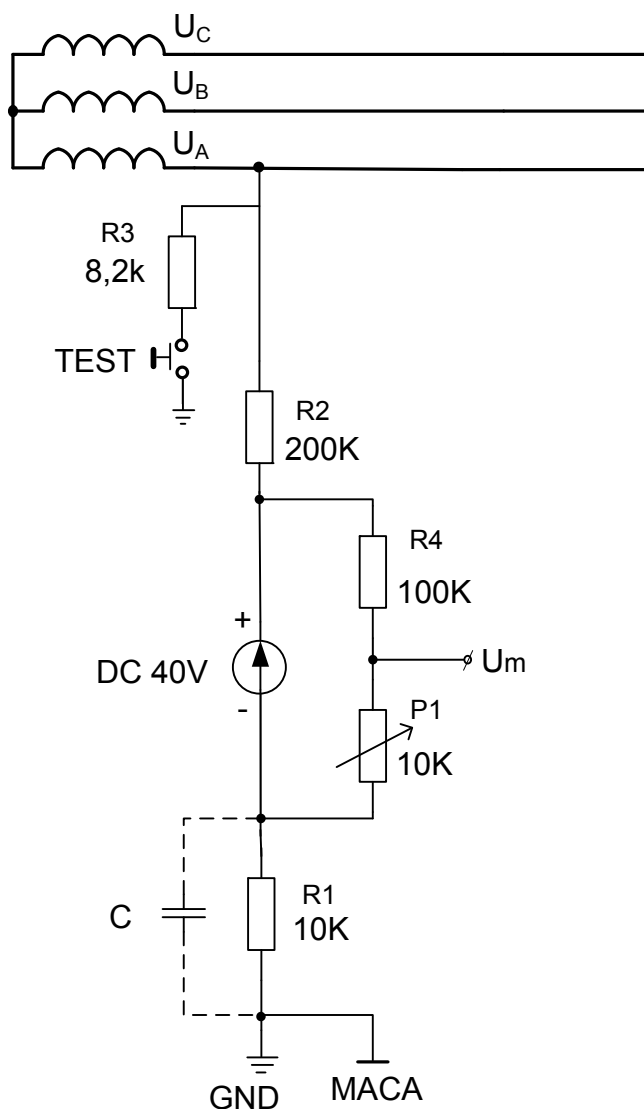
2. Осъществява изместване на нивото на характеристиката с цел по-удобно измерване на $R_{из}$.

3. Входното устройство е снабдено с бутон за проверка (при задействане създава понижено съпротивление на изолацията) на апарата за контрол на изолацията съгласно изискването на БДС.



Фиг.3.2. Схема на входното устройство в завършен вид

Апаратът за контрол на изолацията е реализиран да работи в монофазна мрежа за 220V, но може да се свърже към трифазна мрежа по начина, показан на фиг.3.3.



Фиг.3.3. Входното устройство свързано към трифазна мрежа

3.4.1. Филтър на Сален и Кей

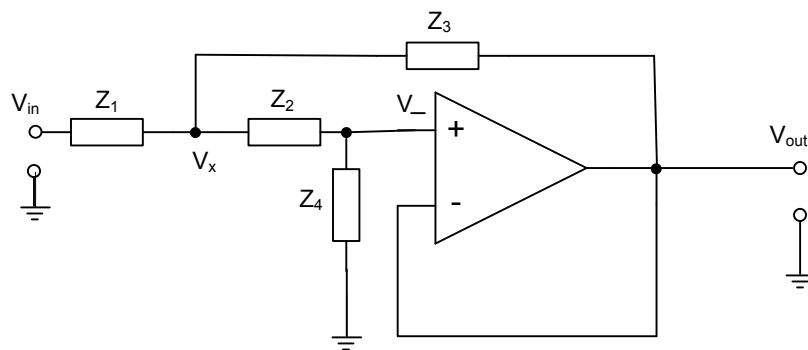
По същество тези схеми представляват усилватели на напрежение с един операционен усилвател с допълнителен кондензатор включен за получаване на необходимата АЧХ от първи порядък. Неинвертиращата схема има високо входно съпротивление по цялата лента на пропускане и не натоварва изхода на предното стъпало. Таблица 3.2 представя основните характеристики на филтър на Сален и Кей.

Таблица 3.2.

Общи свойства	Предимства	Недостатъци
Филтър от втори порядък	Високо входно съпротивление	Относително висока чувствителност към толерансите на елементите
Малки и средни значения на качествения фактор	Относително неголям диапазон на номиналните значения на елементите	Ограничени възможности за реализация на филтри с $k > 1$
Неинвертиращ		Лесно се настройват само два параметъра ω_0 и Q

Филтър на Сален и Кей – анализ

На фиг.3.4 е показана схема на филтъра на Сален и Кей.



Фиг.3.4. Филтър на Сален и Кей

Допуска се, че операционният усилвател е идеален. Има въведена отрицателна обратна връзка, то следва че, $V_- = V_+$. Но тъй като V_- е свързан към изхода, то следва:

$$V_+ = V_- = V_{out} \quad (3.1)$$

Като се използва метода на възловите потенциали за възел V_x , се получава:

$$\frac{V_x}{Z_2} - \frac{V_-}{Z_2} = \frac{V_-}{Z_4} \quad (3.2)$$

И от 3.1 следва:

$$\frac{V_x}{Z_2} - \frac{V_{out}}{Z_2} = \frac{V_{out}}{Z_4} \quad (3.3)$$

За възел V_x

$$V_x \left(\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3} \right) = \frac{V_{in}}{Z_1} + \frac{V_{out}}{Z_3} + \frac{V_-}{Z_2} ; \quad (3.4)$$

$$\frac{V_x}{Z_1} + \frac{V_x}{Z_2} + \frac{V_x}{Z_3} = \frac{V_{in}}{Z_1} + \frac{V_{out}}{Z_3} + \frac{V_-}{Z_2} ; \quad (3.5)$$

$$\frac{V_{in}-V_x}{Z_1} = \frac{V_x-V_{out}}{Z_3} + \frac{V_x-V_{out}}{Z_2} ; \quad (3.6)$$

От уравнение 3.3 се получава:

$$\frac{V_x}{Z_2} = \frac{V_{out}}{Z_4} + \frac{V_{out}}{Z_2} ; \quad (3.7)$$

$$\frac{V_x}{Z_2} = V_{out} \left(\frac{1}{Z_4} + \frac{1}{Z_2} \right) ; \quad (3.8)$$

$V_x = V_{out} \left(\frac{Z_2}{Z_4} + 1 \right)$ полага се в уравнение 3.6.

$$\frac{V_{in}-V_{out} \left(\frac{Z_2}{Z_4} + 1 \right)}{Z_1} = \frac{V_{out} \left(\frac{Z_2}{Z_4} + 1 \right) - V_{out}}{Z_3} + \frac{V_{out} \left(\frac{Z_2}{Z_4} + 1 \right) - V_{out}}{Z_2} ; \quad (3.9)$$

$$\frac{V_{in}}{Z_1} = \frac{V_{out} \left(\frac{Z_2}{Z_4} + 1 \right)}{Z_1} + \frac{V_{out} \left(\frac{Z_2}{Z_4} + 1 \right) - V_{out}}{Z_3} + \frac{V_{out} \left(\frac{Z_2}{Z_4} + 1 \right) - V_{out}}{Z_2} ; \quad (3.10)$$

$$V_{in} Z_3 Z_2 = V_{out} Z_2 Z_3 \left(\frac{Z_2}{Z_4} + 1 \right) + V_{out} Z_1 Z_2 \left(\frac{Z_2}{Z_4} + 1 \right) - V_{out} Z_1 Z_2 + V_{out} Z_1 Z_3 \left(\frac{Z_2}{Z_4} + 1 \right) - V_{out} Z_1 Z_3 ; \quad (3.11)$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{Z_3 Z_2}{Z_2 Z_3 \left(\frac{Z_2}{Z_4} + 1 \right) + Z_1 Z_2 \left(\frac{Z_2}{Z_4} + 1 \right) - Z_1 Z_2 + Z_1 Z_3 \left(\frac{Z_2}{Z_4} + 1 \right) - Z_1 Z_3} ; \quad (3.12)$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{Z_3 Z_2}{\frac{Z_2^2 Z_3}{Z_4} + Z_2 Z_3 + \frac{Z_1 Z_2^2}{Z_4} + \frac{Z_1 Z_2 Z_3}{Z_4}} \quad (3.13)$$

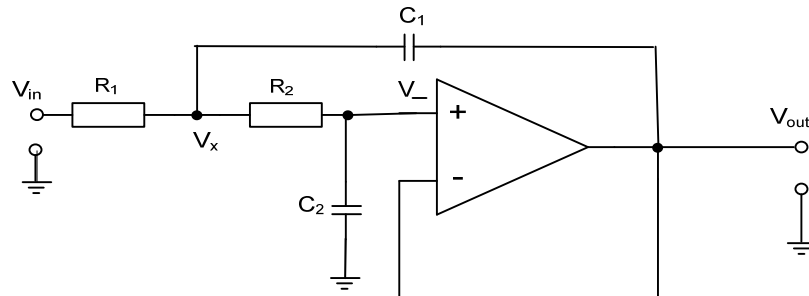
$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{Z_2 Z_3 Z_4}{Z_2^2 Z_3 + Z_2 Z_3 Z_4 + Z_1 Z_2^2 + Z_1 Z_2 Z_3} = \frac{Z_3 Z_4}{Z_2 Z_3 + Z_3 Z_4 + Z_1 Z_2 + Z_1 Z_3} ; \quad (3.14)$$

И се получава предавателната функция:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{Z_3 Z_4}{Z_1 Z_2 + Z_3 (Z_1 + Z_2) + Z_3 Z_4} \quad (3.15)$$

Ниско-честотен филтър на Сален и Кей

На фиг.3.5 е показана схемата на ниско-честотен филтър на Сален и Кей.



