Лекція 3
ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ

3.1 Загальні відомості

До групи електромеханічних відносяться магнітоелектричні, електромагнітні, електродинамічні, феродинамічні, електростатичні та індукційні прилади. Перші зразки електромеханічних приладів були створені ще в другій половині XIX ст. і до теперішнього часу широко застосовуються для вимірювання різних фізичних величин. Сучасний електромеханічний прилад складається із первинного перетворювача, вимірювального механізму та відлікового пристрою.

Первинний перетворювач служить для перетворення вимірюваної величини в іншу величину, яка безпосередньо діє на вимірювальний механізм, що складається із рухомої та нерухомої частин. Вимірювальний механізм перетворює електричну величину в кут повороту рухомої частини.

Відліковий пристрій приладу складається із шкали та покажчика. Шкалою приладу є пластинка, на яку нанесені позначки, що відповідають певним значенням вимірюваної величини. Покажчик – це стрілка, яка зв'язана з рухомою частиною і може пересуватися уздовж шкали.

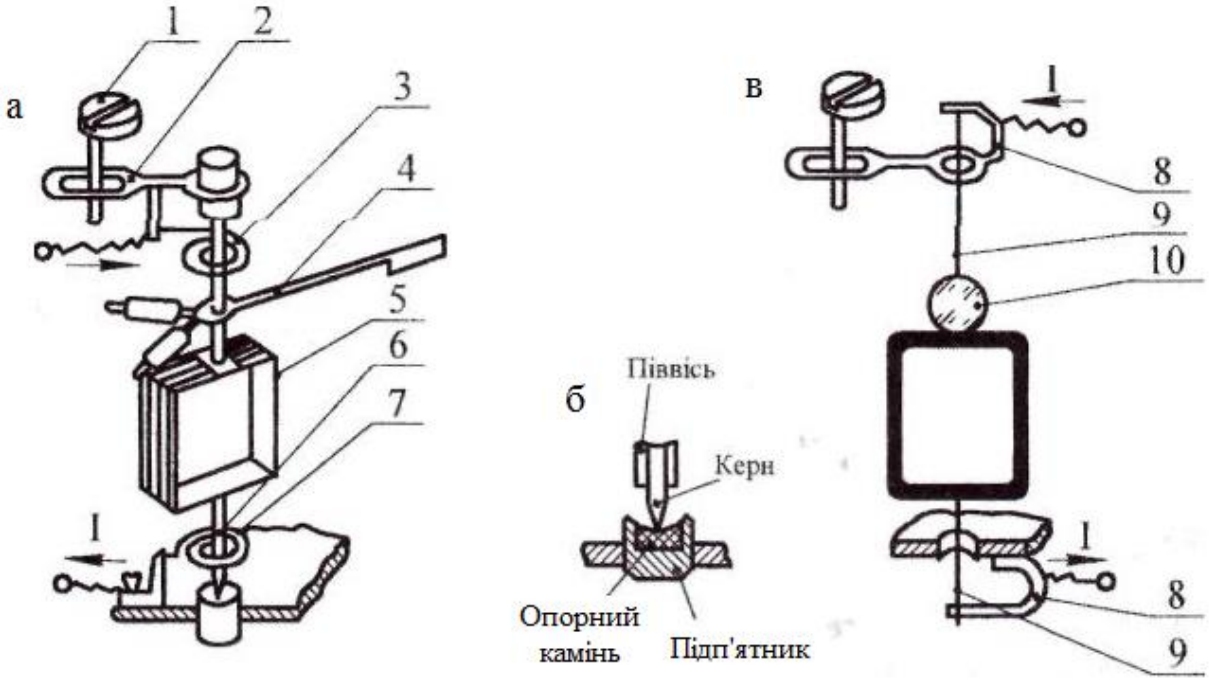

Рисунок 3.1 – Конструкція рухомих частин вимірювальних механізмів:
а – рухома частина на осі; б – опора рухомої частини; в – рухома частина на розтяжках;
1 – гвинт механічного коректора; 2 – поводок; 3 – верхня спіральна пружина;
4 – покажчик (стрілка); 5 – обмотка; 6 – піввісь; 7 – нижня спіральна пружина;
8 –пружина; 9 – розтяжка; 10 – дзеркальце

Рухому частину вимірювального механізму (котушку, феромагнітний сердечник та ін.) розміщують в електромагнітному полі нерухомої частини і закріплюють на осі, розтяжках або підвісі. Матеріалом для пружин, розтяжок, підвісів служать різні бронзові сплави: олов'яно-цинкові, фосфористі, берилієві та ін. В конструкції на осі (рис. 3.1, а) до рухомої частини (наприклад, до котушки 5) прикріплюються дві півосі. Кінці півосей закінчуються кернами і розташовуються в опорах-підп’ятниках (рис. 3.1, б). Для опор застосовують тверді камені (агат, корунд, рубін та ін). Опорні камені діаметром 1....3 мм завальцьовують в латунний гвинт. Вістря керна має радіус закруглення, узгоджений з радіусом кратера каменя, щоб забезпечити найменший момент тертя. Рухома частина може бути підвішена на двох розтяжках 9, які являють собою стрічки з бронзового сплаву, що кріпляться одним кінцем до рухомої частини, а другим – до нерухомих деталей приладу 8 (рис. 3.1, в). В приладах на розтяжках відсутнє тертя в опорах, тому вони більш чутливі. Недоліком їх є наявність залишкової деформації, внаслідок якої спостерігається неповернення покажчика на нульову позначку. Підвісом є тонка бронзова стрічка, на якій вертикально підвішується дзеркальце і рухома частина. Підвіс застосовується в найбільш чутливих приладах – магнітоелектричних гальванометрах.

При змінюванні вимірюваної величини рухома частина переходить в нове положення рівноваги не миттєво, а, як правило, після коливань навколо нового положення рівноваги. Для зменшення часу заспокоєння рухомої частини застосовують заспокоювачі: повітряні, магнітоіндукційні або рідинні.

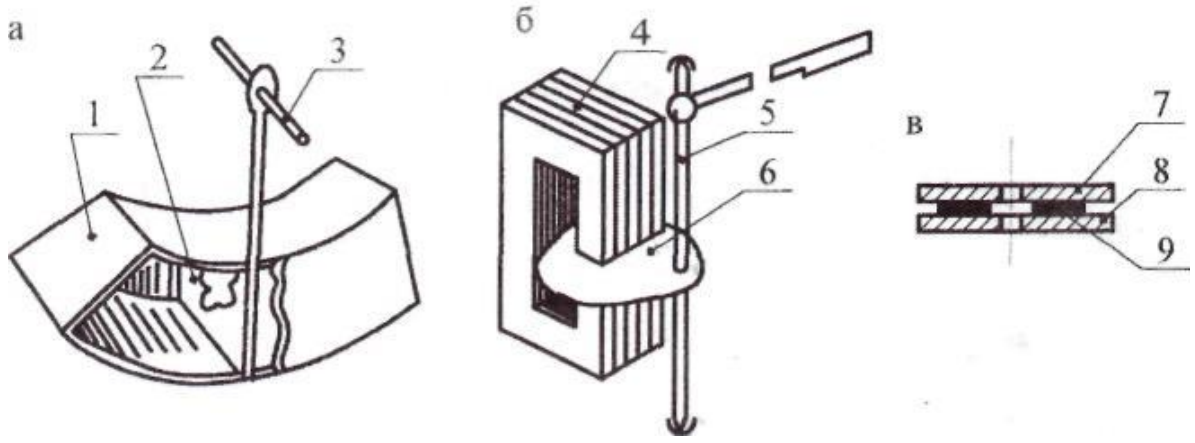

Рисунок 3.2 – Конструкція заспокоювачів:
1 – камера; 2 – крило; 3 – вісь; 4 – постійний магніт; 5 – вісь;
6 – сектор; 7,8 – диски; 9 – кремнійорганічна рідина

Повітряний заспокоювач (рис. 3.2, а) являє собою камеру 1, в якій може пересуватися легке крило 2, закріплене на осі 3 рухомої частини механізму. Під час руху в закритій камері крило переборює зустрічний потік повітря і по обидва боки крила створюється різниця тиску повітря, що приводить до гальмування крила. Магнітоіндукційний заспокоювач (рис. 3.2, б) – це постійний магніт 4, в зазорі якого може переміщуватися алюмінієвий сектор 6, закріплений

на осі 5 рухомої частини. При коливаннях рухомої частини в секторі індукується струм. Магнітне поле постійного магніту діє на цей струм, внаслідок чого створюється гальмівний заспокоюючий момент. Рідинний заспокоювач (рис. 3.2, в) складається з двох дисків. Диск 7 закріплюється на рухомій частині приладу, а диск 8 – на нерухомій частині. Зазор між дисками складає 0,10...0,15 мм. Між дисками заливається спеціальна невисихаюча кремнійорганічна рідина 9, яка утримується в зазорі поверхневим натягом. Для запобігання витікання рідини із зазору поверхня дисків, якої торкається рідина, полірується.

