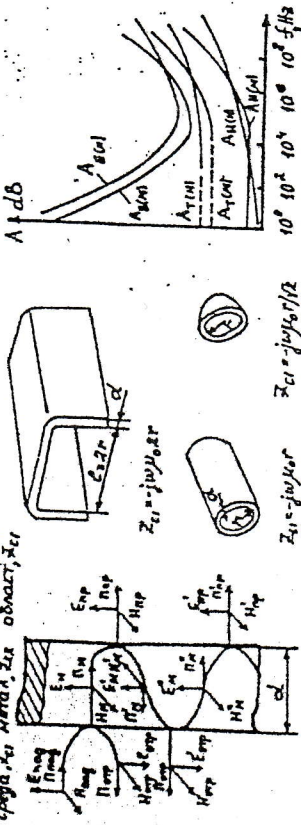


Външна екранираща среда, Z_{c1} метал, Z_{c2} област, Z_{c1} екранираща област, Z_{c2}



Фиг. 4.3

границите външна среда (диелектрик) – метал и метал – екранирана област (диелектрик) A_0 и на многократни вътрешни отражения A_m , т.е. $A = A_0 + A_m$.

Загубите от поглъщане в метала (магнитен или немагнитен) нарастват с увеличаване на неговата магнитна проницаемост μ и проводимост σ , а така също и с честотата f и могат да се изчислят в dB от израза:

$$(4.8) \quad A_{\mu} = 8,68\alpha d = 8,68d\sqrt{\pi f \mu_0 \mu_r \sigma} = 8,68d/\delta_c$$

където α е коефициент на затихване на електромагнитното поле в метална, а δ_c – дълбочина на проникване на полето в метала (дебелина на скин-слоя).

Загубите от отражение на границите на две среди са свързани с различните характеристични съпротивления на диелектрика (въздуха) Z_{c1} и на металния екран Z_{c2} . Като се вземе под внимание, че $Z_{c1} \gg Z_{c2}$ и че за плоска електромагнитна вълна характеристичното съпротивление на въздуха $Z_{c1} = 120\pi \approx 377\Omega$, за загубите от отражение, изразени в dB, може да се запише:

$$(4.9) \quad A_0 \approx 20 \lg \left(\frac{Z_{c1}}{4Z_{c2}} \right) = 20 \lg \left(\frac{94,25}{(\pi f \mu_0 \mu_r / \sigma)^{0,5}} \right) = 20 \lg(94,25\delta_c \sigma)$$

При екраниране на високочестотни електромагнитни полета $A_{\mu} > 10$ dB и затова многократните вътрешни отражения не влияят върху общата ефективност на екранирането, която може да се определи от:

$$(4.10) \quad A = A_{\mu} + A_0, \text{ dB}$$

Тази формула се използва за определяне на ефективността на екраниране във високочестотната област (над 10^4 Hz), където екраните работят в електромагнитен режим.

С намаляване на честотата, когато повърхностният ефект е слабо изразен ($\delta_c > d$), затихването на енергията в метала намалява и екраниращият ефект се определя основно от отраженето на електромагнитната вълна на границите диелектрик – метал и метал – диелектрик. В такъв случай изразът за ефективност на екранирането придобива вида:

$$(4.11) \quad A = 20 \lg[1 + 0,5(Z_{c1}/Z_{c2} + Z_{c2}/Z_{c1})\alpha d], \text{ dB}$$

Характеристичното съпротивление на средата Z_{c1} зависи от формата на екрана, която може да бъде плоска, цилиндрична или сферична (фиг. 4.3б).