Фиг.3.5. Ниско-пропускащ филтър на Сален и Кей

Схемата е еквивалентна на схемата от фиг.3.4 като:

$$Z_1 = R_1, \quad Z_2 = R_2, \quad Z_3 = \frac{1}{sC_1}, \quad Z_4 = \frac{1}{sC_2}. \quad (3.16)$$

Предавателната функция за ниско-честотния филтър е:

$$H(s) = \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2as + \omega_0^2}, \quad (3.17)$$

където:

$S=2\pi jf$; f_0 - е граничната честота; Q - качественият фактор; ζ - коефициент на затихване;

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}; \quad (3.18)$$

$$2a = 2\zeta\omega_0 = \frac{\omega_0}{Q} = \frac{1}{C_1} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \frac{1}{C_1} \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} \right); \quad (3.19)$$

$$Q = \frac{\omega_0}{2a} = \frac{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}{C_2 (R_1 + R_2)}. \quad (3.20)$$

До уравнение(3.17) се стига, като се положи (3.16) в уравнение(3.15). Получава се:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{\frac{1}{s^2 C_1 C_2}}{\frac{s^2 R_1 R_2 C_1 C_2 + s C_2 (R_1 + R_2) + 1}{s^2 C_1 C_2}}; \quad (3.21)$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{s^2 R_1 R_2 C_1 C_2 + s C_2 (R_1 + R_2) + 1} \frac{1}{\frac{R_1 R_2 C_1 C_2}{R_1 R_2 C_1 C_2}}; \quad (3.22)$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{s^2 + \frac{s(R_1 + R_2)}{C_1 R_1 R_2} + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}}. \quad (3.23)$$

И след полагане на 3.18 и 3.19 в 3.23 се получава:

$$H(s) = \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2as + \omega_0^2} \quad (3.24)$$

Следващите редове разглеждат широко използвани методи за опростяване.

1. Компонентите на филтъра са отношения, допуска се $R_1 = mR$,
2. Компонентите на филтъра са отношения и усилването $= 1$.
3. Резисторите се определят като отношение а капацитетите са равни.
4. Избират се еднакви компоненти за филтъра. Нека $R_1 = R_2 = R$ и $C_1 = C_2 = C$ и като резултат се получава:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}, \quad (3.25)$$

$$Q = \frac{1}{3-K}. \quad (3.26)$$

3.4.2. Пресмятане на филтърното звено

Обектът на изследване е филтър на Сален и Кей от втори порядък. Филтърът трябва да има характеристиката на Батерворт. От таблица 3.3 се намира $f_{3dB}/f_{cp} = 1$, ето защо $f_{3dB} = f_{cp}$. Избира се $C = 1\mu F$

Таблица 3.3 показва коефициентите на затихвания и отношение за филтри от втори порядък.

Таблица 3.3.

Тип на филтъра	α	Отношение f_{3dB}/f_{cp}
Батерворт	1,414	1,000
Бесел	1,732	0,785
Чебишев		
Неравномерност 0,5 dB	1,578	1,390
Неравномерност 1dB	1,059	1,218
Неравномерност 2dB	0,886	1,074
Неравномерност 3dB	0,766	1,000

$$f_{cp} = \frac{1}{2\pi RC} \quad R = R_1 = R_2 = 10 \text{ k}\Omega \quad ; \quad (3.27)$$

$$f_{cp} = \frac{1}{2.3.14.10.10^3 10^{-6}} = 15,9 \approx 16 \text{ Hz} \quad . \quad (3.28)$$

Филтър с тези компоненти ще пропуска честоти по-малки от 16 Hz и потиска честота по-голяма от 16 Hz. Но както показва практиката, едно звено не е достатъчно, и затова в схемата има два електронни филтъра и едно Г-звено, което представлява нискочестотен RC филтър. Третия ОУ играе ролята на усилвател.

Филтърът на устройството е тризвеноен - първите две стъпала са идентични и са реализирани с операционни усилватели, използвани са първите два операционни усилвателя на интегралната схема LM324. Реализирани са като филтри на Сален и Кей (фиг.3.6). Третото звено е обикновен RC ниско-пропускащ филтър (фиг.3.7).

На фиг.3.6 е показана схемата на първото звено на филтъра на Сален и Кей. Звеното, има следните характеристики:

$$\text{Предавателна функция: } G(s) = \frac{10000,4}{s^2 + 199,996s + 10000} \cdot$$

$$\text{Гранична честота: } f_c = 15,915 \text{ (Hz)}.$$

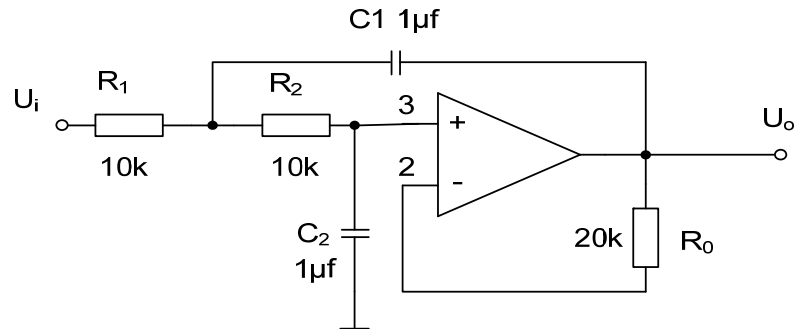
$$\text{Качествен фактор } Q=0,50001.$$

$$\text{Коефициент на затихване } \xi=0,99998.$$

Импедансът на филтъра може да се пресметне като се използва приблизителната формула:

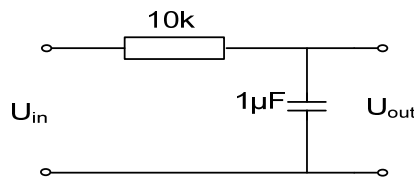
$$Z_{smin} \approx R_1 \sqrt{\frac{1}{Q^2 + k^2 + 0,34}} = 10 \cdot 10^3 \sqrt{\frac{1}{0,5^2 + 0,5^2 + 0,34}} = 10911 \Omega \approx 11 K\Omega, \quad (3.29)$$

$$k \text{ се намира чрез израза } k = \frac{R_1}{R_1 + R_2} = \frac{10 \cdot 10^3}{(10 + 10)10^3} = 0,5.$$



Фиг.3.6. Филтърно звено на Сален и Кей на филтъра

Третото звено на филтъра представлява НЧ RC филтър или така нареченото Г - звено. Фиг. 3.7.



Фиг.3.7. Г-образно звено на филтъра

При филтърно звено, реализирано със стойностите на фиг.3.7, за граничната честота се получава:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \cdot 10 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 10^{-6}} = 15,923 \text{ Hz}. \quad (3.30)$$

Целта е да се потиска честотата от 50 Hz на променливия ток. Ако на входа се подава синусоиден сигнал с горната честота и амплитуда 10V, то на изхода се получава:

$$V_{out} = V_{in} \frac{X_c}{\sqrt{R^2 + X_c^2}} = \frac{3184,7}{\sqrt{(10 \cdot 10^3)^2 + 3184,7^2}} = 3,0345 \text{ V}, \quad (3.31)$$

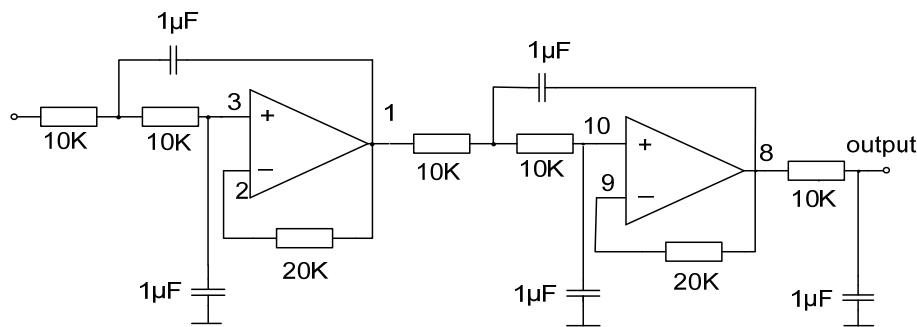
$$\text{където: } X_c = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 1 \cdot 10^{-6}} = 3184,7 \Omega.$$

За фазовото изместване Φ се получава:

$$\varphi = -\arctg(2\pi fRC) = -2\pi \cdot 15,923 \cdot 10 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 10^{-6} = -44,9^\circ. \quad (3.32)$$

По време на лабораторни изследвания се установи, че едно звено не е достатъчно, за да подтисне променливата честота от 50Hz, и затова са прибавени още две звена. Третият ОУ на интегралната схема усилва вече филтрирания сигнал и го изпраща към сравняващото устройство и схемата за индикация на нивото. Филтърното звено, показано на фиг.3.6, т.е. филтър на Сален и Кей е от втори порядък и има два полюса. RC филтърното звено е от първи порядък (фиг.3.7), т.е. има един полюс. Целия филтър се състои от две звена на Сален и Кей и едно RC звено, и следователно филтърта е от пети порядък.

Схемата на целия филтър е показана на фиг.3.8



Фиг.3.8. Пълна схема на филтърта на устройството без усилвателя.

3.4.3. Математическо моделиране в програмна среда на Mathcad

Математическо моделиране на първото звено на филтърта .
Характеристики.

Основни стойности:

$$\begin{aligned}f_c &:= 15.5 & \omega_c &:= 2 \cdot \pi \cdot f_c \\R_1 &:= 10 \cdot 10^3 & G_1 &:= \frac{1}{R_1} & G_1 &= 1 \times 10^{-4} \\R_2 &:= 10 \cdot 10^3 & G_2 &:= \frac{1}{R_2} & G_2 &= 1 \times 10^{-4} \\C_1 &:= 1 \cdot 10^{-6} & & & \underline{G_3} &:= 1 \times 10^{-4} \\C_2 &:= 1 \cdot 10^{-6} & & & & \end{aligned}$$

Дефиниране на предавателната функция на първото звено на филтъра:

$$\underline{K_1}(\omega) := \frac{1}{1 + i \cdot C_2 \cdot (R_1 + R_2) \cdot \omega - C_1 \cdot C_2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot \omega^2}$$

Пресмятане на имагинерната и реалната част на предавателната функция:

$$M_1(\omega) := \text{Im}(K_1(\omega))$$

$$D_1(\omega) := \text{Re}(K_1(\omega))$$

Пресмятане на амплитудно-честотната характеристика:

$$A_1(f) := |K_1(2 \cdot \pi \cdot f)|$$

Пресмятане на затихването на напрежението на изхода на звеното:

$$\Delta_1(f) := 20 \log(A_1(f))$$

Пресмятане на коефициента на предаване на мощност на звеното:

$$K_{p1}(f) := (A_1(f))^2$$

Пресмятане на затихването на мощността на звеното:

$$\Delta_{p1}(f) := 20 \log(K_{p1}(f))$$

Пресмятане на фазо-честотната характеристика на звеното:

$$\phi_1(\omega) := \text{atan}\left(\frac{M_1(\omega)}{D_1(\omega)}\right)$$

Пресмятане на отношението на имагинерната част на предавателната функция към реалната част на предавателната функция:

$$B(\omega) := 3 \cdot G \cdot \omega \frac{C_1}{(-G^2 + \omega^2 \cdot C_1 \cdot C_2)}$$

