

ЛЕКЦІЯ 5

3.4.1. Вимірювання опору ізоляції й коефіцієнта абсорбції

Опір ізоляції постійному струму визначають як відношення прикладеної до ізоляції постійної напруги до струму, що проходить у ній:

$$R_{із} = \frac{U}{I}.$$

Зменшення опору ізоляції свідчить про її сильне зволоження чи наявність наскрізних дефектів. Проте, здійснюючи контроль ізоляції за її опором, слід брати до уваги особливості, пов'язані з фізичними процесами, що відбуваються в ізоляції.

Зазвичай ізоляція неоднорідна; вона складається з декількох шарів з різними діелектричними характеристиками.

Розглянемо найпростіший випадок (рис.3.7, а) двошарової ізоляції (наприклад, папір – трансформаторне масло). Схему її заміщення показано на рис.3.7, б. Під дією постійної напруги в ізоляції проходить наскрізний струм i_n , обумовлений її електропровідністю. У цьому випадку

$$i_n = \frac{U}{R_1 + R_2}.$$

У момент прикладання до ізоляції напруги в ній, крім наскрізного струму, проходить обумовлений перерозподілом електричного заряду струм абсорбції $i_{абс}$, оскільки у початковий момент визиває розподіл напруги обернено пропорційно ємностям шарів:

$$\frac{U_{1п}}{U_{2п}} = \frac{C_2}{C_1}. \quad (3.4.1)$$

У сталому режимі розподіл напруги визначається опорами шарів:

$$\frac{U_{1ст}}{U_{2ст}} = \frac{R_1}{R_2}. \quad (3.4.2)$$

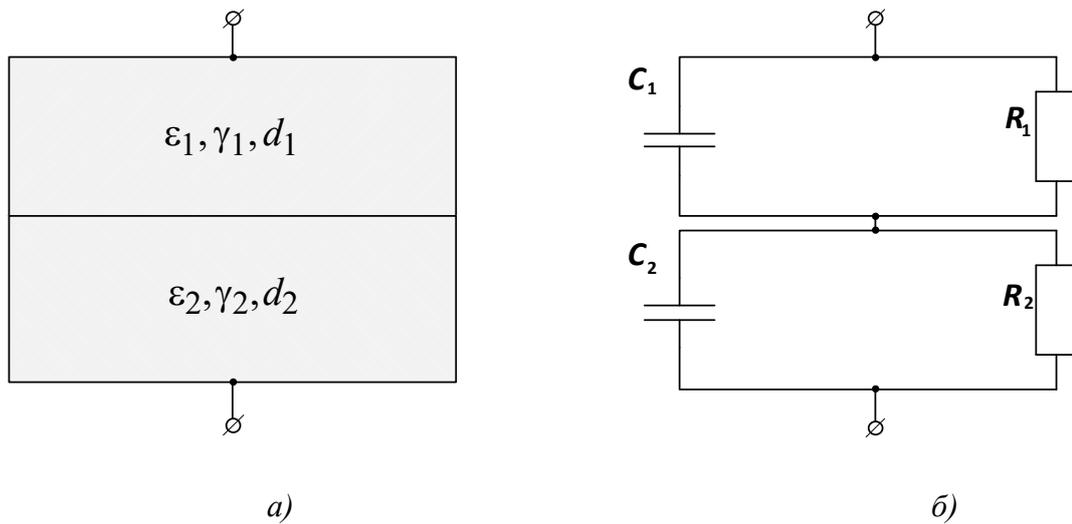


Рис. 3.7. Двошарова ізоляція (а) та її схема заміщення (б)

Зі співвідношень (3.4.1) і (3.4.2) випливає, що $U_{1п} = U_{1ст}$ і $U_{2п} = U_{2ст}$ тільки тоді, коли $R_1C_1 = R_2C_2$.