Для установлення покажчика на потрібну позначку в електромеханічному приладі застосовується пристрій, названий коректором. Коректор має гвинт, закріплений на корпусі приладу, при повороті якого можна закручувати пружини, розтяжки або підвіс і таким чином повертати рухому частину приладу й установлювати покажчик на потрібну позначку.

Деякі прилади мають аретир – пристрій, який гальмує або фіксує в певному положенні рухому частину приладу.

Рухома частина вимірювального механізму повертається під дією обертального моменту, який створюється механічними силами взаємодії магнітних або електричних полів рухомої та нерухомої частин механізму. Обертальний момент $M_{об}$ подається рівнянням Лагранжа другого роду

$$M_{об} = \frac{dW_{EM}}{d\alpha}, \tag{3.1}$$

де W_{EM} – електромагнітна енергія, що надходить до вимірювального механізму; α – кут повороту рухомої частини механізму.

Під дією обертального моменту рухома частина повертається доти, доки момент $M_{об}$ не буде зрівноважений протидіючим моментом $M_{пр}$, що створюється пружними елементами, – пружинами 3, 7, розтяжками 9, підвісом (див. рис. 3.1) – і за напрямом є протилежним обертальному моменту. Він не залежить від вимірюваної величини, а є пропорційним куту закручування пружного елемента

$$M_{пр} = W\alpha, \tag{3.2}$$

де W – питомий протидіючий момент, який залежить від властивостей пружного елементу.

З умови $M_{об} = M_{пр}$ можна отримати статичну функцію перетворення

$$\alpha = \frac{1}{W} M_{об}. \tag{3.3}$$

Під час руху рухомої частини механізму на неї діє момент, створений заспокоювачем

$$M_P = P\frac{d\alpha}{dt}, \tag{3.4}$$

де P – коефіцієнт заспокоєння, який залежить від типу і конструкції заспокоювача.

На рухому частину механізму діє також момент тертя, що виникає в опорах.

Він залежить від якості матеріалів і обробки поверхні кернів і підп'ятника, забруднення цих поверхонь, маси рухомої частини, вологості та ряду інших випадкових факторів. Наявність тертя, з одного боку, сприяє більш швидкому заспокоєнню рухомої частини, а з іншого боку, вносить похибку в результат вимірювання.

3.2 Магнітоелектричні прилади

Магнітоелектричний прилад складається з вимірювального механізму, вимірювального перетворювача та відлікового пристрою. Ці прилади застосовуються для вимірювання напруг постійних струмів та сил постійних струмів, опору, кількості електрики, а також як самописці та осцилографічні гальванометри.

3.2.1 Вимірювальний механізм

Функціонування магнітоелектричного вимірювального механізму базується на дії магнітного поля постійного магніту на струм в рухомій котушці (рамці). Магнітоелектричні вимірювальні механізми бувають з рухомою котушкою і нерухомим постійним магнітом та нерухомою котушкою і рухомим постійним магнітом. Останні відзначаються високою чутливістю, але піддаються сильному впливу зовнішніх магнітних полів, і тому практичного застосування не знайшли. Нижче розглядаються лише механізми з рухомою котушкою (рис. 3.3).

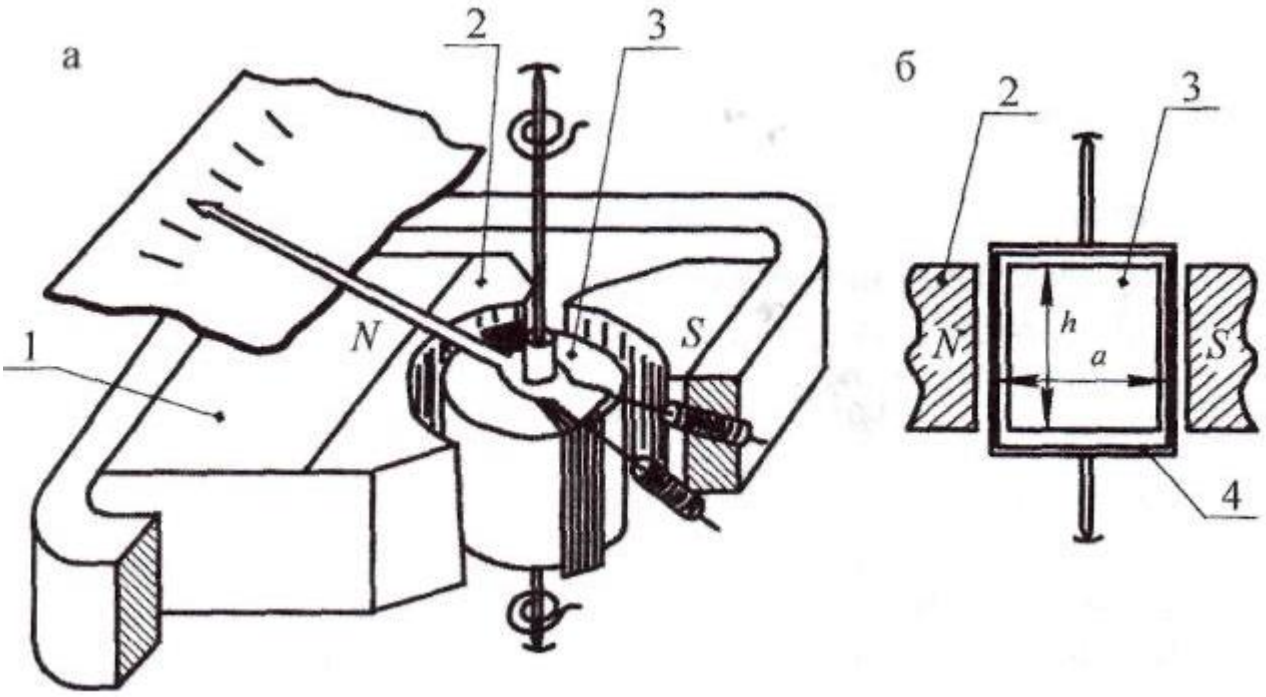

Рисунок 3.3 – Конструкція магнітоелектричного вимірювального механізму:
а – загальний вигляд; б – перетин у площині вісі; 1 – постійний магніт;
2 – полюсні наконечники; 3 – сердечник; 4 – котушка

Нерухому частину механізму створюють постійний магніт 1, полюсні наконечники 2 і сердечник 3. Постійний магніт виконується з магнітотвердих матеріалів, а всі інші елементи магнітної системи – з магнітом'яких матеріалів. В рівномірному зазорі між наконечниками і сердечником розміщується котушка 4 рухомої частини. Котушка виконується з ізольованого мідного дроту і закріплюється на півосях або на розтяжках. Струм до рухомої частини підводиться за допомогою спіральних пружин або розтяжок.

Енергія магнітоелектричної системи є сумою енергії поля магніту $W_{ПМ}$, енергії котушки $I^2L/2$ та енергії взаємодії поля магніту і котушки зі струмом ψI. Тут I – сила струму в котушці, L – індуктивність котушки, ψ – потокозчеплення, яке чисельно дорівнює добутку індукції B магнітного поля, що перетинається обома сторонами котушки при її повороті на кут α, та числа витків n котушки

$$\psi = BS_a n\alpha = \psi_0 \alpha, \tag{3.5}$$

де S_a – активна площа вікна рамки, яка дорівнює добутку площі вікна рамки на косинус кута між напрямками індукції і нормалі до площини рамки; $\psi_0 = BS_a n$ – змінення потокозчеплення при повороті рамки на один радіан.

Таким чином, вся енергія у вузлі, що створює обертальний момент, визначається виразом

$$W_{EM} = W_{ПМ} + I^2L/2 + BS_a nI\alpha. \tag{3.6}$$

На основі (3.1) виконуємо диференціювання (3.6) і одержимо рівняння для обертального моменту

$$M_{об} = \frac{dW_{EM}}{d\alpha} = BS_a nI = \psi_0 I. \tag{3.7}$$

Похідні від перших двох членів (3.6) дорівнюють нулю, бо обидва вони є сталими величинами, які не залежать від кута повороту рухомої частини.