Задаване на фазо-честотната характеристика като функция спрямо особените точки:

$$\omega_0 := \frac{G}{\sqrt{C1 \cdot C2}} \quad \alpha_1(\omega) := \begin{cases} (\pi + \phi_1(\omega)) & \text{if } \omega \leq \omega_0 \\ \phi_1(\omega) & \text{if } \omega > \omega_0 \end{cases}$$

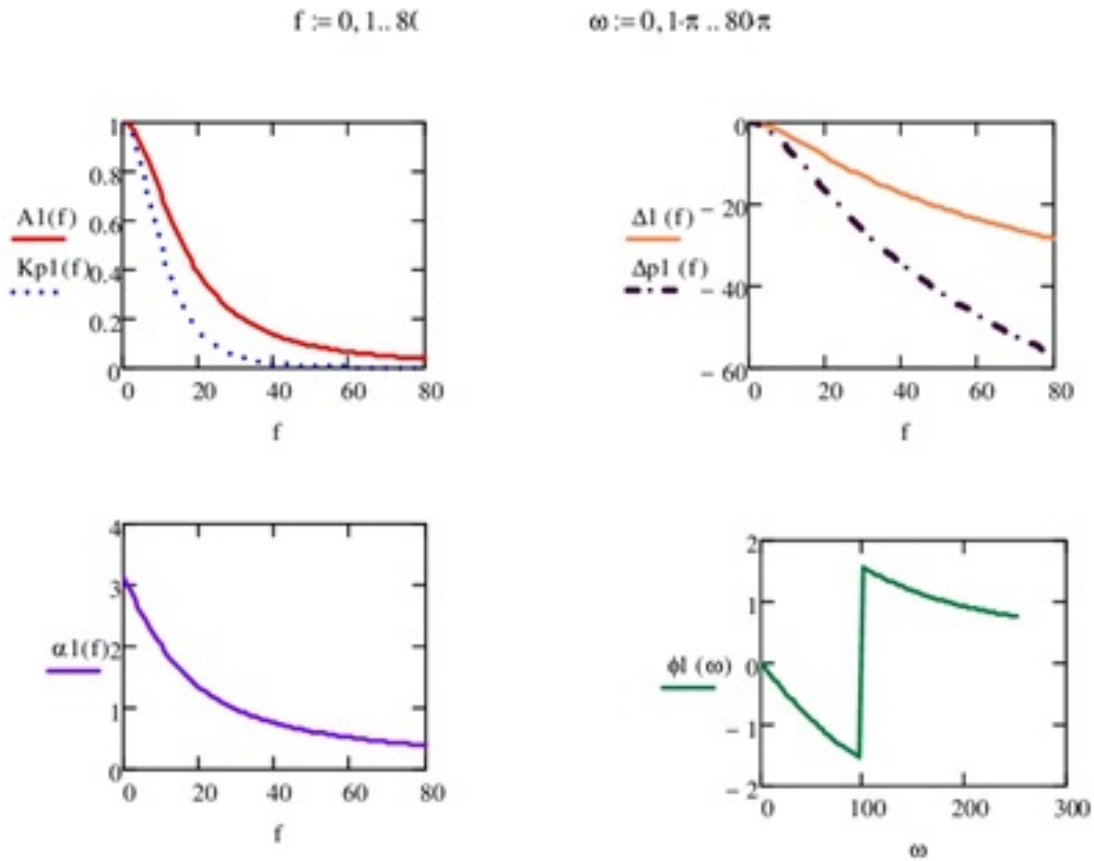
$$\omega_0 = 100$$

Задаване на фазо-честотната характеристика за областта на физическите честоти $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f > 0$:

$$f_0 := \frac{G}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{C1 \cdot C2}} \quad \alpha_1(f) := \begin{cases} (\pi + \phi_1(2 \cdot \pi \cdot f)) & \text{if } f \leq f_0 \\ \phi_1(2 \cdot \pi \cdot f) & \text{if } f > f_0 \end{cases}$$

$$f_0 = 15.915$$

Графики на зададените функции в диапазони на f и ω :



Фиг.3.9. Симулация на първото звено на филтъра. Прозорец от програмата

Математическо моделиране на третото звено на филтъра. Характеристики

Основни стойности:

$$f_c := 15.5 \quad \omega_c := 2 \cdot \pi \cdot f_c$$

$$R5 := 10 \cdot 10^3 \quad G1 := \frac{1}{R5} \quad G1 = 1 \times 10^{-4}$$

$$C5 := 1 \cdot 10^{-6} \quad G2 := 1 \times 10^{-4}$$

Дефиниране на предавателната функция на третото звено на филтъра:

$$K3(\omega) := \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 \cdot R5^2 \cdot C5^2}}$$

Пресмятане на имагинерната и реалната част на предавателната функция:

$$M3(\omega) := \text{Im}(K3(\omega))$$

$$D3(\omega) := \text{Re}(K3(\omega))$$

Пресмятане на амплитудно-честотната характеристика:

$$A3(f) := |K3(2 \cdot \pi \cdot f)|$$

Пресмятане на затихването на напрежението на изхода на звеното:

$$\Delta3(f) := 20 \log(A3(f))$$

Пресмятане на коефициента на предаване на мощност на звеното:

$$Kp3(f) := (A3(f))^2$$

Пресмятане на затихването на мощността на звеното:

$$\Delta p3(f) := 20 \log(Kp3(f))$$

Пресмятане на фазо-честотната характеристика на звеното:

$$\phi3(\omega) := \text{atan}\left(\frac{M3(\omega)}{D3(\omega)}\right)$$

Пресмятане на отношението на имагинерната част на предавателната функция към реалната част на предавателната функция:

$$B(\omega) := \frac{M3(\omega)}{D3(\omega)}$$

Задаване на фазо-честотната характеристика като функция спрямо особените точки:

$$\omega_0 := 10 \quad \alpha3(\omega) := \begin{cases} (\pi + \phi3(\omega)) & \text{if } \omega \leq \omega_0 \\ \phi3(\omega) & \text{if } \omega > \omega_0 \end{cases}$$

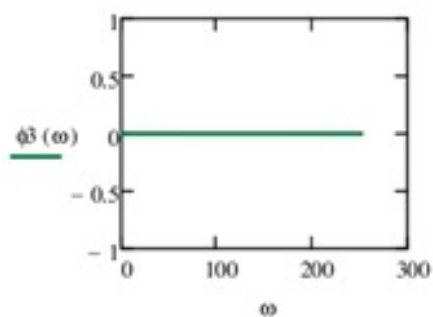
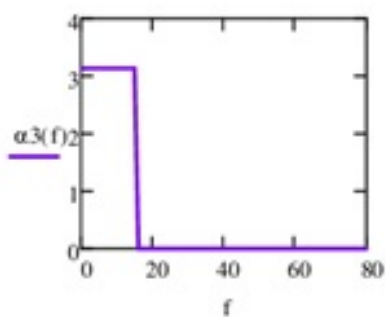
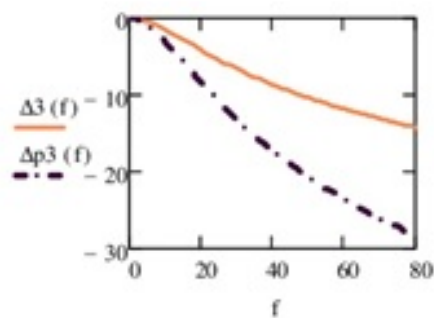
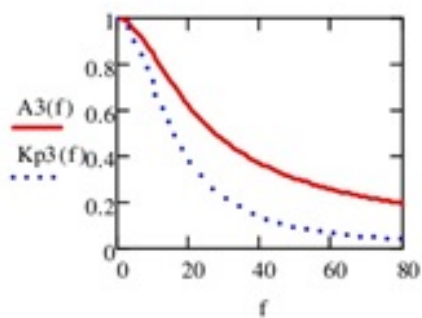
Задаване на фазо-честотната характеристика за областта на физическите честоти $\omega = 2\pi \cdot f > 0$:

$$f_0 := 15.91; \quad \alpha_3(f) := \begin{cases} \pi + \phi_3(2\pi \cdot f) & \text{if } f \leq f_0 \\ \phi_3(2\pi \cdot f) & \text{if } f > f_0 \end{cases}$$

Графики на зададените функции в диапазони на f и ω :

$$f := 0, 1..80$$

$$\omega := 0, 1 \cdot \pi .. 80 \pi$$



Фиг.3.10. Симулация на третото звено на филтъра. Прозорец от програмата

Математическо моделиране на тризвения филтър. Характеристики

Основни стойности:

$$f_c := 15.5$$

$$\omega_c := 2 \cdot \pi \cdot f_c$$

$$R1 := 10 \cdot 10^3$$

$$G1 := \frac{1}{R1}$$

$$G1 = 1 \times 10^{-4}$$

$$R2 := 10 \cdot 10^3$$

$$G2 := \frac{1}{R2}$$

$$G2 = 1 \times 10^{-4}$$

$$R3 := 10 \cdot 10^3$$

$$G3 := \frac{1}{R3}$$

$$R4 := 10 \cdot 10^3$$

$$G4 := \frac{1}{R4}$$

$$R5 := 10 \cdot 10^3$$

$$G5 := \frac{1}{R5}$$

$$G5 = 1 \times 10^{-4}$$

$$C1 := 1 \cdot 10^{-6}$$

$$C2 := 1 \cdot 10^{-6}$$

$$C3 := 1 \cdot 10^{-6}$$

$$C4 := 1 \cdot 10^{-6}$$

$$C5 := 1 \cdot 10^{-6}$$

Дефиниране на предавателната функция на всяко от трите звена на филтъра:

$$K1(\omega) := \frac{1}{1 + i \cdot C2 \cdot (R1 + R2) \cdot \omega - C1 \cdot C2 \cdot R1 \cdot R2 \cdot \omega^2}$$

$$K2(\omega) := \frac{1}{1 + i \cdot C4 \cdot (R3 + R4) \cdot \omega - C3 \cdot C4 \cdot R3 \cdot R4 \cdot \omega^2}$$

$$K3(\omega) := \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 \cdot R5^2 \cdot C5^2}}$$