Ця умова зазвичай не виконується, тому в шарах ізоляції відбувається зміна напруженості електричного поля за рахунок нагромадження зарядів на межі поділу шарів і проходить струм абсорбції, котрий згодом спадає та стає рівним нулю, коли закінчується процес зміни поля в ізоляції. Значення струму абсорбції можна виразити так:

$$i_{абс}(t) = \frac{U(R_1C_1 - R_2C_2)^2}{R_1R_2(R_1 + R_2)(C_1 + C_2)^2} e^{-t/\tau}, \quad (3.4.3)$$

де
$$\tau = \frac{R_1R_2(C_1 + C_2)}{R_1 + R_2}.$$

Повний струм в ізоляції визначають за формулою

$$i(t) = i_{п} + i_{абс}.$$

З вищевикладеного випливає, що струм в ізоляції з часом спадає, а опір зростає (рис. 3.8). Тому з метою порівняння даних, отриманих під час контролю за станом устаткування, опір його ізоляції прийнято вимірювати через певні проміжки часу після початку прикладання напруги. Нормативними документами для більшості устаткування цей проміжок встановлений значенням 60 с (відповідне позначення опору - R_{60}). Якщо вважати, що до цього моменту складові струму в ізоляції досягнуть співвідношення $i_{абс} \ll i_{п}$, тоді $R_{13} = R_{60} = R_1 + R_2$.

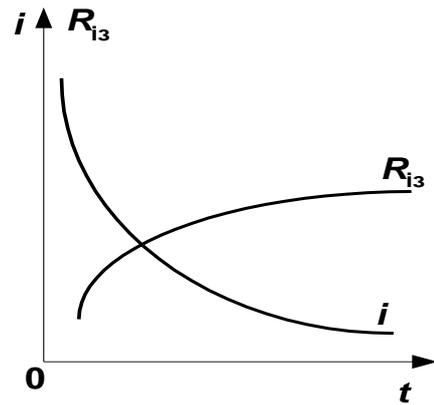


Рис. 3.8. Залежність опору ізоляції та струму в ній від часу

У разі зволоження одного з шарів його опір знижується, як і загальний опір ізоляції. Однак це зниження стає помітним тільки тоді, коли зволоження захоплює значну товщину ізоляції. В іншому випадку загальний опір визначається високим опором незволоженого шару.

Водночас незначне поверхневе забруднення чи зволоження ізоляції може спричинити різке зниження її опору та помилковий висновок про необхідність сушіння ізоляції.

Опір ізоляції залежить не тільки від її стану, але й від геометричних розмірів (товщини, площі). У зв'язку з цим неможливо запровадити єдині норми для опору ізоляції, тому отримані результати вимірювань порівнюють із даними заводських або попередніх вимірювань для випробуваного об'єкта.

Порівнюючи результати вимірювань, треба враховувати сильну залежність опору ізоляції від її температури. Для ізоляції на основі слюди, яку широко застосовують в електричних машинах, можна вважати, що опір R_{60} знижується удвічі в разі підвищення температури на $18\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Для ізоляції трансформаторів, яка складається з целюлозних діелектриків (папір, картон тощо) і масла, температурний перерахунок опору виконують за формулою

$$R_{02} = R_{01}/K,$$

де R_{01} і R_{02} – опори відповідно за температур θ_1 і θ_2 ; K - коефіцієнт перерахунку опору, що залежить від різниці температур $\Delta\theta$ вимірювань значень R_{02} і R_{01} ($\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$).

Значення коефіцієнта K наведено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2

$\theta_2 - \theta_1, ^\circ\text{C}$	5	10	15	20	25	30	35
K	1,23	1,50	1,84	2,25	2,75	3,4	4,15

Температура ізоляції не однакова на всіх її ділянках. Зазвичай як середню беруть температуру обмотки трансформатора, яку визначають, вимірюючи її опір постійному струму.

Вимірювання опору ізоляції можна вважати контрольним методом для виявлення наскрізних дефектів, поверхневого чи глибокого об'ємного зволоження ізоляції.