Під дією моментів $M_{об}$ і $M_{пр}$ рухома частина повертається доти, доки ці моменти не стануть однаковими. Тоді з умови $M_{об} = M_{пр}$ або $\psi_0 I = W\alpha$ дістанемо функцію перетворення

$$\alpha = \frac{\psi_0}{W} I = S_I I, \tag{3.8}$$

тобто відхилення рухомої частини механізму пропорційне силі струму в рухомій котушці. Величина

$$S_I = \frac{\psi_0}{W} \tag{3.9}$$

є чутливістю магнітоелектричного механізму до струму.

Чутливість до напруги можна знайти, враховуючи, що $I = U/R_0$, де U – напруга на затискачах котушки; R_0 – опір кола котушки. Тоді

$$\alpha = S_I U / R_0 = S_U U,$$

а величина

$$S_U = S_I / R_0 \tag{3.10}$$

є чутливістю до напруги.

Формула (3.8) свідчить, що при зміні напрямку струму змінюється і знак кута відхилення рухомої частини. Якщо по котушці механізму пропустити синусоїдний струм, то рухома частина має коливатися з частотою струму. Проте це спостерігається лише при частотах, менших 10 Гц. При частотах, більших 10 Гц, завдяки відносно великому моменту інерції рухомої частини покажчик буде знаходиться в околі нульової позначки. Отже магнітоелектричні прилади придатні для вимірювань лише сили та напруги постійного струму.

Крім обертального та протидіючого моментів, під час руху рухомої частини на неї діє ще момент заспокоєння. Роль заспокоювача в магнітоелектричному механізмі виконує котушка рухомої частини. В котушці при її переміщенні в зазорі між полюсними наконечниками та сердечником наводиться змінна ЕРС

$$E_0 = -\frac{d\psi}{dt} = -\psi_0 \frac{d\alpha}{dt},$$

яка викликає змінний струм в колі котушки силою

$$i = -\frac{E_0}{R_0 + R} = -\frac{\psi_0}{R_0 + R} \cdot \frac{d\alpha}{dt},$$

де R_0 і R – опори котушки та зовнішнього кола приладу відповідно.

Поява цього струму створює момент заспокоєння, дія якого спрямована назустріч руху котушки:

$$M_P = \psi_0 i = -\frac{\psi_0^2}{R_0 + R} \cdot \frac{d\alpha}{dt} = P \frac{d\alpha}{dt}, \tag{3.11}$$

де $P = -\dfrac{\psi_0^2}{R_0 + R}$ – коефіцієнт заспокоєння.

Час заспокоєння рухомої частини звичайно не перевищує 2…3 с.

Основними достоїнствами магнітоелектричного вимірювального механізму вважаються висока точність, висока чутливість, дуже мале споживання потужності (порядку мікроват), рівномірна шкала, добра захищеність від зовнішніх магнітних полів.

Недоліком магнітоелектричних механізмів є їх чутливість до перевантаження та придатність лише для вимірювання сили та напруги постійного струму.

3.2.2 Магнітоелектричні амперметри та вольтметри

У найпростішому приладі для вимірювання сили струму, побудованому на магнітоелектричному механізмі, весь вимірюваний струм I_X протікає по котушці.

За такою схемою виконуються мікроамперметри та міліамперметри (з верхньою межею вимірювання до 30 мА). В приладах для великих сил струмів використовуються шунти. Шунт включається паралельно вимірювальному механізму (рис. 3.4, а).

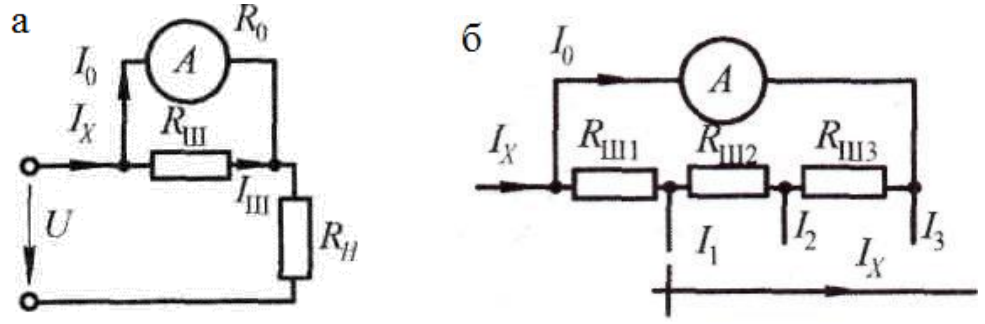

Рисунок 3.4 – Конструкція та схеми включення шунтів:
а – схема включення одномежового шунта;
б – схема включення багатомежового шунта

Опір шунта $R_ш$ мусить бути таким, щоб сила струму I_0 у вимірювальному приладі не перевищувала його номінального значення. Згідно з рис. 3.4, а сила струму у вимірювальному приладі

$$I_0 = \frac{I_X R_ш}{R_ш + R_0},$$

де I_X – значення вимірюваної сили струму, причому $I_X = I_0 + I_ш$, звідки

$$R_ш = \frac{R_0}{I_X / I_0 - 1} = \frac{R_0}{n-1}, \qquad (3.12)$$

де $n = I_X / I_0$ – коефіцієнт шунтування, який показує, у скільки разів розширюється межа вимірювання сили струму

Для розширення межі вимірювання напруги магнітоелектричних вольтметрів застосовують додаткові резистори. Додатковий резистор виконується з манганіну і вмикається послідовно з вольтметром (рис. 3.5). Опір додаткового резистора обирають таким, щоб сила струму I повного відхилення покажчика вольтметра не перевищувала його номінального значення $I_{ном}$

$$I = \frac{U_{\max}}{R_0 + R_д} \le I_{ном},$$

де $U_{\max}$ – максимальне значення вимірюваної напруги; R_0 і $R_д$ – опори вольтметра і додаткового резистора.

Якщо межу вимірювання необхідно розширити в $m = U_{\max} / U_0$ разів (рис. 3.5), то потрібне значення опору додаткового резистора обчислюється за формулою

$$R_д = R_0 (m-1). \qquad (3.13)$$

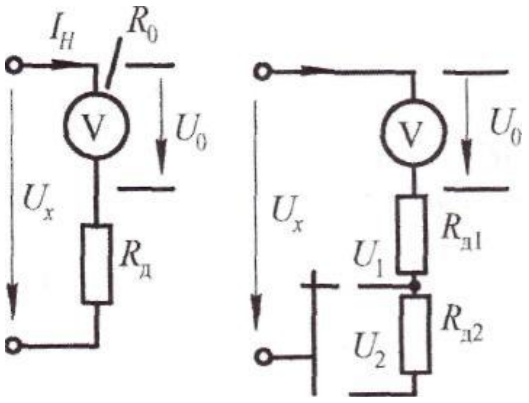

Рисунок 3.5 – Схеми включення додаткових резисторів

Основна похибка приладів обумовлена причинами конструктивного та технологічного характеру (неточністю виготовлення та складання деталей механізму, неточністю градуювання шкали, неповною зрівноваженістю рухомої частини, тертям в опорах, старінням постійного магніту). Додаткові похибки магнітоелектричних приладів можуть спричинятися зміною температури навколишнього середовища та зовнішніми магнітними полями. В більшості випадків впливом зовнішніх магнітних полів можна знехтувати, оскільки власне магнітне поле вимірювального механізму досить велике (0,2...0,3 Тл і більше) порівняно із зовнішніми полями. Крім того, вимірювальний механізм може бути надійно захищений від зовнішніх полів за допомогою феромагнітних екранів.

3.2.3 Гальванометри

Для вимірювання малих сил постійних струмів і напруг (менше 10^{-6} А і 10^{-4} В) використовують магнітоелектричні гальванометри – прилади, що характеризуються високою чутливістю до струму та напруги. Конструктивно вони практично не відрізняються від амперметрів і вольтметрів тієї ж системи. Прийняті лише додаткові заходи для підвищення чутливості, а саме: постійний магніт виготовляють з феромагнітних матеріалів з високою магнітною проникністю; рухому частину установлюють на розтяжках або підвісі з дуже малим питомим протидіючим моментом; застосовують оптичний покажчик, при цьому для збільшення довжини променя покажчика використовують систему дзеркал, розміщених у корпусі приладу (рис. 3.6). Шкала найбільш чутливих гальванометрів розміщується поза корпусом приладу.

Оскільки чутливість гальванометра залежить від відстані між дзеркалом рухомої частини і шкалою, то в довідковій літературі та на циферблаті гальванометра вказують чутливість до струму (напруги) як відхилення покажчика (в міліметрах або поділках шкали), викликане силою струму 1 мкА (напругою 1 мкВ) при умові, що відстань між дзеркалом рухомої частини і шкалою складає 1 м. Наприклад, S_i = 250 мм·м/мкА; S_u = 10 мм·м/мкВ.