На фиг. 4.3б са дадени честотни зависимости на ефективността на екраниране на електромагнитно поле (A_T) с използване на немагнитен $A_T(N)$ и магнитен $A_T(M)$ метали; на електромагнитно поле (A_E) с немагнитен $A_E(N)$ и магнитен $A_E(M)$ метал и на магнитно поле (A_H) с немагнитен $A_H(N)$ и магнитен $A_H(M)$ метал. Анализът показва, че електрическото поле се екранира значително по-добре от магнитното, а полето на плоска електромагнитна вълна – по-добре от магнитното, но по-лошо от електрическото. Ето защо най-трудно е да се обезпечи защита от въздействието на магнитни полета.

При екраниране на електрически полета екраниращият ефект е равен на безкрайност за $f = 0$ и с нарастване на честотата намалява. Същността на електростатичното екраниране се свежда до затваряне на електрическото поле на "маса" чрез металния екран.

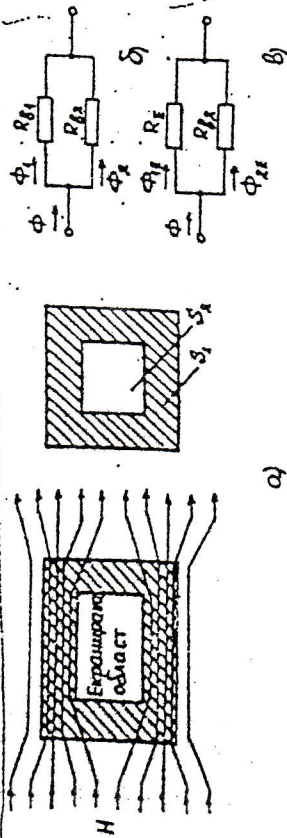
Ако за екраниране на магнитно поле се използва немагнитен екран, той действа в целия честотен диапазон като електромагнитен, т.е. на принципа на поглъщане на енергията, дължащо се на вихровите токове в екрана и на отражение на енергията от екрана. Магнитният екран действа в нискочестотната област (от 0 до 3...10 kHz) като магнитостатичен, т.е. на принципа на шунтиране на магнитното поле в екрана за сметка на повишената му магнитна проводимост. С повишаване на честотата нараства ролята на вихровите токове и екранът преминава в електромагнитен режим на работа.

При сравнение на плоска, цилиндрична и сферична конструкция на екрани по ефективност на екранирането при равни други условия (радиус r , материал и дебелина d на екрана) се получават следните резултати. В областта на високите честоти коефициентите на екраниране на плосък $K_{ЕП}$, цилиндричен $K_{ЕЦ}$ и сферичен $K_{ЕС}$ екрани се намират приблизително в следното съотношение: $K_{ЕС} : K_{ЕЦ} : K_{ЕП} = 3 : 2 : 1$. Следователно за сметка на по-доброто отражение на електромагнитната енергия, плоският екран има по-висока ефективност от цилиндричния (с 6 dB) и сферичния (с 9,5 dB) екрани. В областта на ниските честоти тези съотношения са обратни, т.е. $K_{ЕС} : K_{ЕЦ} : K_{ЕП} = 1 : 2 : 3$.

При конструиране на екрани на РСА трябва да се отчита възможността за възникване на резонансни явления в тях. Всеки електромагнитен екран представлява обменен резонатор, притежаващ няколко резонансни честоти, които се определят от размерите на екрана и компоновката на разположените в него елементи и възли. Ако честотата на смущаващото електромагнитно поле съвпадне с една от собствените резонансни честоти на екрана или е близка до нея, напрегнатостта на полето в екранираната област нараства пропорционално на Q -фактора на екрана и от там ефективността на екранирането рязко спада.

4.3.2. Магнитни екрани

Както беше вече споменато, при екранирането на магнитни полета се използват следните основни методи: 1) магнитостатично екраниране, основано на затваряне (шунтиране) на магнитното поле в магнитния материал на екрана и 2) изтласкване на смущаващото магнитно поле от полето на вихровите токове в екрана.