Визначення коефіцієнта абсорбції. Коефіцієнтом абсорбції називають відношення опорів ізоляції, визначених через 15 і 60 с після прикладення випробувальної постійної напруги:

$$K_{\text{абс}} = \frac{R_{60}}{R_{15}}.$$

Цей вираз можна подати через складові струму, що проходить через ізоляцію:

$$R_{60} = \frac{U}{i_{\text{н}} + i_{\text{абс}}(60)};$$

$$R_{15} = \frac{U}{i_{\text{н}} + i_{\text{абс}}(15)};$$

$$K_{\text{абс}} = \frac{i_{\text{н}} + i_{\text{абс}}(15)}{i_{\text{н}} + i_{\text{абс}}(60)};$$

де $i_{\text{абс}}(15)$ і $i_{\text{абс}}(60)$ – значення струму абсорбції відповідно через 15 і 60 с після прикладення напруги.

Чим більше зволожена ізоляція, тим більший її наскрізний струм $i_{\text{н}}$: $i_{\text{н}} \gg i_{\text{абс}}$, – а коефіцієнт $K_{\text{абс}} \rightarrow 1$.

У незволоженої ізоляції наскрізний струм малий, а струм абсорбції змінюється протягом тривалого періоду (десятків і сотень секунд). У цьому випадку $K_{абс} > 1$ (рис.3.9).

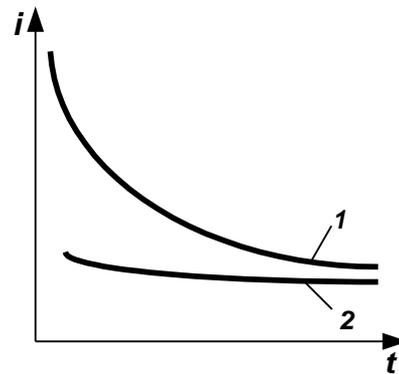


Рис. 3.9. Залежність струму від часу:

1 – у незволоженої ізоляції; 2 – у зволоженої

Ізоляція електричних машин і трансформаторів вважається незволоженою (не потребує сушіння), якщо за 20 °С

$$K_{абс} \geq 1,3.$$

Коефіцієнт абсорбції не залежить від геометричних розмірів ізоляції й меншою мірою, ніж опір ізоляції, залежить від температури. Проте він залежить від поверхневого забруднення ізоляції, за якого зростає $i_{н}$, а $K_{абс} \rightarrow 1$.

Для вимірювання опору ізоляції та визначення коефіцієнта абсорбції застосовують електронні мегомметри (наприклад виробництва ПАТ «Уманський завод «МЕГОММЕТР» типу ЭС0202/2-Г з аналоговим відліком, ЦС0202-1, ЦС0202-2 з цифровим відліком) чи мегомметри із ручним приводом (наприклад типу МС-05). Вимірювання проводять на відключеному та, як правило, від'єднаному від зовнішньої мережі устаткуванні.

Електронні мегомметри живляться від мережі змінного струму 220 В, 50 Гц; або від внутрішнього джерела живлення, мають блок стабілізованої випрямленої напруги 2500 В для забезпечення протікання струму через ізоляцію об'єкта контролю (устаткування), високочутливий вольтметр (аналоговий чи цифровий) і еталонний опір (рис. 3.10). Для підключення до об'єкта контролю мегомметр має клеми з написами ЛІНІЯ, ЗЕМЛЯ та

ЕКРАН. Клеми ЛІНІЯ приєднують до струмопровідної частини устаткування (шини, жили, високовольтної обмотки електричної машини чи трансформатора тощо), а клему ЗЕМЛІЯ – до заземленої частини (металевої опорної конструкції, броні, корпусу тощо) устаткування, опір ізоляції якого вимірюється. Клеми ЕКРАН використовують у випадках підключень мегометра за схемами вимірювань, де необхідно усунути вплив поверхневих опорів на результат виміру опору ізоляції.