Величину, яка є зворотною до чутливості, називають сталою за струмом (за напругою). Кращі конструкції гальванометрів характеризуються такими значеннями сталих: $C_i = 10^{-11}$ А·м/мм; $C_u = 10^{-7}$ В·м/мм.

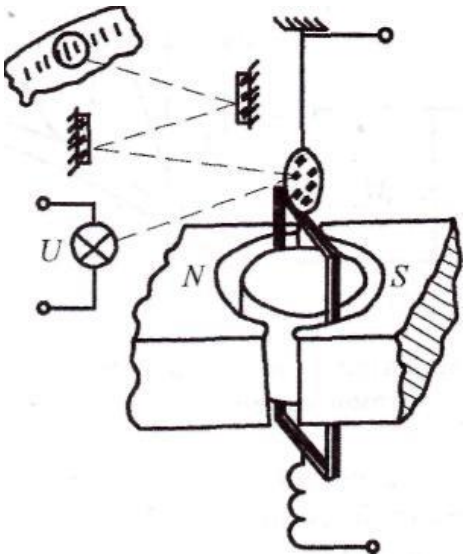

Рисунок 3.6 – Конструкція магнітоелектричного гальванометра

Крім статичних характеристик, дуже важливі динамічні характеристики гальванометрів. Для визначення цих характеристик проаналізуємо диференціальне рівняння, що описує рух рухомої частини вимірювального механізму.

Рухома частина гальванометра є механічною системою з одним ступенем свободи (кутовим переміщенням), тому вона підпорядковується закону динамічної рівноваги силових моментів відносно осі обертання

$$\sum_{i=1}^{n} M_i = 0. \tag{3.14}$$

На рухому частину гальванометра під час руху діють обертальний момент $M_{об} = \psi_0 I$, протидіючий момент $M_{пр} = W\alpha$, момент заспокоєння $M_P = P\dfrac{d\alpha}{dt}$, момент сил інерції $M_И = J\dfrac{d^2\alpha}{dt^2}$.

Рівняння (3.14) набуває вигляду

$$J\frac{d^2\alpha}{dt^2} + P\frac{d\alpha}{dt} + W\alpha = \psi_0 I. \tag{3.15}$$

Припустимо, що в момент часу t = 0 (рис. 3.7, а) обертальний момент змінюється стрибком від 0 до $M_{об.т}$ і потім залишається незмінним. Тоді розв’язок диференційного рівняння (3.15) може бути представлений у вигляді двох частин: часткової та загальної

$$\alpha = \alpha_c + \alpha(t). \tag{3.16}$$

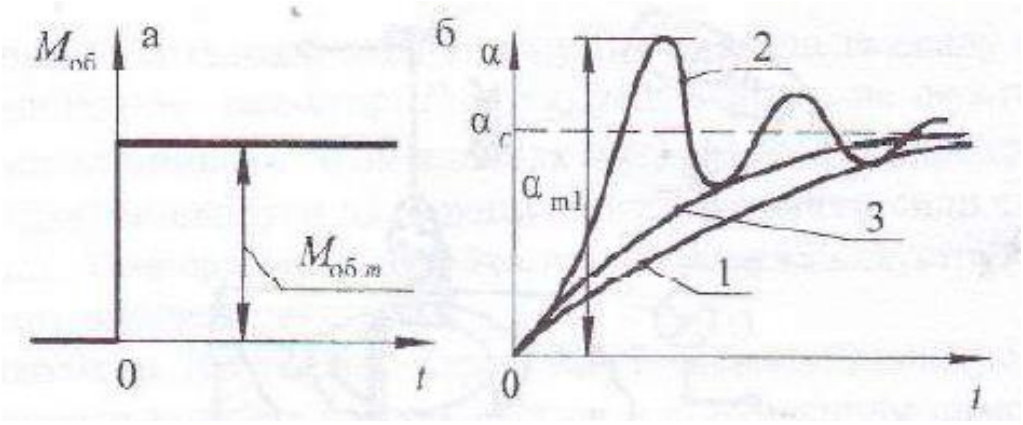

Рисунок 3.7 – Графіки обертального моменту (а) та перехідних характеристик (б) рухомої частини гальванометра

Частковий розв'язок

$$\alpha_c = \frac{1}{W} M_{об.т} \tag{3.17}$$

визначає відхилення рухомої частини механізму в сталому режимі, коли швидкість і прискорення дорівнюють нулю

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{d^2\alpha}{dt^2} = 0.$$

Загальний розв'язок описує складову руху рухомої частини в перехідному режимі при $M_{об} = 0$. В загальному випадку розв'язок має вигляд

$$\alpha(t) = C_1 \alpha^{x_1 t} + C_2 \alpha^{x_2 t}, \tag{3.18}$$

де C_1, C_2 – сталі, що визначаються з початкових умов; x_1, x_2 – корені характеристичного рівняння, причому

$$x_{1,2} = -\frac{P}{2J} \pm \sqrt{\frac{P^2}{4J^2} - \frac{W}{J}} = \omega_0 \left(-\beta \pm \sqrt{\beta^2 - 1} \right) \tag{3.19}$$

Величина

$$\omega_0 = \sqrt{W/J} \tag{3.20}$$

визначає частоту вільних коливань рухомої частини, а величина

$$\beta = P/2\sqrt{JW} \tag{3.21}$$

яку називають ступенем заспокоєння, є узагальненим параметром вимірювального механізму, що зв'язаний з конструктивними параметрами J, P, W.

Не визначаючи сталих C_1 і C_2, а з огляду на рівнянням (3.19), можна оцінити поведінку рухомої частини вимірювального механізму в перехідному режимі. На рис. 3.7, б наведені графіки для трьох варіантів розв'язання рівняння (3.15), вигляд яких залежить від значення ступеня заспокоєння β.

При $\beta > 1$ (корені характеристичного рівняння дійсні і різні) рухома частина механізму під дією обертального моменту, що змінюється стрибком, переходить в нове стале положення аперіодично, тобто прямує до нового положення рівноваги плавно і з одного боку (крива 1 на рис. 3.7, б). При цьому чим більше β, тим повільніше рухома частина переходить в нове положення рівноваги.

При $\beta < 1$ корені x_1 та x_2 характеристичного рівняння стають комплексними і спряженими

$$x_{1,2} = -\beta \pm j\sqrt{1-\beta^2}.$$

Рухома частина займає нове положення α_c після загасаючих коливань відносно цього положення (крива 2 на рис. 3.7, б). Величина $-\beta\omega_0$ визначає загасання амплітуди коливань, а величина $\omega_0\sqrt{1-\beta^2}$ – частоту коливань рухомої частини механізму. Період коливань

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{T_0}{\sqrt{1-\beta^2}}. \qquad (3.22)$$

Час заспокоєння в коливальному режимі також може досягати декількох десятків секунд. Оптимальним є режим, коли час заспокоєння мінімальний. Це має місце при β = 0,7...0,8.

Існує граничний, так званий критичний режим (β = 1, корені характеристичного рівняння дійсні і рівні) між аперіодичним і коливальним режимами. В цьому випадку перехід рухомої частини з одного стану рівноваги в інший здійснюється аперіодично, але за менший час (крива 3 на рис. 3.7, б). При будь-якому зменшенні β рухома частина переходить в коливальний режим.

Як показано раніше, коефіцієнт заспокоєння P (3.11) залежить від опору кола, до якого включений гальванометр

$$P = -\frac{\psi_0^2}{R_0 + R},$$

де R – опір зовнішнього відносно до гальванометра кола.

Можна підібрати таке значення опору R, при якому β = 1, тобто гальванометр працюватиме в критичному режимі. Таке значення опору зовнішнього кола називають критичним. Критичний опір для гальванометра вказується в паспорті приладу або на його шкалі.

3.2.4 Магнітоелектричні логометри

Логометром називається вимірювальний механізм (незалежно від принципу дії), відхилення рухомої частини якого визначається не абсолютним значенням сил струмів в котушках механізму, а відношенням цих сил струмів. Магнітоелектричний логометричний механізм (рис. 3.8, б) має постійний магніт 1, полюсні наконечники 2, між якими розміщують сердечник 3. Форму наконечників та сердечника обирають такою, щоб повітряний зазор між ними

був нерівномірний, а магнітне поле в повітряному зазорі – неоднорідним. У повітряному зазорі розміщують дві жорстко зв'язані між собою котушки 4 і 5, які охоплюють сердечник. Струм до котушок підводиться за допомогою безмоментних стрічок (золотих або срібних). Пружини для створення протидіючого моменту не застосовуються. Електрична схема магнітоелектричного логометра наведена на рис. 3.8, а.