Дефиниране на общата предавателна функция на филтъра:

$$K4(\omega) := K1(\omega) \cdot K2(\omega) \cdot K3(\omega)$$

Пресмятане на имагинерната и реалната част на общата предавателна функция:

$$M4(\omega) := \text{Im}(K4(\omega))$$

$$D4(\omega) := \text{Re}(K4(\omega))$$

Пресмятане на амплитудно-честотната характеристика на филтъра:

$$A4(f) := |K4(2 \cdot \pi \cdot f)|$$

Пресмятане на затихването напрежението на изхода на филтъра:

$$\Delta 4(f) := 20 \cdot \log(A4(f))$$

Пресмятане на коефициента на предаване на мощност на филтъра:

$$Kp4(f) := (A4(f))^2$$

Пресмятане на затихването на мощността на филтъра:

$$\Delta p_4(f) := 20 \log(Kp_4(f))$$

Пресмятане на фазо-честотната характеристика на филтъра:

$$\phi_4(\omega) := \arctan\left(\frac{M_4(\omega)}{D_4(\omega)}\right)$$

Пресмятане на отношението на имажинерната част на предавателната функция към реалната част на предавателната функция:

$$B(\omega) := \frac{M_4(\omega)}{D_4(\omega)}$$

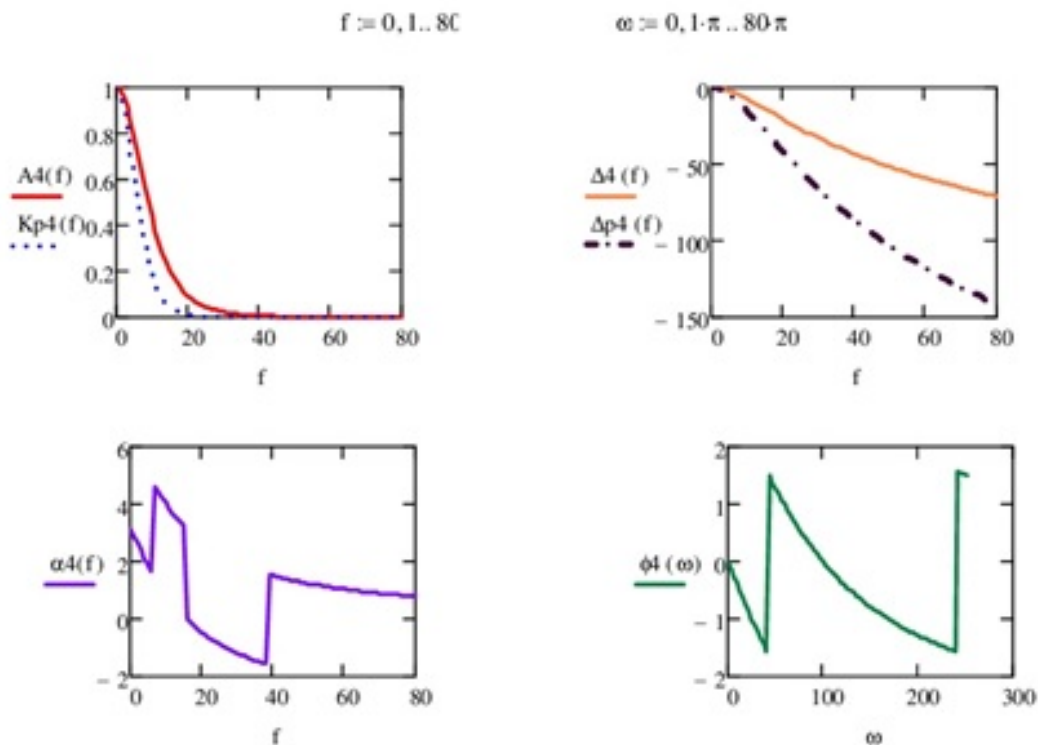
Задаване на фазо-честотната характеристика като функция спрямо особените точки:

$$\omega_0 := 10\pi \quad \alpha_4(\omega) := \begin{cases} (\pi + \phi_4(\omega)) & \text{if } \omega \leq \omega_0 \\ \phi_4(\omega) & \text{if } \omega > \omega_0 \end{cases}$$

Задаване на фазо-честотната характеристика за областта на физическите честоти $\omega = 2\pi \cdot f > 0$:

$$f_0 := 15.915 \quad \alpha_4(f) := \begin{cases} (\pi + \phi_4(2\pi \cdot f)) & \text{if } f \leq f_0 \\ \phi_4(2\pi \cdot f) & \text{if } f > f_0 \end{cases}$$

Графики на зададените функции в диапазони на f и ω :



Фиг.3.11. Симулация на целия филтър. Прозорец от програмата

АЧХ на филтъра ясно показва, подтискане на честотите над 40 Hz.

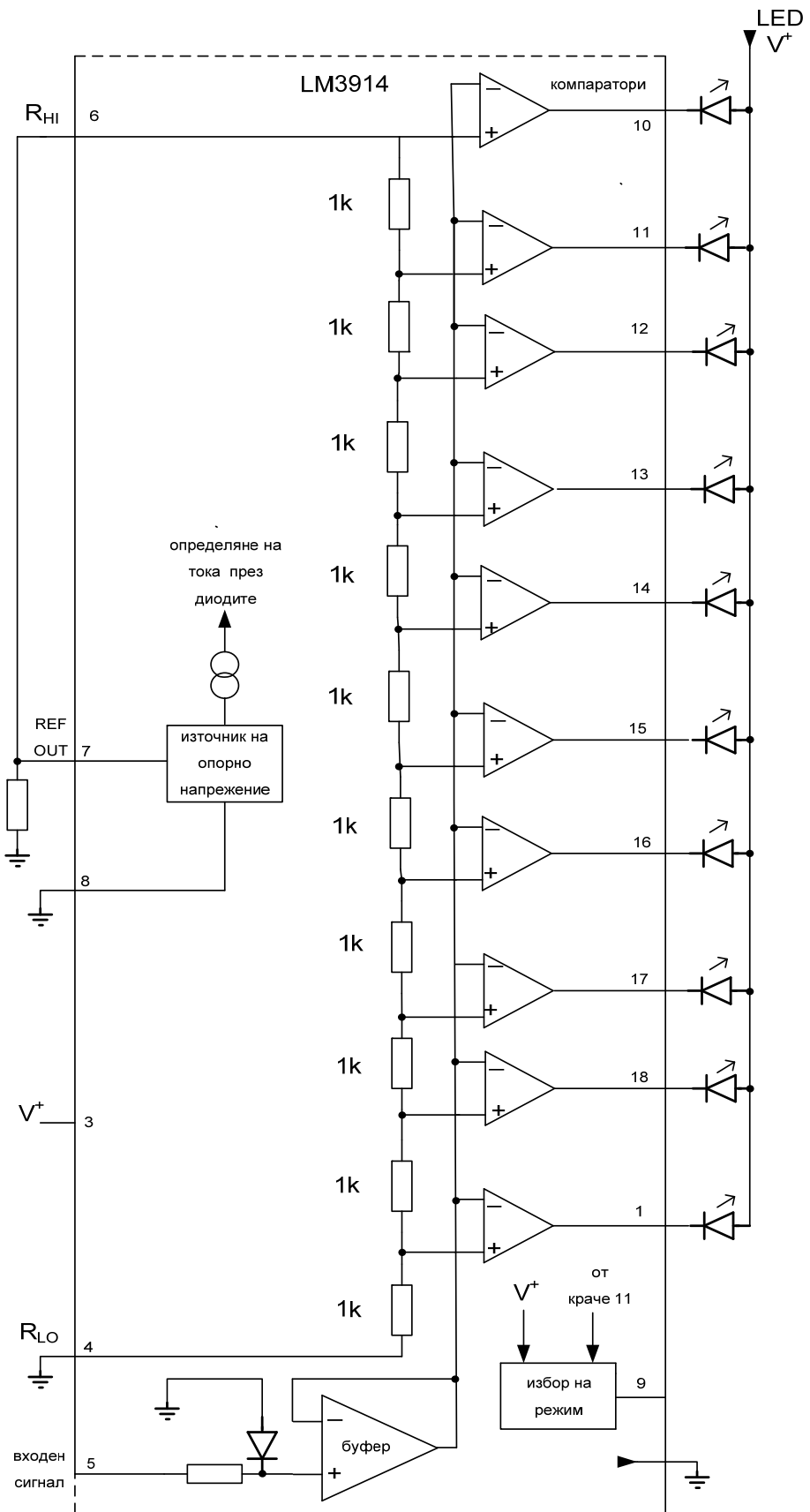
3.5.Блок Индикация

Индикацията на апарата за контрол на изолацията е реализирана с помощта на интегралната схема LM3914 (фиг.3.12). Това е схема за управление на точков или стълбов дисплей, който позволява да се регистрира величината на аналогов сигнал.

LM3914 е много гъвкава. Изходите могат да управляват течни кристали, флуоресцентни лампи или лампи с нажежаема жичка, както и многоцветни светодиоди. Няколко такива устройства могат да се свържат в каскада и да увеличат обхвата на дисплея. ИС LM3914 може да се намери като линейна и логаритмична.

Особености:

- бързо регистриране на съответното ниво;
 - управление на светодиоди, течни кристали или флуоресцентни линии;
 - стълбове или точково показание което се избира от потребителя;
 - разширяване на дисплея до 70 dB;
 - вътрешно опорно напрежение от 1,2 V до 12 V;
 - работа с един единствен източник от 3 V до 25 V;
 - входовете работят от земя;
 - програмируем изходен ток от 1 mA до 30 mA;
 - издържа на входа до $\pm 35V$ без да се повреди или сработи фалшиво;
 - изходите са регулируеми по ток с отворени колектори;
 - възможност за работа с TTL и CMOS схеми;
 - вътрешният 10 стъпков делител е плаващ и може да се използва за широк обхват от напрежение.
- LM3914 е предназначена за работа от $0^{\circ}C$ до $+70^{\circ}C$.



Фиг.3.12. Блокова схема на LM3914

3.6.Пресмятане на обхвата

При устройствата за контрол на изолацията, разгледани в предишните страници, например УАКИ, се използват стрелкови уреди, които регистрират състоянието на изолационното съпротивление. За да може да се вижда ясно, те са снабдени и с лампа която да осветява скалата. Тези устройства работят при тежки условия като влага и запрашеност. При апаратът за контрол на изолацията, регистрацията е със светлинна точка или стълб, както е споменато по-горе, нещо, което е значително по-удобно за регистрация. И тъй като се използват десет светодиода (интегралната схема позволява и повече), е добре да се знае всеки светодиод какво изолационно съпротивление регистрира. За да се получи графиката се използва следната формула:

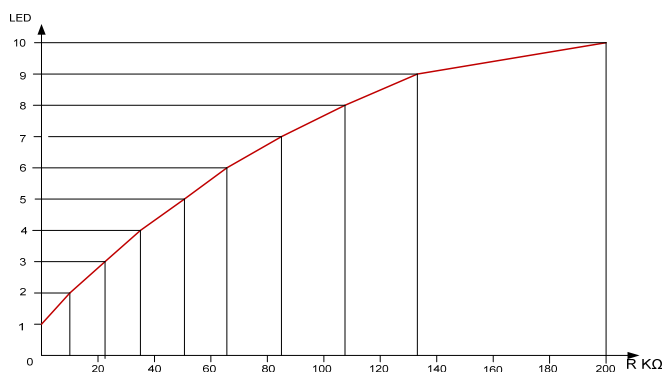
$$R_{\text{из}} = \frac{2 \cdot 10^5}{2-U} U . \quad (3.33)$$

За U е даден обхват 1 V. Този обхват е разделен на десет (има десет светодиода) и съответно се пресмятат стойностите на $R_{\text{из}}$. Данните са показани в таблица 3.4.