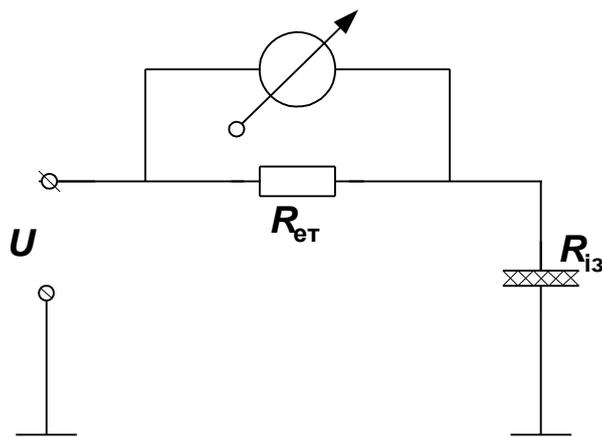


Рис. 3.10. Вимірювання напруги на еталонному опорі електронного мегометра

Струм, що проходить через ізоляцію об'єкта $R_{із}$ й еталонний опір $R_{ет}$ мегометра, залежить від опору $R_{із}$, тому спад напруги на еталонному опорі також визначається опором ізоляції.

Вольтметр, що вимірює спад напруги на еталонному опорі, має шкалу, проградуйовану безпосередньо в мегомах. Два реле часу сигналізують про моменти відліку через 15 і 60 с після подання напруги.

Мегометр типу МС-05 відноситься до приладів аналогічного призначення з тією особливістю конструктивного виконання, коли напруга 2500 В, необхідна для вимірювань опору ізоляції, виробляється генератором постійного струму, що приводиться в дію шляхом обертання рукоятки приводу. Такі мегометри не потребують наявності мережі живлення на місці проведення вимірювань, що є певною перевагою відносно їх електронних аналогів.

3.4.3. Абсорбційний метод контролю стану ізоляції

Для багатьох видів електроустаткування (трансформаторів, реакторів, трансформаторів струму і вводів з паперово-масляною ізоляцією) важлива умова надійної роботи – низький вологовміст твердої ізоляції (електрокартону й електроізоляційного паперу). Під час експлуатації безпосередньо визначити вологовміст неможливо, тому його контролюють непрямыми методами: вимірюванням опору ізоляції, ємнісних характеристик, кута діелектричних втрат.

Ці методи мають істотні недоліки: вони не дають можливості виявити зволоження в початковій стадії (якщо вологість ізоляції менша ніж 3 %) та зволоження, що захопило лише частину об'єму ізоляції. Крім того, вони дуже залежать від характеристик трансформаторного масла.

Нові можливості контролю ізоляції відкриваються в разі вимірювання значення та швидкості зміни струму абсорбції. Цей метод розроблено на кафедрі техніки високих напруг НТУУ «КПІ» професором, д.т.н Ієрусалимовим М.Є.

Зазвичай ізоляція неоднорідна та складається з декількох шарів з різними діелектричними характеристиками.

У разі прикладення до ізоляції постійної напруги в ній відбуваються процеси повільної міграційної поляризації, які полягають у нагромадженні об'ємних зарядів на поверхні розділу шарів. Ці процеси обумовлені перерозподілом електричного поля. У початковий момент прикладення напруги вона розподіляється відповідно до значень ємностей шарів, а в сталому режимі – відповідно до значень їхніх опорів.

Інтенсивність, швидкість і тривалість цих процесів визначаються діелектричними характеристиками шарів: питомими об'ємними опорами та діелектричними проникностями. Зміни цих характеристик, пов'язаних зі зволоженням, зумовлюють зміну інтенсивності та швидкості процесів міграційної поляризації.

Безпосередній прояв міграційної поляризації – струм абсорбції, який для багат шарової ізоляції можна записати у вигляді

$$i_{\text{абс}}(t) = \sum_{i=1}^m \frac{U \cdot e^{-t/\tau_i}}{\sum_{k=1}^n \left(\frac{R_k}{\left(1 - T_k/\tau_i\right)^2} \right)}, \quad (3.4.7)$$

де R_k та $T_k = R_k C_k = \rho_k \varepsilon_k$ – характеристики шарів ізоляції; τ_i – постійні часу процесів міграційної поляризації, які визначаються з рівняння:

$$\sum_{k=1}^n \frac{R_k}{\tau - T_k} = 0. \quad (3.4.8)$$

У рівняннях (3.4.7) і (3.4.8) n – кількість шарів, $m = n - 1$ – кількість границь розділу між шарами.