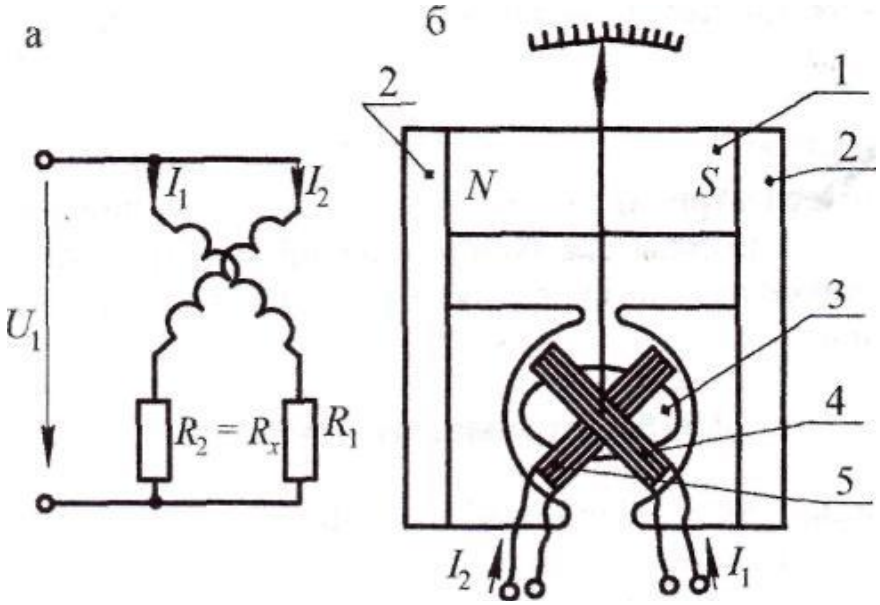

Рисунок 3.8 – Електрична схема та конструкція магнітоелектричного логометра:
а – електрична схема; б – конструкція; 1 – постійний магніт;
2 – полюсні наконечники; 3 – сердечник; 4, 5 – котушки

При протіканні струмів в котушках виникають два моменти, направлені в протилежні боки (один з них вважають обертальним, а другий – протидіючим). Вирази для обертального та протидіючого моментів відповідно до (3.2), (3.5) можуть бути представлені в такому вигляді:

$$M_{об} = B_1(\alpha) n_1 S_1 I_1;$$
$$M_{пр} = B_2(\alpha) n_2 S_2 I_2,'$$

де n_1 і S_1, n_2 і S_2 – кількість витків і активна площа вікна котушок 4 і 5; $B_1(\alpha), B_2(\alpha)$ – функції, які виражають закон зміни магнітної індукції для котушок 4 і 5 при переміщенні їх у повітряному зазорі.

При повороті рухомої частини, наприклад за годинниковою стрілкою, робочі частини котушки 4 потрапляють в зони поля, де індукція зменшується, в той час як робочі частини котушки 5 потрапляють в зони поля, де магнітна індукція зростає. Таким чином, при повороті рухомої частини один із моментів зменшується, а другий збільшується. Врешті, в якомусь положенні ці моменти стають однаковими $M_{об} = M_{пр}$, тобто

$$B_1(\alpha) n_1 S_1 I_1 = B_2(\alpha) n_2 S_2 I_2 .$$

Якщо котушки зробити ідентичними ($n_1S_1 = n_2S_2$), то

$$B_1(\alpha)I_1 = B_2(\alpha)I_2.$$

Розв'язання цього рівняння відносно кута відхилення рухомої частини α дає

$$\alpha = F\left(\frac{I_1}{I_2}\right). \tag{3.23}$$

Магнітоелектричні логометричні механізми широко застосовуються для вимірювання опорів ізоляції електротехнічних пристроїв, а також для вимірювання інших електричних і неелектричних величин.

3.3 Електромагнітні прилади

Принцип дії електромагнітного вимірювального механізму ґрунтується на дії магнітного поля, створеного нерухомою котушкою, в якій протікає вимірюваний струм, на один або декілька феромагнітних сердечників, закріплених на осі або розтяжках. Сьогодні використовуються вимірювальні механізми з плоскою та круглою котушками, а також з магнітопроводом.

Будова вимірювального механізму з плоскою котушкою показана на рис. 3.9. Котушка 1 виконана так, що всередині її створена вузька щілина. Феромагнітний сердечник 2 розташовується всередині щілини і ексцентрично закріплюється на осі. На осі закріплюються стрілка, зрівноважуючі тягарці 3, крило 5 повітряного заспокоювача та один із кінців спіральної пружини 4. При протіканні струму в котушці виникає магнітне поле, яке охоплює витки котушки та намагнічує сердечник. Сердечник втягується в щілину, утворюючи обертальний момент. Для створення протидіючого моменту використовується лише одна спіральна пружина або розтяжки.

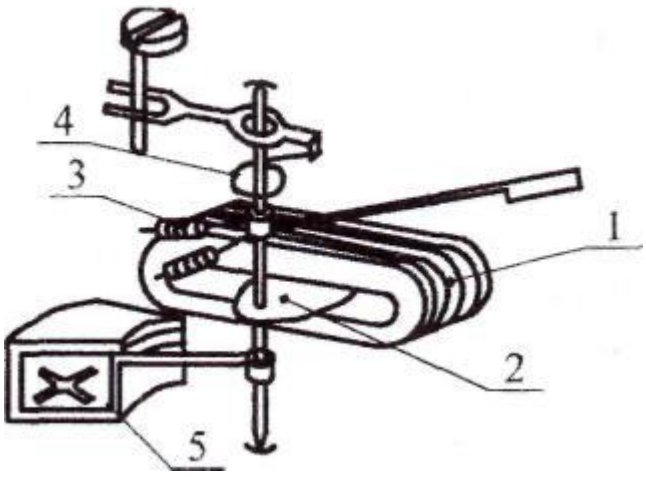

Рисунок 3.9 – Конструкція електромагнітного вимірювального механізму з плоскою котушкою: 1– котушка; 2 – феромагнітний сердечник; 3 – зрівноважуючі тягарці; 4 – спіральна пружина; 5 – крило повітряного заспокоювача

В механізмі з круглою котушкою (рис. 3.10, а) нерухомий сердечник 3 та рухомий 2, що закріплюється на осі, розташовуються всередині котушки 1. Магнітне поле котушки намагнічує однаково обидва сердечника, які відштовхуються один від одного. Разом із сердечником повертається вісь та інші деталі, закріплені на осі.

На рис. 3.10, б наведена будова вимірювального механізму з магніто-проводом. Котушка 4 розташовується на нерухомому магнітопроводі 5 з полюсними наконечниками 6 і 7. Рухомий сердечник 8 закріплюється на розтяжках і може переміщуватись у зазорі між полюсними наконечниками. Магнітне поле, що створюється струмом у котушці, намагнічує сердечник і полюсні наконечники. Сердечник відштовхується від одного наконечника і притягується до іншого, намагаючись зайняти положення рівноваги. Заспокоювач в цих приладах рідинний (рис. 3.2, в).

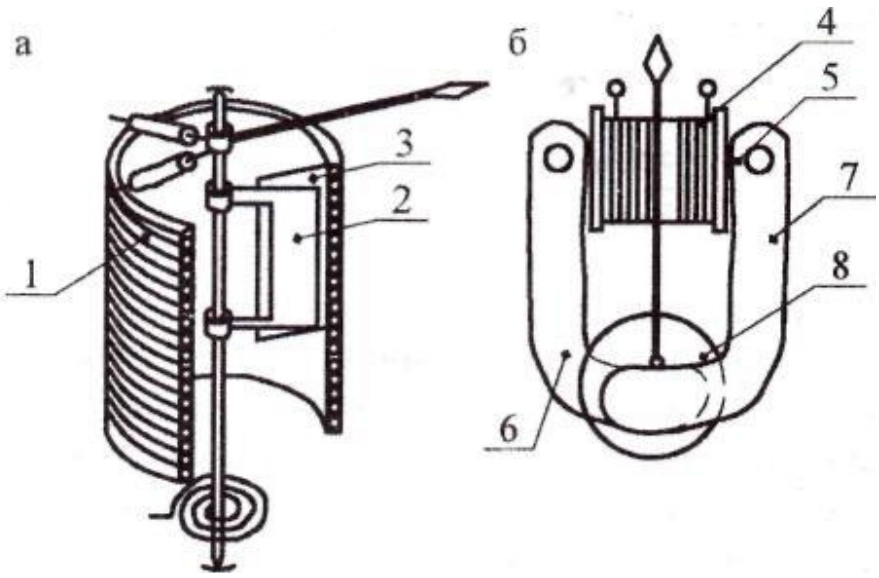

Рисунок 3.10 – Конструкція електромагнітного вимірювального механізму з круглою котушкою та з магнітопроводом: 1 – котушка; 2 – рухомий сердечник; 3 – нерухомий сердечник; 4 – котушка; 5 – нерухомий магнітопровід; 6 – полюсний наконечник; 7 – полюсний наконечник; 8 – рухомий сердечник

3.3.1 Електромагнітні амперметри та вольтметри

Обертальний момент електромагнітного вимірювального приладу може бути визначений із рівняння (3.1) підстановкою в нього значення магнітної енергії котушки зі струмом

$$W_{EM} = \frac{1}{2} i^2 L,$$

де L – індуктивність котушки, яка залежить від положення сердечника відносно котушки. Звідси дістанемо

$$M_{\text{об}\,t} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\alpha}.$$

Якщо вважати, що сила струму змінюється за синусоїдним законом, обертальний момент може бути поданий сумою двох складових

$$M_{\text{об}\,t} = \frac{1}{2} I_m^2 \frac{dL}{d\alpha} \sin^2 \omega t = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{d\alpha} + \frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{d\alpha} \cos 2\omega t, \qquad (3.24)$$

де $I = I_m / \sqrt{2}$ – діюче значення сили струму.