Таблица 3.4

U	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	1
R из kΩ	10,5	22,2	35,3	50	66,6	85,7	107,6	133	200

От данните в таблица 3.4 се получава графика, показана на фиг.3.13.



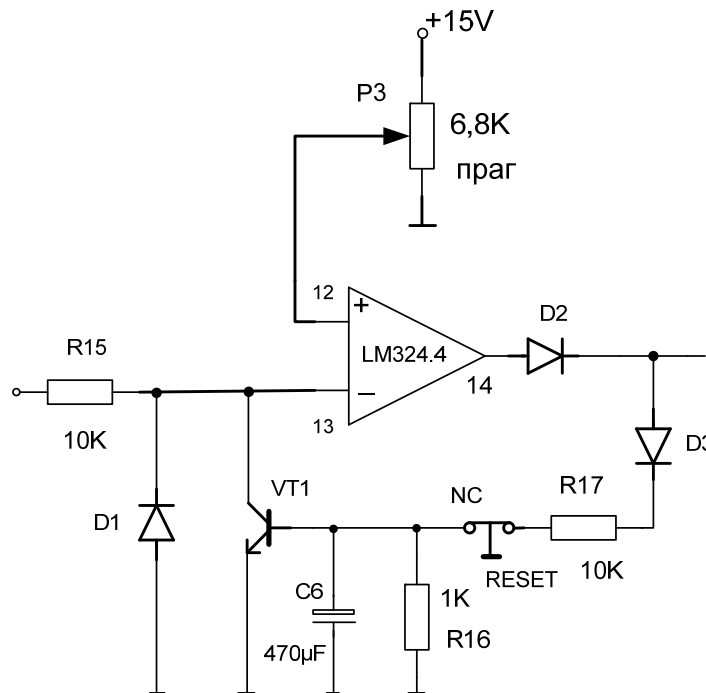
Фиг.3.13.Активиране на светодиода като функция на изолационното съпротивление.

От графиката на фиг.3.13 лесно може да се определи състоянието на изолационното съпротивление на електросъоръжението, според номера на

активирувания светодиод или светодиоди (ако апарата работи в режим на светещ стълб).

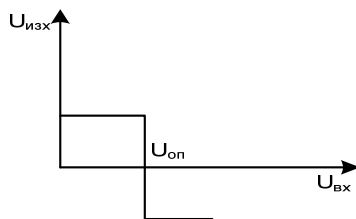
3.7.Компаратор и тригер

За компаратор се използва последният, четвърти ОУ на интегралната схема LM324 (фиг.5.20).



Фиг.3.14. Компаратор и тригер на устройството за контрол на изолацията

Компараторът работи по следния начин: когато $R_{из}$ е високо, усиленият и филтриран сигнал от третия ОУ минава през резистора R15 и се подава на инвертиращия вход на четвъртия ОУ. На изхода на компаратора нивото е отрицателно (фиг.5.21). При понижаване на изолационното съпротивление $R_{из}$ се понижава и нивото на сигнала на входа на компаратора. Ако нивото на сигнала се понижи под едно предварително зададено ниво, праг на задействане, компараторът на изхода подава положителен сигнал, който сигнал минава през D2, R18 и постъпва на базата на транзистора VT2.



Фиг.3.15. Графика, поясняваща работата на компаратора

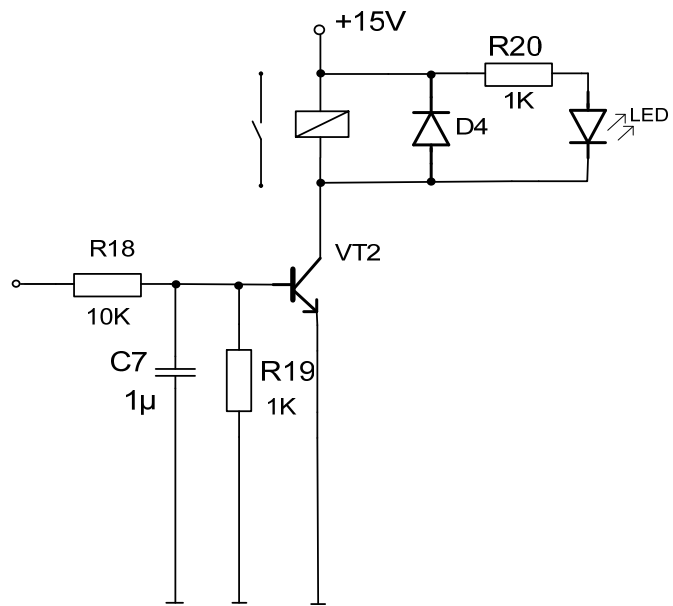
Успоредно на компаратора е свързан тригер. Задачата на тригера е да превключи при краткотрайно понижение на изолационното съпротивление, сигнала, постъпващ на входа на компаратора, формира на изхода му краткотраен сигнал с положително ниво, който през резистор R17, нормално затворения бутон RESET, се подава на транзистора VT1. Транзисторът, който работи в ключов режим се отпущва, тригерът се обръща и инвертирания вход на компаратора се дава на маса, респективно получава ниско ниво. По този начин компаратора се самозадържа. Кондензаторът С6 свързан между базата на транзистора и масата предпазва от фалшиво задействане на изпълнителното реле. При задействане на бутона RESET, тригерът се връща в първоначалното си положение.

Праговото ниво на компаратора се настройва посредством потенциометъра P3, който изпълнява ролята на регулатор.

3.8.Изпълнително устройство

На фиг.3.16 е показано изпълнително устройство на апарата за контрол на изолацията.

Изходът на компаратора е свързан с тригера и изпълнителното устройство. Изпълнителното устройство е съставено от n-p-n транзистор, който работи в ключов режим. В колекторната верига на транзистора е включено електромагнитно реле, което е снабдено с нормално отворен контакт. Успоредно на релето е свързан полупроводников диод и светодиода серийно през резистор. Светодиодът служи за индикация на състоянието на релето, а диода предпазва транзистора от напрежение на самоиндукция. При понижаване на $R_{из}$ се понижава и U_m . Когато напрежението падне под определено ниво, на изхода на компаратора се формира положителен сигнал, който отпущва транзистора. Токът протичащ през отпушения транзистор задейства релето, което със своя контакт затваря веригата на изключващата бобина. Тя, от своя страна, изключва контролираната верига.



Фиг.3.16. Изпълнително устройство на апарата за контрол на изолацията

4.Лабораторни и експериментални изследвания

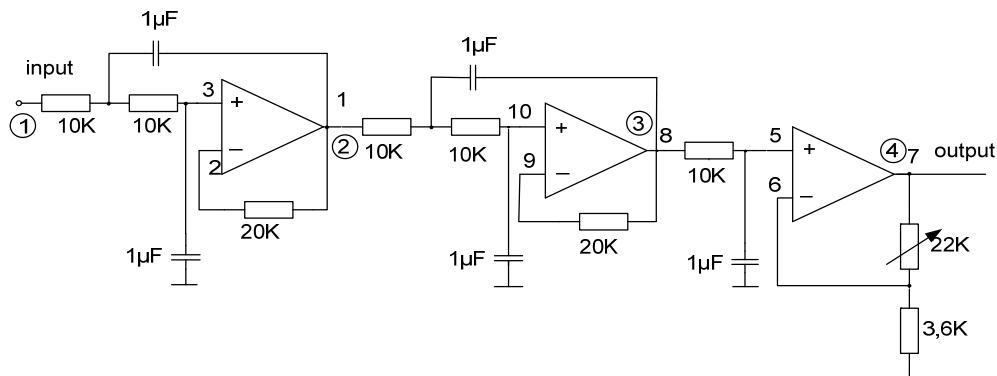
4.1.Изследване на филтъра на устройството за контрол на изолацията

Устройството за контрол на изолацията е реализирано на експериментални платки /фиг.4.1/ и в лабораторни условия са снети осцилограми, показващи работа на филтъра.



Фиг.4.1. Опитна постановка за изпитване на апарата в лабораторни условия.

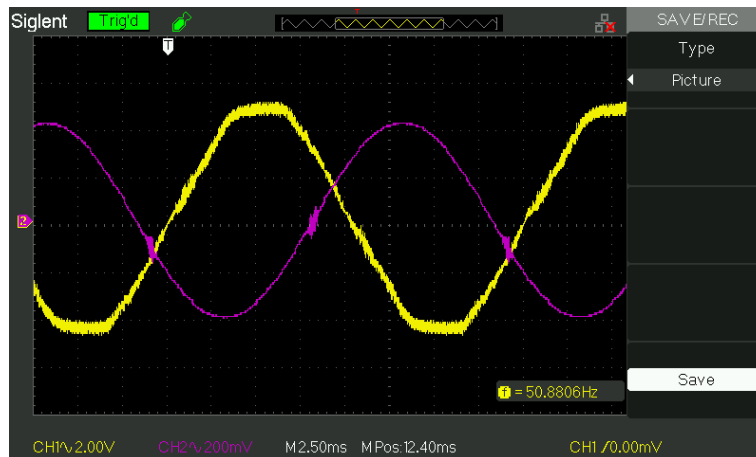
На фиг.4.2 е показана схема на филтъра за контрол на изолацията с посочени точки на измерване.