З рівнянь (3.4.7) та (3.4.8) видно, що початкове значення складових струму абсорбції i_i та їх постійні складові τ_i визначаються параметрами прошарків багат шарової ізоляції. Зміна характеристик R_k та C_k хоч би одного із прошарків суттєво впливає на параметри струму абсорбції.

В трансформаторах при старінні та зволоженні ізоляції питомі об'ємні опори прошарків зменшуються. Це призводить до зменшення постійних часу τ_i складових струму абсорбції та до зростання швидкості його зміни.

Таким чином, швидкість зменшення струму абсорбції може служити характеристикою стану ізоляції.

В свою чергу швидкість зміни струму абсорбції можна охарактеризувати відношенням двох величин струму абсорбції, виміряних у два моменти часу. Це співвідношення, яке запропоноване автором, Ієрусалимовим М.Є., назване коефіцієнтом істинної абсорбції K_i . Показана можливість використання K_i у якості критерію зволоження ізоляції трансформаторів.

Вираз для цього коефіцієнта у загальному вигляді може мати такий вигляд:

$$K_i = \frac{i_{a\bar{o}c}(t_1)}{i_{a\bar{o}c}(t_2)} = \frac{\sum_{i=1}^m i_i \exp\left(-\frac{t_1}{\tau_i}\right)}{\sum_{i=1}^m i_i \exp\left(-\frac{t_2}{\tau_i}\right)}. \quad (3.4.9)$$

Коефіцієнт K_i залежить від характеристик прошарків ізоляції. При збільшенні питомих об'ємних провідностей прошарків, коефіцієнт K_i збільшується. Це видно на прикладі двошарової ізоляції, для якої

$$K_i = \exp\left(\frac{t_2 - t_1}{\tau}\right), \text{ де } \tau = \frac{\varepsilon_1 d_2 + \varepsilon_2 d_1}{\gamma_1 d_2 + \gamma_2 d_1},$$

а $\gamma_1, \gamma_2, d_1, d_2, \varepsilon_1, \varepsilon_2$ – відповідно питомі провідності, діелектричні проникності та товщини прошарків.

Для багат шарової ізоляції у відповідності з (3.4.9) ця закономірність зберігається, але вимірювання струмів абсорбції $i_{abc}(t_1)$ та $i_{abc}(t_2)$ повинно виконуватись в інтервалі часу, в якому найбільш сильно проявляється зміна швидкості спадання струму абсорбції. Особливо важливо вибрати перший момент вимірювання струму абсорбції t_1 так, щоб до цього моменту не встигли затухнути «швидкі» складові струму абсорбції, спричинені зволженими прошарками ізоляції.

Дослідження маслобар'єрної ізоляції трансформаторів в залежності від її стану дають наступні значення: T_k та τ_i змінюється в межах від 30 до 40 секунд (суха) та від 4 до 0,45 секунд (зволожена).

У зв'язку з цим перший момент вимірювання t_1 можна вибрати через 0,1 секунди після початку протікання струму абсорбції. Другий момент часу t_2 може бути рівним 2 секундам, коли струм абсорбції визначається в основному його «повільними» складовими. Таким чином, коефіцієнт істинної абсорбції визначається співвідношенням

$$K_i = \frac{i_{abc}(0,1c)}{i_{abc}(2,0c)}.$$

Цей коефіцієнт відображає прямі зв'язки, які існують між характеристиками ізоляції та електричними процесами в ній (міграційною поляризацією). Основною характеристикою є питома електропровідність, яка сама в найбільшій мірі залежить від стану ізоляції.