Перша складова – стала величина, а друга змінюється з подвійною частотою. Під дією останньої рухома частина повинна коливатися навколо певної позначки шкали. Але вже при частотах більше 5 Гц кут відхилення рухомої частини буде визначатися лише середнім за період значенням обертального моменту

$$M_{\text{об сер}} = \frac{1}{T} \int_0^T M_{\text{об}\,t}\, dt = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{d\alpha}. \qquad (3.25)$$

Протидіючий момент створюється пружними елементами ($M_{пр} = W\alpha$). З умови статичної рівноваги ($M_{\text{об сер}} = M_{пр}$)

$$\frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{d\alpha} = W\alpha$$

можна отримати функцію перетворення амперметра

$$\alpha = \frac{1}{2W} I^2 \frac{dL}{d\alpha} \qquad (3.26)$$

і вольтметра

$$\alpha = \frac{1}{2WR^2} U^2 \frac{dL}{d\alpha}, \qquad (3.27)$$

де R – опір кола вимірювального механізму.

З виразів (3.26) і (3.27) видно, що шкали електромагнітних приладів є нерівномірними. Вибором форми сердечника вдається наблизити шкалу до рівномірної, починаючи з ділянки 15…20 % від її кінцевого значення.

Основне призначення електромагнітних приладів – вимірювання в колах змінного струму частотою 50…60 Гц і значно рідше вимірювання в розширеній смузі частот 400…1500 Гц.

Межі вимірювань переносних амперметрів прямого вмикання не перевищує 10 А, вольтметрів – 300 В; межі вимірювань щитових приладів – відповідно 5 А і 100 В. Зміна межі вимірювань амперметрів здійснюється переключенням секцій котушки (послідовне або паралельне їх з'єднання), а вольтметрів – переключенням додаткових резисторів.

Основна похибка електромагнітних приладів обумовлена технологічними та конструктивними особливостями вимірювального механізму, а додаткова похибка – відхиленням умов експлуатації від прийнятих за нормальні.

Найбільш помітний внесок у значення додаткових похибок вносять зовнішні магнітні поля. Це пояснюється тим, що власне магнітне поле котушки

електромагнітного механізму невелике та часто є сумірним із зовнішнім полем. Для зменшення впливу зовнішніх полів застосовують екрановані та астатичні вимірювальні механізми. Астатичний вимірювальний механізм має два однакові механізми (рис. 3.11), рухомі частини яких закріплюються на одній осі. Магнітні поля котушок однакові, але протилежні за напрямком. Завдяки цьому зовнішнє магнітне поле підсилює поле однієї котушки і настільки ж послаблює поле другої котушки. Тому обертальні моменти, створені кожним механізмом, одержують однакові, але протилежні за знаком прирости. Сума моментів практично залишається незмінною. Астатичні вимірювальні механізми використовуються в переносних електромагнітних приладах класу точності 0,5.

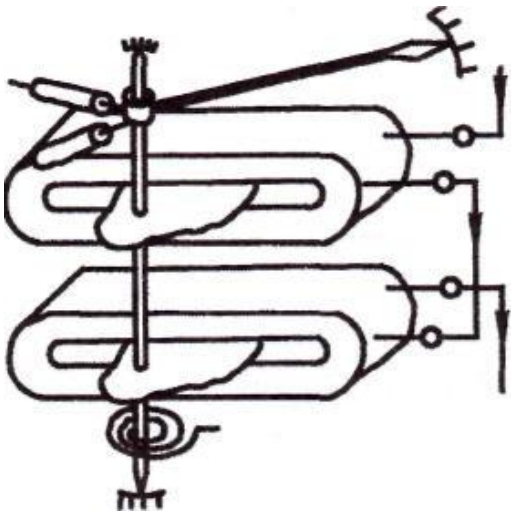

Рисунок 3.11 – Схема астатичного електромагнітного вимірювального механізму

При вимірюванні в колах постійного струму спостерігається похибка від гістерезису. Ця похибка виявляється в тому, що показання приладу різні при зростаючій та спадній силі струму. Вона є тим меншою, чим вужче гістерезисна крива намагнічування матеріалу сердечника. Застосування магнітних сплавів типу пермалой дозволяє створити прилади, похибкою від гістерезису яких можна знехтувати.

Частотна похибка виникає головним чином через змінювання індуктивного опору котушки вимірювального механізму, а також через вихрові струми, що виникають у сердечнику та інших металевих деталях при вимірюванні сил струмів і напруг. Частотною похибкою амперметрів можна знехтувати, а частотна похибка вольтметрів може бути значною мірою скомпенсована вмиканням конденсатора паралельно додатковому резистору.

Електромагнітні прилади найпростіші за конструкцією, дешевші за інші, надійні в роботі, дозволяють вимірювати постійні та змінні струми і напруги, здатні витримувати значні перевантаження. Недоліком цих приладів вважають відносно низьку точність (найвищий клас точності приладів 0,5) і порівняно невисоку чутливість.

3.4 Електродинамічні прилади

Робота електродинамічного вимірювального механізму заснована на взаємодії рухомої та нерухомої котушок зі струмами. Нерухома котушка виконується у вигляді двох однакових секцій (рис. 3.12), розділених повітряним зазором, щоб між ними можна було створити однорідне магнітне поле та розташувати рухому котушку. Конструкція рухомої частини цілком аналогічна конструкції рухомої частини магнітоелектричного вимірювального механізму (див. рис. 3.1). На осі рухомої частини крім котушки закріплюється покажчик, зрівноважуючи тягарці та крило повітряного заспокоювача. Для створення протидіючого моменту використовуються спіральні пружини або розтяжки. Механізм на розтяжках більш чутливий. Так сила струму повного відхилення покажчика найменшої межі вимірювання міліамперметра на опорах складає 25…30 мА, а на розтяжках – 1,0…3,5 мА. Спіральні пружини та розтяжки використовують також і для підведення струму до рухомої котушки.

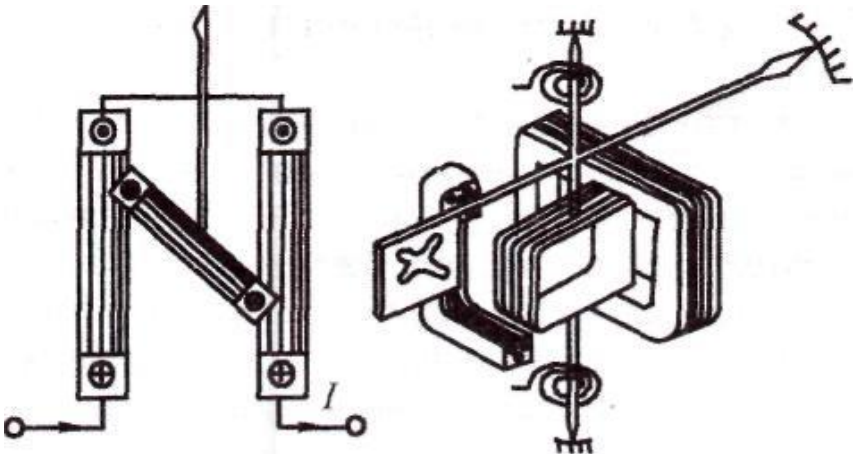

Рисунок 3.12 – Конструкція електродинамічного вимірювального механізму

Власне магнітне поле електродинамічного механізму мале, тому вживають заходів для захисту його від впливу зовнішніх магнітних полів (наприклад, за допомогою феромагнітного екрану).