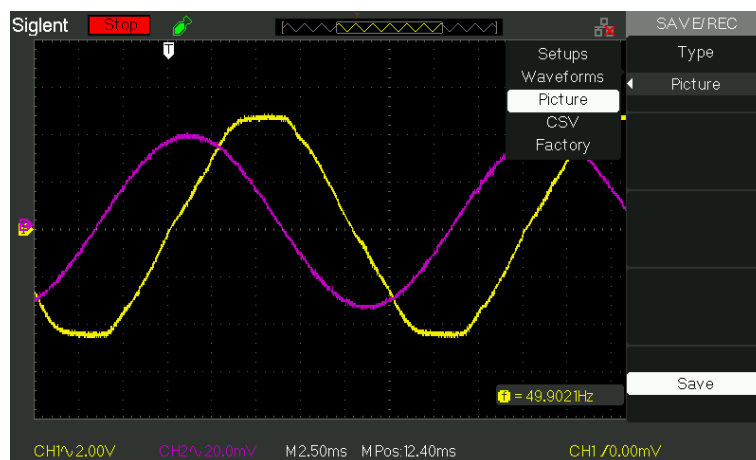
Фиг.4.2. Филтър на апарата за контрол на изолацията.
(цифрите, заградени с окръжност, показват точките на измерване)

Снети са осцилограми за работата на филтъра с цифров двуканален осцилоскоп SIGLENT SDS1102 CML+. На фиг.4.3. е показана първата осцилограма, като първи канал е свързан към точка 1, а втори канал към точка 2. По този начин се вижда входният и изходният сигнал на първото звено на филтъра. Следващата осцилограма, фиг.4.4. показва работата на първите две звена от филтъра, а третата осцилограма - работата на целия

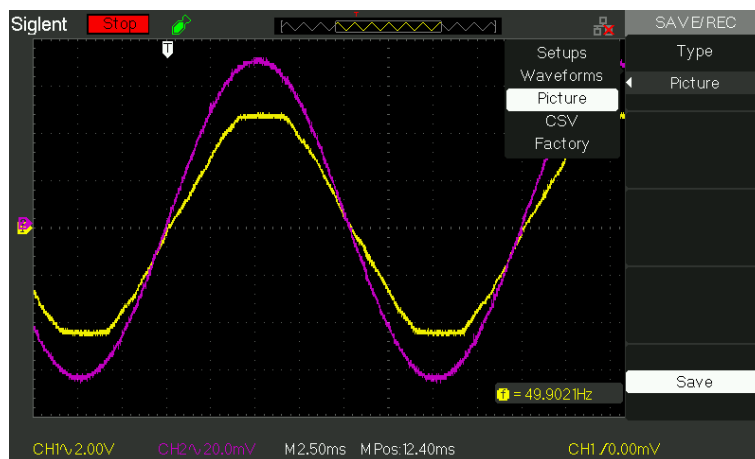
филтър и третият операционен усилвател, който усилва контролния сигнал. В долния десен ъгъл се вижда честотата на сигнала, който се изследва, т.е. промишлената честота 50Hz. В реални условия честотата се колебае около 50Hz. От фиг. 4.3 може ясно да се види, че входният сигнал е с амплитуда 2V, а изходният има амплитуда 20 mV. Филтърът успешно потиска промишлената честота от 50Hz повече от сто пъти!



Фиг.4.3. Снета осцилограма между точка 1 и 2 на филтъра

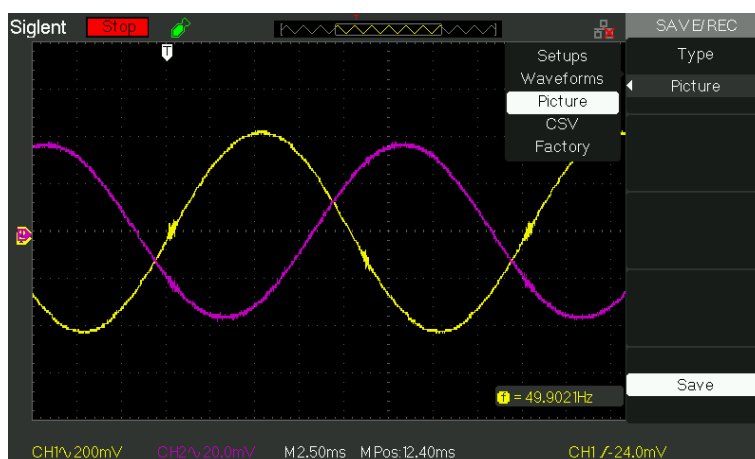


Фиг.4.4. Осцилограма между точка 1 и точка 3.
Това включва първите две звена на филтъра



Фиг.4.5. Снета осцилограма между точка 1 и точка 4

Следващата осцилограма на фиг.4.6 показва работата на второто звено на филтъра. Канал 1 е включен към точка 2, а втори канал - към точка 3. Оттук може да се отчете, че дефазиранието на второто стъпало на филтъра е около 157° .

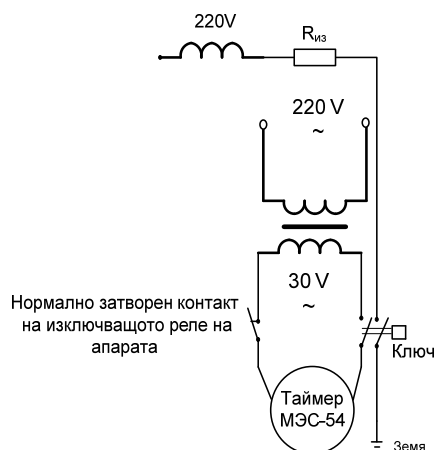


Фиг.4.6. Осцилограма на второто звено на филтъра

Ясно се вижда на фиг.4.6. дефазиранието между входния и изходния сигнал.

4.2. Определяне на бързодействието на апарата за контрол на изолацията

За определяне на бързодействието на апарата е използвана схема, показана на фиг.4.7. За таймер се използва брояч на импулси МЭС-54, който се захранва с променливо напрежение 30V, което се получава от трансформатор.



Фиг.4.7. Схема на свързване на брояча МЭС-54 за измерване на бързодействието

Броячът се захранва с променливо напрежение 30V, което се получава от трансформатор. Последователно на брояча е свързан нормално затвореният контакт на релето на изпълнителното устройство, а от другата страна на брояча, последователно е свързан двоен ключ. Единият контакт на отворения ключ е свързан към източника на напрежение, в случая трансформатора и съответно към брояча. Вторият контакт е свързан към мрежата, която се контролира и земя. При затваряне на ключа се имитира ниско изолационно съпротивление и от този момент броячът започва да отброява, апаратът за контрол на изолацията се задейства, релето се включва и нормално затвореният контакт прекъсва работата на брояча. Отчита се времето. При така направената постановка се получиха данни, показани в таблица 4.1.

Таблица 4.1.

Изолационно съпротивление	Време на сработване на релето
40 KΩ	200ms
30KΩ	140ms
20KΩ	120ms
10KΩ	90ms

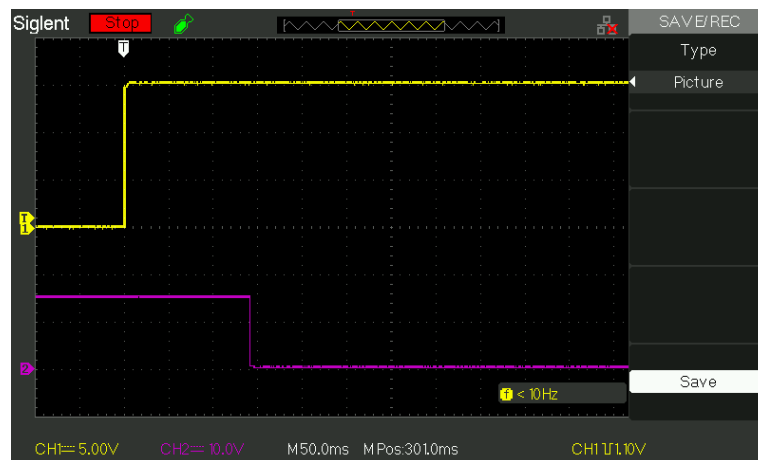
Според[8] БДС собственото време на задействане на апарата за общомрежова защита при съпротивление на еднофазна утечка 1KΩ трябва да съответства на стойностите, посочени в таблица 4.2.

Таблица 4.2.

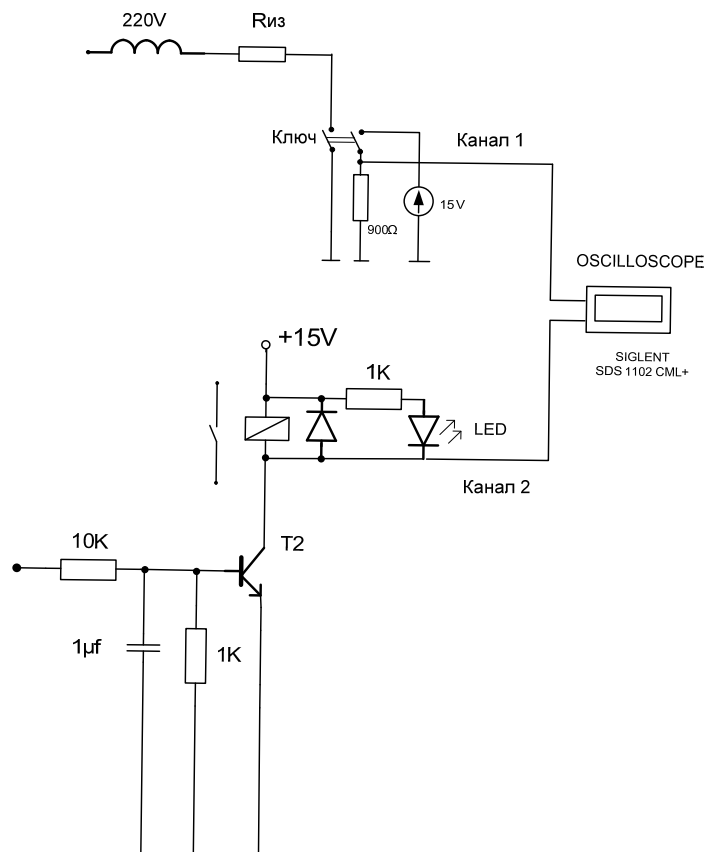
Номинално напрежение на мрежата, V	Собствено време на задействане с не повече от
до 1000	0,10

Данните от таблица 4.1. сравнени с изискванията на стандарта, показват, че апаратът за контрол на изолацията се вмести в изискванията за бързодействие. От същата таблица ясно се вижда, че с намаляване на изолационното съпротивление бързодействието се увеличава.

Проведен е още един експеримент за определяне бързодействието на апарата за контрол на изолацията, но този път вместо брояч се използва цифровия осцилоскоп SIGLENT SDS1102 CML+ (фиг.4.9). Първият канал е свързан към ключа, който дава към земя апарата за контрол на изолацията, т.е. имитира ниско изолационно съпротивление. Вторият канал е свързан към колектора на транзистора T2 и намотката на изпълнителното реле. Получена е осцилограма на фиг.4.8.