Необхідно підкреслити, що коефіцієнт K_i чутливий до зміни питомої електропровідності не у всьому об'ємі ізоляції, а і в її частині. В цьому випадку змінюються постійні часу одної або декількох складових струму абсорбції, що і призводить до зміни значення коефіцієнту.

Коефіцієнт стану ізоляції. Електроізоляційні матеріали характеризуються високими значеннями питомих об'ємних опорів, у зв'язку з чим процеси міграційної поляризації протікають уповільнено. Для ізоляції електричних машин визначальна форма старіння – тепла (пересихання ізоляції), що призводить до зменшення неоднорідності ізоляції та до зменшення величини та швидкості зменшення струму абсорбції.

У даному випадку показник стану ізоляції повинен враховувати як зміни абсолютних значень складових струму абсорбції, так і зміни їх постійної часу.

Таким показником може служити похідна струму абсорбції по часу. В загальному вигляді ця величина визначається наступним чином:

$$|v_i| = \left| \frac{di_{a\bar{c}}}{dt} \right| = \sum_{i=1}^m \frac{i_i}{\tau_i} e^{-t/\tau_i}.$$

Оскільки величина $|v_i|$ пропорційна абсолютним значенням струму абсорбції та залежить від геометричних розмірів випробуваного обладнання та випробної напруги, для виключення впливу вказаних факторів необхідно віднести швидкість $|v_i|$ до геометричної ємності C_2 та випробної напруги U . Показник стану ізоляції K_c в остаточному вигляді представляє собою наступну величину:

$$K_c = \frac{\left| \frac{di_{a\bar{c}}}{dt} \right|}{C_2 \cdot U}, \quad \text{де } \left| \frac{di_{a\bar{c}}}{dt} \right| - \text{швидкість зміни струму абсорбції, виміряна через } 0, \dots, 0,15$$

секунди після початку протікання струму абсорбції; C_2 – геометрична ємність випробного об'єкта; U – випробна напруга.

Оскільки $UC_1 = Q_\Gamma$ – заряд геометричної ємності, то коефіцієнт стану ізоляції можна записати виразом:

$$K_c = \frac{i_1 - i_2}{Q_\Gamma (t_2 - t_1)},$$

де i_1 та i_2 – струм абсорбції, виміряний відповідно в моменти часу t_1 та t_2 .

Як і K_i , K_c визначається характером поляризаційних процесів, які в свою чергу залежать від стану ізоляції. Його величина не залежить від поверхневих струмів витоків по ізоляції, оскільки при визначенні K_c визначається тільки абсорбційна складова струму.

Вимірювання швидкості спаду струму абсорбції може бути використане для контролю сушіння ізоляції силових трансформаторів, трансформаторів струму, вводів під час ремонту та стану ізоляції іншого електроустаткування в процесі його експлуатації.

Принцип вимірювання струму абсорбції показано на схемі рис. 3.13.

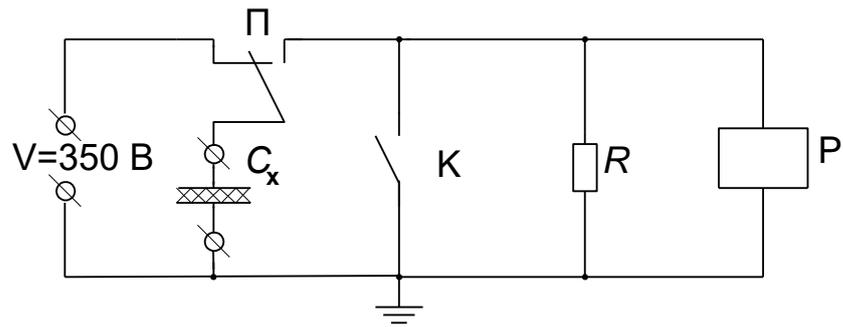


Рис. 3.13. Принцип вимірювання струму абсорбції

Ємність C_x випробуваного об'єкта (його схему заміщення зображено на рис. 3.12) заряджають від джерела постійної напруги. Тривалість зарядження має бути достатньою для завершення процесів міграційної поляризації; її можна взяти рівною 60 с. Після зарядження об'єкта перемикають перемикач П, і він починає розряджатися на резистор R , значення якого значно менше внутрішнього та поверхневого опору ізоляції. Завдяки цьому забруднення та зволоження поверхні ізоляції, наприклад вводів трансформатора чи реактора, не впливає на значення струму абсорбції.