При протіканні струму в котушках виникає обертальний момент, під дією якого рухома частина прагне повернутися так, щоб магнітні поля рухомої та нерухомої котушок збігались за напрямком. Якщо в (3.1) підставити значення енергії магнітного поля двох котушок,

$$W_{EM} = \frac{1}{2} i_1^2 L_1 + \frac{1}{2} i_2^2 L_2 + i_1 i_2 M,$$

де L_1 і i_1, L_2 і i_2 – індуктивність та сила струму нерухомої та рухомої котушок відповідно; M – взаємна індуктивність котушок, то можна визначити миттєве значення обертального моменту

$$M_{\text{об}t} = \frac{1}{2} i_1^2 \frac{dL_1}{d\alpha} + \frac{1}{2} i_2^2 \frac{dL_2}{d\alpha} + i_1 i_2 \frac{dM}{d\alpha}.$$

Індуктивності L_1 і L_2 не залежать від кута повороту α рухомої частини, тому похідні $\frac{dL_1}{d\alpha}$ і $\frac{dL_2}{d\alpha}$ дорівнюють нулю, а обертальний момент визначатиметься виразом

$$M_{\text{об}\,t} = i_1 i_2 \frac{dM}{d\alpha}. \tag{3.28}$$

Припустимо, що сила струму в котушках змінюється за синусоїдним законом

$$i_1 = I_{m1}\sin(\omega t + \psi_1),$$
$$i_2 = I_{m2}\sin(\omega t + \psi_2).$$

Тоді миттєве значення обертального моменту

$$M_{\text{об}\,t} = I_{m1} I_{m2} \frac{dM}{d\alpha}\sin(\omega t + \psi_1)\sin(\omega t + \psi_2) =$$
$$= I_1 I_2 \frac{dM}{d\alpha}\cos(\psi_1 - \psi_2) - I_1 I_2 \frac{dM}{d\alpha}\cos(2\omega t + \psi_1 + \psi_2),$$

де I_1, I_2 – діючі значення сил струмів.

Середнє значення обертального моменту, під дією якого повертається рухома частина, визначається виразом

$$M_{\text{об ср}} = \frac{1}{T}\int_0^T M_{\text{об}\,t}\,dt = I_1 I_2 \frac{dM}{d\alpha}\cos(\psi_1 - \psi_2). \tag{3.29}$$

З умови статичної рівноваги, коли середнє значення обертального і протидіючого моментів зрівноважують один одного, маємо

$$I_1 I_2 \frac{dM}{d\alpha}\cos(\psi_1 - \psi_2) = W\alpha.$$

Звідси отримаємо функцію перетворення електродинамічного приладу

$$\alpha = \frac{1}{W} I_1 I_2 \frac{dM}{d\alpha}\cos(\psi_1 - \psi_2). \tag{3.30}$$

3.4.1 Електродинамічні амперметри та вольтметри

В амперметрах з межею вимірювання сили струму до 0,5 А, а також у вольтметрах нерухома і рухома котушки вимірювального механізму з’єднуються послідовно (у вольтметрах для обмеження сили струму послідовно з вимірювальним механізмом включають додатковий резистор). В котушках протікає однаковий струм $I_1 = I_2 = I$, $\cos(\psi_1 - \psi_2) = 1$ і функція перетворення набуває вигляду

$$\alpha = \frac{1}{W} I^2 \frac{dM}{d\alpha}. \tag{3.31}$$

При послідовному вмиканні котушок температурна та частотна (до 2 кГц) похибки електродинамічних амперметрів та вольтметрів незначні та спричиняються тільки змінюванням пружних властивостей пружин.

В амперметрах, де вимірювана сила струму перевищує 0,5 А, нерухома і рухома котушки вмикаються паралельно, причому більша частина струму пропускається через нерухому котушку та менша частина – через рухому (і відповідно через спіральні пружини та рамку). При паралельному з'єднанні котушок виникає потреба в компенсації температурної та частотної похибок, які виникають внаслідок перерозподілу струмів в котушках при зміні температури та частоти. Компенсація температурної похибки досягається підбором значень опору додаткових резисторів, які виконуються з манганіну та міді і включаються в кожну з паралельних гілок з таким розрахунком, щоб температурні коефіцієнти опору цих гілок були однаковими. Для зменшення частотної похибки вольтметрів частину додаткового резистора шунтують конденсатором.

Електродинамічні прилади придатні для вимірювань сили постійного та змінного струмів і напруги постійного та змінного струмів, відрізняються високою чутливістю і точністю. Основна галузь застосування електродинамічних приладів – точні вимірювання в колах змінного струму, частіше всього в діапазоні частот 45…55 Гц. Їх застосовують також як робочі еталони при повірці та градуюванні інших приладів.

3.4.2 Електродинамічні логометри

Електродинамічний логометр, на відміну від амперметра тієї ж системи, має не одну, а дві рухомі котушки, жорстко зв'язані між собою та зсунуті одна від одної на кут γ (рис. 3.13, а). Нерухома котушка розділена на дві секції з метою створення між ними досить однорідного магнітного поля. Струм до рухомих котушок підводиться за допомогою безмоментних струмопідводів, виконаних у вигляді тонких непружних металевих стрічок.

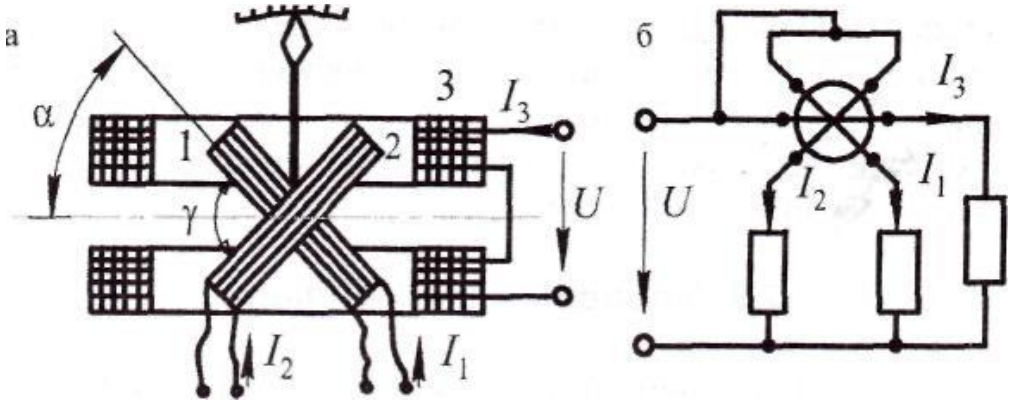

Рисунок 3.13 – Конструкція електродинамічного логометра: а – взаємне розташування обмоток; б – схема включення обмоток

При протіканні струмів I_X та I_2 в рухомих котушках і струму I_3 в нерухомій котушці виникають два моменти, протилежні за напрямком

$$M_1 = I_1 I_3 M_{13m} \cos\alpha \cos(\psi_1 - \psi_3),$$
$$M_2 = I_2 I_3 M_{23m} \cos(\gamma - \alpha) \cos(\psi_2 - \psi_3), \quad (3.32)$$

де $\psi_1 - \psi_3$ – зсув фаз між струмами I_1 та I_3;

$\psi_2 - \psi_3$ – зсув фаз між струмами I_2 та I_3;

M_{13m} та M_{23m} – максимальні значення взаємної індуктивності між першою та третьою і між другою та третьою котушками;

γ – кут між площинами рухомих котушок.

Під дією цих моментів рухома котушка обертається доти, доки не буде досягнута рівність моментів. Тоді

$$I_1 I_3 M_{13m} \cos\alpha \cos(\psi_1 - \psi_3) = I_2 I_3 M_{23m} \cos(\gamma - \alpha) \cos(\psi_2 - \psi_3). \quad (3.33)$$

Якщо рухомі котушки ідентичні, то $M_{13m} = M_{23m}$ і рівняння приводиться до виду

$$\frac{\cos(\gamma - \alpha)}{\cos\alpha} = \frac{I_1 \cos(\psi_1 - \psi_3)}{I_2 \cos(\psi_2 - \psi_3)}. \quad (3.34)$$

Розв'язання цього рівняння відносно кута повороту α дає

$$\alpha = F\left(\frac{I_1 \cos(\psi_1 - \psi_3)}{I_2 \cos(\psi_2 - \psi_3)}\right). \quad (3.35)$$

Отже, кут повороту рухомої частини електродинамічного логометричного механізму визначається відношенням проекції векторів сили струму в рухомих котушках на вектор сили струму в нерухомій котушці. Електродинамічні логометри використовуються для вимірювань зсувів фаз і частоти.