Фиг.4.8. Осцилограма показваща бързодействието на апарата за контрол на изолацията



Фиг.4.9. Определяне на бързодействието с осцилоскоп

Осцилограмата е получена при съпротивление на изолацията 30 KΩ.

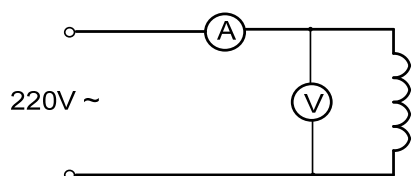
4.3.Работа на апарата в трифазна мрежа. Лабораторни изследвания

Апаратът, който е реализиран, е включен към трифазна мрежа, за да се проверят функционалните му възможности. Тъй като най-често срещаната повреда е еднофазна утечка към земя и съответно най-често срещания вид поражение от електрически ток, това е допир до една от фазите, то са проведени следните експерименти. Еднофазно понижение на изолацията, получено е с декаден резистор, който е свързан към една от фазите на системата. Допир на човек до една от фазите на системата е имитирано със съпротивление от 1000Ω.

Токът, който протича през тялото на човека може да се разглежда съставен от две компоненти: I_a , определен от изолационното съпротивление на фазите на мрежата, и капацитивна съставка I_c , която се определя от капацитивното съпротивление на изолацията. Обикновено се приема че капацитета на мрежата зависи линейно от нейната дължина. Според БДС апаратите за контрол на изолацията работещи в трифазна

мрежа с изолиран звезден център трябва да са снабдени с компенсиращо устройство. Като такава се използва дросел, чиято индуктивност е оразмерена спрямо мрежата към която е включен апаратът.

При експериментите са използвани три идентични дросела с по четири извода. За да се измери тяхната индуктивност е реализирана схемата на фиг.4.10.



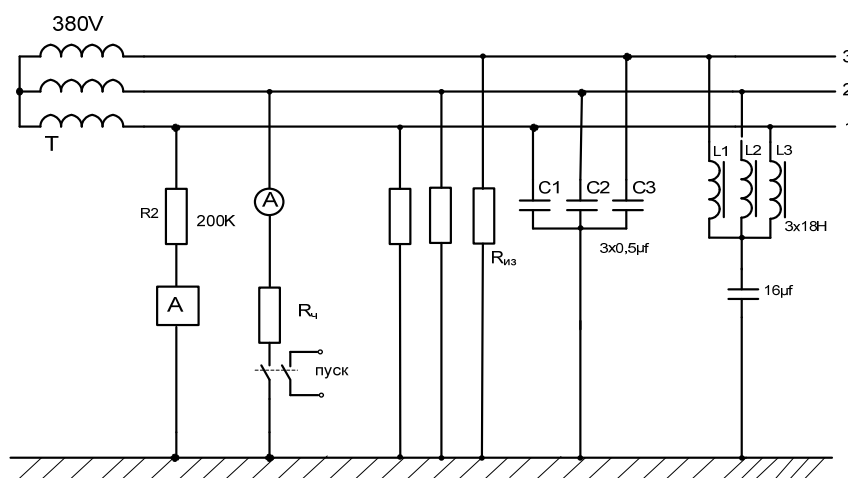
Фиг.4.10. Определяне индуктивността на бобина по метода на волтметъра и амперметъра.

Активното съпротивление на намотките е измерено с омметър. Напрежението на мрежата измерено с волтметър показва 225V. Данните са показани в таблица 4.3.

Таблица 4.3.

R[Ω]	I[mA]	$Z = \frac{U}{I}$ [Ω]	$X_L = \sqrt{Z^2 - R^2}$ [Ω]	L[H]	C[μf]
441	40	5625	5608	18	0,567
345	65	3460	3443	11	0,925
260	115	1956	1939	6	1,64
225	150	1500	1483	5	2,15

Експериментирана е следната схема, показана на фиг. 4.11:



Фиг.4.11. Схема с която се определя токът през човека

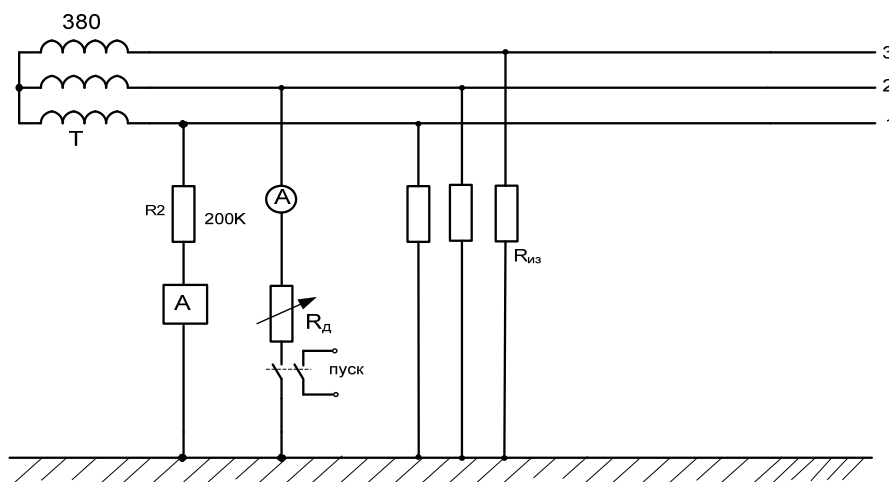
Стойността на $R_{\text{ч}} = 1000\Omega$. Резисторът имитира съпротивлението на човек допрял се до тоководеща част. Кондензаторът включен последователно на индуктивността спира постоянния ток на Апарата за контрол на изолацията. Получените данни са представени в таблица 4.4. Вижда се едно увеличение на тока през съпротивлението $R_{\text{ч}}$, когато към схемата се добавят кондензаторите, които внасят капацитивна проводимост. При наличие на индуктивност, свързана паралелно на кондензаторите, токът през $R_{\text{ч}}$ намалява, тъй като токовете през кондензатора и индуктивността са в противофаза. Пълно компенсиране на капацитивната съставка на тока не може да се получи, поради загуби в бобините.

Таблица 4.4.

Изоляционно съпротивление [kΩ]	40	30	20
Без отчитане на капацитивния ток [mA]	26	35	49
С отчитане на капацитивния ток [mA]	154	165	150
При наличие на компенсатор [mA]	62	64	78

Определяне на бързодействието

На фиг.4.12 е показна схемата за определяне на бързодействието на апарата, когато е включен към трифазна мрежа. Отчетените данни са показани на таблица 4.5.



Фиг.4.12. Определяне на бързодействието на апарата

За определяне на бързодействието е използван измерител на интервали - Л23. Промяната на $R_{\text{д}}$ (декадно) имитира еднофазна утечка.

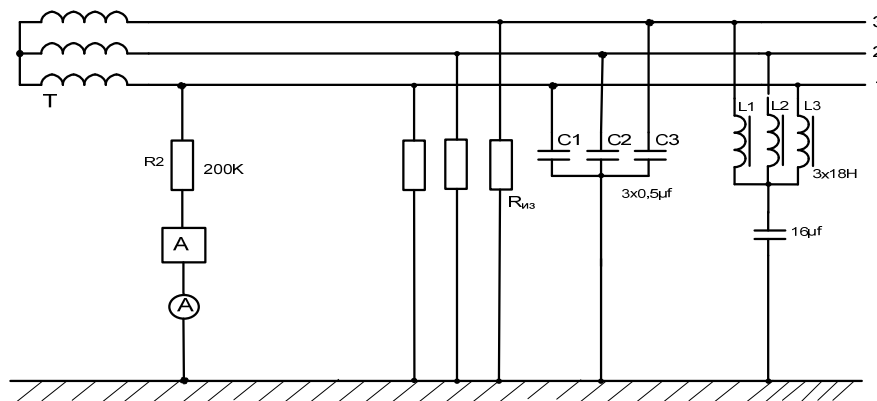
Таблица 4.5.

R_d [k Ω]	40	30	20	10	1
ΔT [ms]	150	150	120	110	95

При промяна на изолационното съпротивление, с неговото понижение, времето за задействане на апарата също намалява.

Ток през апарат за контрол на изолацията при симетрично понижение на изолационното съпротивление

На фиг.4.13 е показана схемата за определяне на тока през апарата за контрол на изолацията при симетрично понижение на съпротивлението на изолацията, а в таблица 4.6 – отчетените стойности.



Фиг.4.13. Определяне на токът, който минава през апарат за контрол на изолацията

Таблица 4.6.

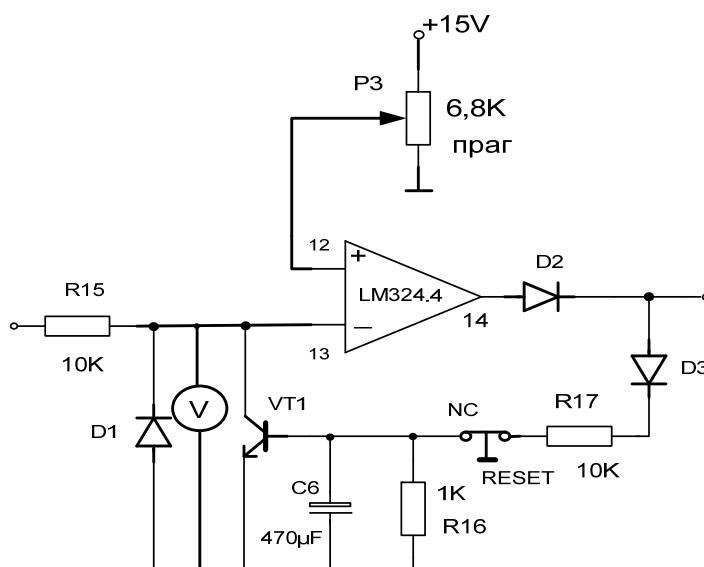
Изолационно съпротивление[k Ω]	40	30	20
Без отчитане на капацитета [mA]	1,6	1,8	1,8
С отчитане на капацитета [mA]	1,9	1,9	1,9
При наличие на компенсация [mA]	1,86	1,74	1,9

Благодарение на голямото съпротивление, свързано последователно на апарата, токът през него е с такава малка стойност.

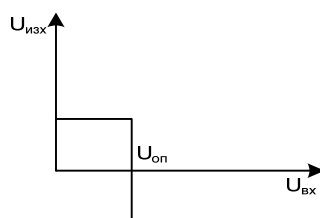
Измерени стойности на входното напрежение на компаратора при понижение на съпротивлението на изолацията

Компараторът (фиг.4.14), сравнява нивото на входното напрежение с напрежение, което е предварително зададено. При достигане на праговото ниво, на изхода на компаратора се формира положителен импулс, който отпушва транзисторния ключ VT2 и сработва изпълнителното реле. Рд е свързано към една от фазите на системата и имитира понижено

съпротивление на изолацията. С волтметър, включен на входа на компаратора, се отчита напрежението при различни стойности на изолационното съпротивление. При измерванията са получени данни, показани в таблица 4.7. Вижда се, че при понижаване на съпротивлението на изолация на една от фазите, $U_{вх}$ намалява, и при достигане предварително зададеното ниво на изхода се формира положителен импулс.