Протягом 5 мс після перемикаччя перемикача П контакти реле К замкнені. За цей час завершується розрядження геометричної ємності об'єкта. Після розмикання контакту К через резистор R проходить струм абсорбції. Спад напруги на резисторі R , пропорційний струму абсорбції, фіксується реєстратором Р, наприклад осцилографом.

Вимірювання струму абсорбції здійснюється за допомогою приладу У-268. Його зовнішній вигляд наведений на рис.3.14.



Рис.3.14. Зовнішній вигляд приладу для вимірювання струмів абсорбції У-268

У ньому в цифровій формі фіксується значення струму абсорбції через 0,06; 0,1; 0,2; 0,4; 1; 2 с в діапазоні 0,1...1000 мкА, а також значення заряду геометричної ємності об'єкта дослідження в межах 0,1...1000 мкКл.

Струм вимірюють у три моменти часу після початку розрядження попередньо зарядженої ємності ізоляції, два з яких – 0,06 і 0,1 с – фіксовані, а третій може набувати одного із зазначених раніше значень.

Вимірювання заряду та трьох значень струму здійснюється автоматично. Тривалість циклу зарядження та вимірювання становить 60 с.

Функціональну схему приладу У-268 зображено на рис. 3.15. Прилад містить зарядний пристрій (ЗП) та комутатор (К), керовані блоком автоматичного керування (БАК), блок ручного керування (БРК), масштабний перетворювач (МП), перетворювач напруги в код (ПНК), блок цифрової індикації (БЦІ) і блок живлення (БЖ).

Після натискання кнопки ПУСК, що знаходиться в БРК, відбувається запуск БАК, який формує команди керування роботою приладу відповідно до встановленого алгоритму. Від джерела постійної напруги 1000 В, що знаходиться в ЗП, заряджають об'єкт C_x , а потім вимірюють заряд його геометричної ємності Q_T та струму абсорбції $i_{абс}$ в різні моменти часу.

За допомогою МП величина Q_T та миттєві значення $i_{абс}$ нормуються до необхідного рівня, переводяться у цифрові коди за допомогою аналогово-цифрового перетворювача ПНК, запам'ятовуються в БЦІ та виводяться на цифрове табло. Установка границь вимірювання Q_T та миттєвих значень $i_{абс}$, а також виведення результатів вимірювання на табло здійснюється за допомогою клавіатури БРК.

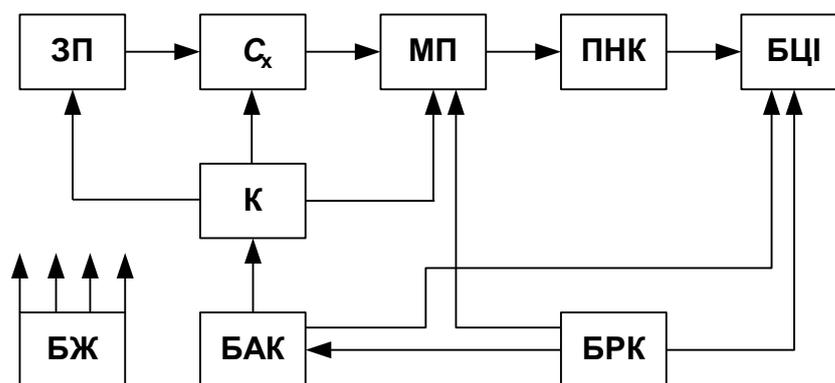


Рис. 3.15. Функціональна схема вимірника струму абсорбції У-268