3.5 Феродинамічні прилади

Феродинамічний вимірювальний механізм відрізняється від електродинамічного наявністю магнітопровода 1 з циліндричною виточкою, всередині якої розташовується сердечник 2 (рис. 3.14). Магнітопровід і сердечник виконуються з ізольованих один від одного листів магнітном'якої сталі або пермалою. Нерухома котушка 3 розміщується на магнітопроводі, а рухома котушка 4 – у повітряному зазорі, який створюється полюсними наконечниками та сердечником. Рухома частина феродинамічного механізму конструктивно не відрізняється від рухомої частини електродинамічного механізму (див. рис. 3.1).

У повітряному зазорі створюється радіальне однорідне поле з магнітною індукцією, пропорційною силі струму в нерухомій котушці. Внаслідок дії цього поля на рухому котушку зі струмом виникає обертальний момент, середнє за період значення якого пропорційне добутку діючих значень сил струмів в котушках I_1 та I_2 і косинусу кута зсуву фаз між ними

$$M_{\text{об сер}} = kI_1 I_2 \cos(\psi_1 - \psi_2).$$

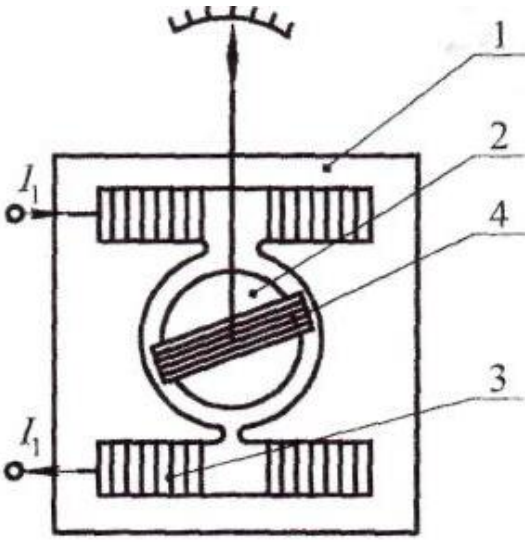

Рисунок 3.14 – Конструкція феродинамічного вимірювального механізму:
1 – магнітопровід; 2 – сердечник; 3 – нерухома котушка; 4 – рухома котушка

Відповідно функція перетворення матиме вигляд

$$\alpha = \frac{1}{W} k I_1 I_2 \cos(\psi_1 - \psi_2). \qquad (3.36)$$

Введення у вимірювальний механізм феромагнітного матеріалу приводить, з одного боку, до значного збільшення обертального моменту, що дозволяє використовувати феродинамічні механізми в самописцях та реєстраторах, а також у приладах, які призначаються для вимірювань в умовах трясіння та вібрацій, а з іншого боку, наявність феромагнітного матеріалу призводить до зниження точності перетворювача та збільшення споживаної потужності при вимірюваннях в колах змінного струму.

Феродинамічні прилади використовуються переважно для вимірювань в колах змінного струму частотою 50 і 400 Гц.

3.6 Електростатичні прилади

Електростатичний вимірювальний механізм конструктивно схожий на конденсатор змінної ємності, схема його будови зображена на рис. 3.15. Нерухому частину 1 складають дві однакові металеві пластини, які з'єднані між собою і мають повітряний зазор. У повітряний зазор входить рухома пластина 2, закріплена на осі 3. Крім того на, осі закріплюється стрілка або дзеркальце, один з кінців спіральної пружини 4 та сектор повітряного заспокоювача (на рис. 3.15 не показаний).

Якщо до нерухомої і рухомої пластин прикласти постійну напругу, то вони будуть заряджені протилежними за знаком зарядами, внаслідок чого рухома пластина буде притягуватися до нерухомої. Обертальний момент визначається виразом

$$M_{об} = \frac{dW_{EM}}{d\alpha} = \frac{d\left(\frac{1}{2}U^2C\right)}{d\alpha} = \frac{1}{2}U^2\frac{dC}{d\alpha}. \qquad (3.37)$$

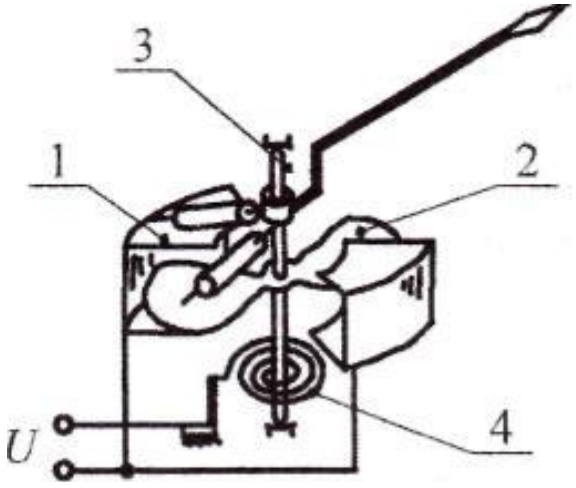

Рисунок 3.15 – Конструкція електростатичного вимірювального механізму:
1 – нерухома частина; 2 – рухома пластина; 3 – вісь; 4 – спіральна пружина

Якщо напруга змінюється за синусоїдним законом $(U = U_m \sin \omega t)$, обертальний момент буде мати постійну та змінну складові

$$M_{об\,t} = \frac{1}{2}U^2\frac{dC}{d\alpha}(1 - \cos 2\omega t),$$

де U – діюче значення напруги;

C – ємність між рухомою та нерухомою пластинами.

При частотах понад 5 Гц кут відхилення рухомої частини під дією напруги змінного струму визначається середнім значенням моменту за період

$$\alpha = \frac{1}{2W}U^2\frac{dC}{d\alpha}. \qquad (3.38)$$

Шкала електростатичного вольтметра нерівномірна, але вибором форми пластин та їх розмірів одержують практично рівномірну шкалу, за винятком початкової її ділянки.

Електростатичний вимірювальний механізм малочутливий, тому на його базі неможливо створити вольтметр з межею вимірювань, меншою за 7,5 В. В той же час на його основі можна побудувати вольтметр для вимірювання напруги до 300 кВ без громіздких вимірювальних трансформаторів. Перевагою електростатичних вольтметрів є мале споживання енергії (на постійному струмі воно дорівнює нулю), малий вплив зміни температури навколишнього середовища, зміни частоти і форми вимірюваної напруги. На показання електростатичних приладів не впливають магнітні поля, а вплив електричних полів усувається застосуванням електростатичних екранів. У найпростішому

випадку екран являє собою шар електропровідної фарби на внутрішніх стінках корпуса приладу. У більш відповідальних випадках екран виконується з латунної фольги.

Розширення меж вимірювань вольтметрів постійного струму досягається за допомогою резистивного дільника напруги (рис. 3.16, а), а вольтметрів змінного струму – за допомогою додаткового конденсатора $C_Д$ (рис. 3.16, б) або ємнісного дільника напруги (рис. 3.16, в).

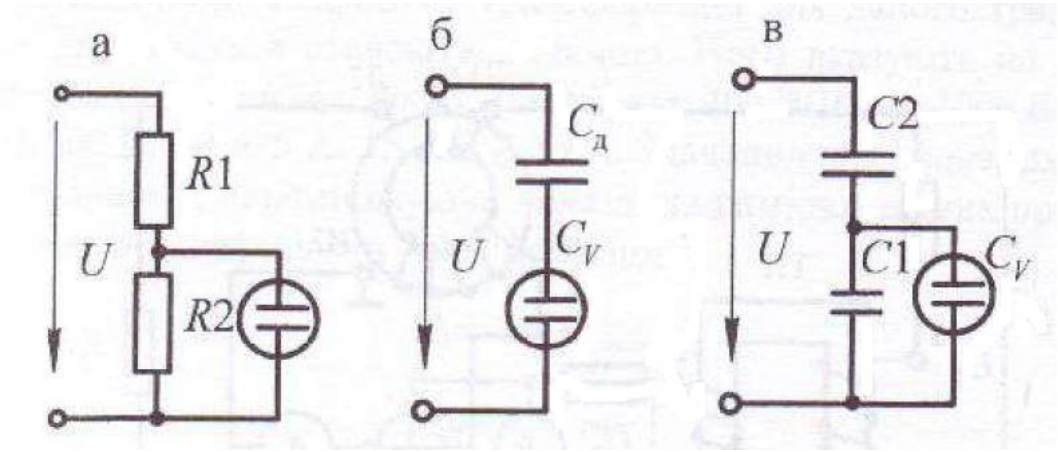

Рисунок 3.16 – Схеми розширення меж вимірювань електростатичних вольтметрів