Фиг.4.14.Измерване входното напрежение на компаратора при наличие на еднофазна утечка



Фиг.4.15. Графика на $U_{изх}$ като функция на $U_{вх}$ на компаратор

Таблица 4.7.

R_d [k Ω]	40	30	20	10	1
$U_{вх}$	2,54	2,16	1,75	1,29	0,85

5.Надеждност на апарата за контрол на изолацията

Надеждността се свързва с недопустимия отказ на изделието. В тесен смисъл се разбира безокказността, т.е. свойството на обекта да запазва своята работоспособност в течение на определено време без прекъсване.

Възможни са два начина за пресмятане на показателите за надеждност на обектите по данни за отказите.

- 1) Изчисление на експерименталното разпределение на наработката до отказ.
- 2) Изчисление на параметрите на теоретичното разпределение на наработката до отказ.

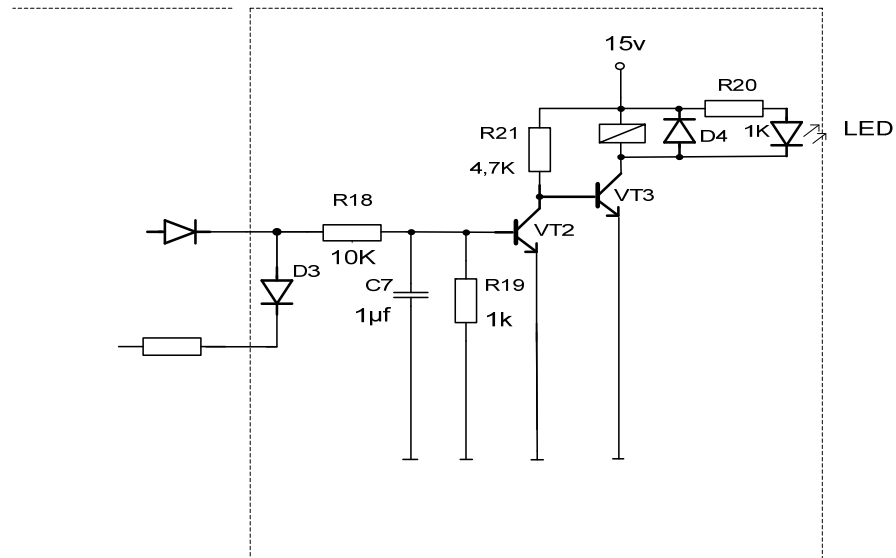
Вероятностните методи на изследване основно се развиват по пътя на използването на теоретичното разпределение.

В качеството на теоретично разпределение на наработката до отказ могат да се използват всички използвани в теорията на вероятностите непрекъснати разпределения. По принцип може да се вземе всяка крива, лицето под която е равна на единица, и да се използва в качеството на крива на разпределение на случайна величина.

5.1.Самоконтрол на елементите

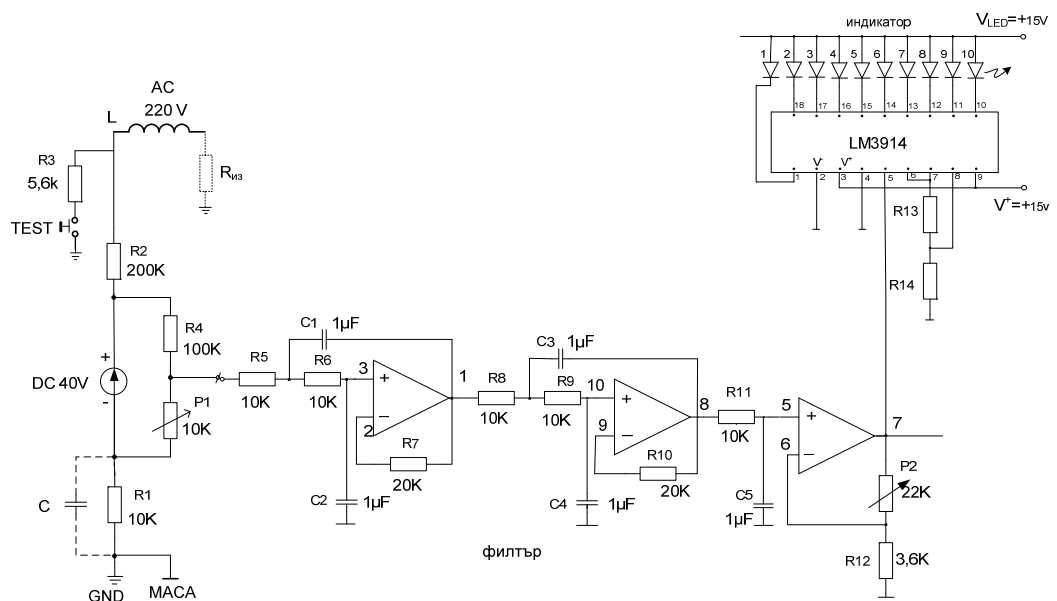
Възможно е в така реализирания апарат за контрол на изолацията да се въведе самоконтрол на елементите. При наличие на такъв контрол се предотвратява експлоатацията на контролираната мрежа при неизправен апарат. В този случай изпълнителното устройство се състои от два транзистора, които са свързани директно (фиг.5.1). Релето е включено към колекторната верига на крайният транзистор и е снабдено с нормално затворен контакт. При нормална работа на апарата и изолационно съпротивление в норма, първият транзистор на изпълнителното устройство е запушен, а вторият транзистор е отпушен. Колекторният ток, който минава през вторият транзистор, задейства електромагнитното реле и нормално затвореният контакт на релето е отворен. При понижено изолационно съпротивление или при повреда в апарата, вторият транзистор се запушва, релето се обезточва, котвата на релето отпуска и нормално затвореният контакт включва веригата на изключващата бобина, която изключва контролираната мрежа.

Принципът на самоконтрол обезпечава висока, близка до единица вероятност за изпълнение на основните функции на защита.

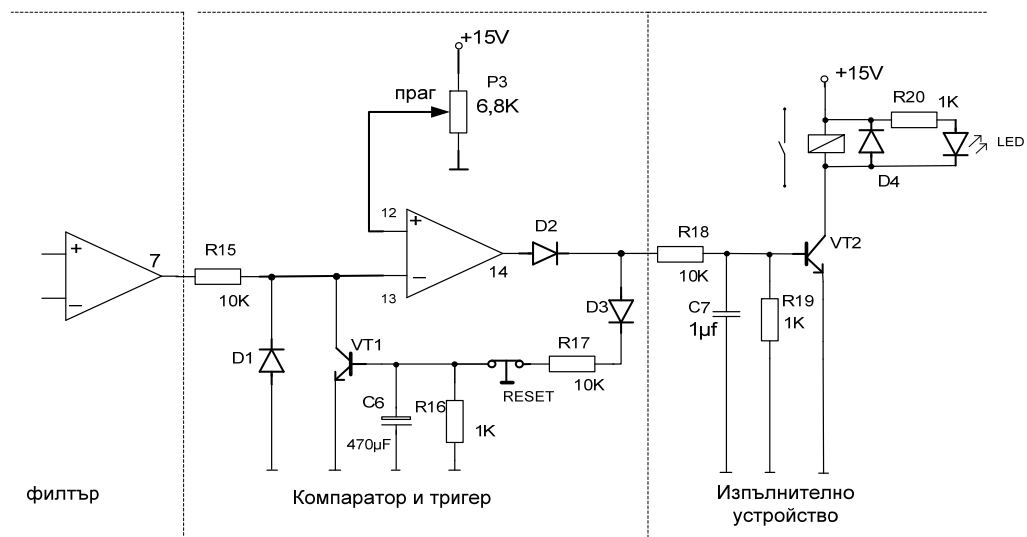


Фиг.5.1. Изпълнителен блок с контрол на елементите

Пълната схема на Апарата за контрол на изолацията е показана на фиг.5.2 и фиг.5.3.



Фиг.5.2. Пълна схема на Апарата за контрол на изолацията №1



Фиг.5.3. Пълна схема на Апарата за контрол на изолацията №2

Заклучение

От направените теоретични и експериментални изследвания в съответствие с целите и задачите на дисертационния труд може да се каже че така реализирания апарат отговаря на нормите и изискванията на БДС.

НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

Апаратът конструиран по този начин е компактен, т.е. с малка маса и габарити, работи в мрежа с напрежение 220 V, както и в трифазна мрежа с напрежение 380 V при наличие на компенсатор.

Има възможност изпълнителното устройство да се реализира със самоконтрол на елементите което повишава чувствително надеждността на апарата.

Съставен е математически модел на поражение от електрически ток в трифазна мрежа, като структурна блок схема и вероятностна блок схема.

Проведени са симулации на всяко от звената на филтъра в програмна среда на РТС Mathcad както и симулация на целия филтър на апарата.

Данните за филтъра получени по време на работа на апарата в лабораторни условия показват че, филтъра отговаря на изискванията за бързина и филтрира успешно промишлената честота от 50 Hz на мрежата, като в същото време усилва сигнала който носи полезната информация за състоянието на съпротивлението на изолацията на контролираната мрежа.

Поради липса на статистически данни е направен опит да се пресметне надеждността на апарата като се използват вероятностни оценки на компонентите на устройството.

Публикации във връзка с дисертацията

1.Зъбчев А. Тенев Р. Контрол на изолацията в руднични комбинирани мрежи. Год. на МГУ „Св. Иван Рилски” ISSN1312-1820, Том 56, Св.III,” Механизация, електрификация и автоматизация на мините”, стр.97-99, 2013.

2.Зъбчев А. Тенев Р. Петков В. Оценка на ефективността на релета за контрол на токове от утечка тип РУ-380 и УАКИ-380 и анализ на най-често проявяваните повреди в схемите им. ISSN1314-3425, Научни трудове, том V, стр.600-605,2014.

3.Тенев Р. Апарати за контрол на изолацията в променливотокови мрежи. СУБ, ISSN1314-3425, 2017.

4.Tenev R. Possibilities for Increasing the Reliability of the Insulation Monitoring Devices. Journal of mining and geological sciences. Vol.60. part III, Mechanization, Electrification and Automation in mines, p.67-71, 2017.