Фиг. 4.4

За определяне на ефективността на магнитостатичното екраниране ще бъде използван известният израз $A = 20 \lg(N/NE)$, където N и NE са напрегнатости на магнитното поле в екранираната област преди и след въвеждане на екрана и фиг. 4.4, на която е представен магнитостатичен екран (а) и еквивалентна схема на пространството при отсъствие на екран (б) и при наличие на екран (а). Магнитното съпротивление R_m на материална среда с магнитна проникваемост μ_r , дължина на средната магнитна силова линия в нея l и напречно сечение в направлението, перпендикулярно на въздействащия магнитен поток S , може да се определи от известната формула $R_m = l/\mu_0\mu_r S$. Ако тази формула се използва за изразяване на магнитното съпротивление на областта от пространството с напречно сечение S_1 без екран R_{m1} и с екран R_{m2} и магнитното съпротивление R_{m2} на екранирана област, чисто напречно сечение е S_2 и се отчете паралелното включване на тези магнитни съпротивления, за ефективността на екранирането може да се запише:

$$A = 20 \lg[(\mu_r S_1 + S_2)/S_1],$$

където $S = S_1 + S_2$.

Ако екранът е изработен от немагнитен материал, за който $\mu_r = 1$ (мед, месинг, алуминий), той не влияе върху смущаващото поле, тъй като $R_E = R_{m1}$ и ефективността на екранирането е равна на нула. Когато за изработване на екрана се използват феромагнитни материали с големи стойности на μ_r (пермалой, стомана), магнитният поток се затваря основно в стените на екрана, чисто магнитно съпротивление е значително по-малко от това на въздуха. В такъв случай изразът (4.12) може да се опрости и за ефективността на екранирането да се запише:

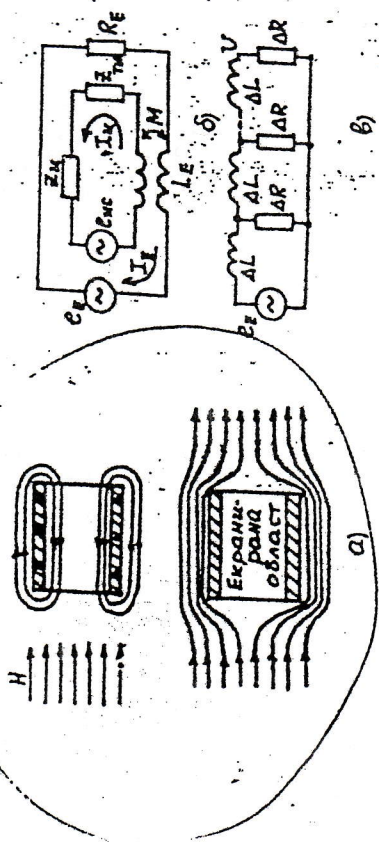
$$A \approx 20 \lg[(\mu_r S_1 + S_2)/S_2] = 20 \lg(1 + \mu_r S_1/S_2)$$

На базата на изложеното могат да се формулират основните изисквания към магнитостатичните екрани:

- 1) магнитната проникваемост на материалите за екрани трябва да бъде възможно най-висока, като за целта са подходящи магнитомекните материали с високи стойности на μ_r , например пермалоят;
- 2) за повишаване на ефективността на екранирането е необходимо да се увеличи дебелината на стените на екрана, като при това се отчетат конструктивните ограничения по отношение на маса и размери;
- 3) всички разрези, шевове и т.н. в екрана трябва да бъдат разположени паралелно на линиите на магнитната индукция B , тъй като ако изброените нееднородности са разположени напречно на линиите на B , това води до увеличаване на магнитното съпротивление на екрана и от там до намаляване на неговата ефективност;
- 4) заемането на екрана не влияе върху ефективността на магнитостатичното екраниране.

Механизмът на втория метод за магнитно екраниране е пояснен на фиг. 4.5а. Цилиндричният метален екран е поместен в магнитно поле, така че неговата ос съвпада с посоката на магнитните силови линии. Съгласно закона за електромагнитната индукция в екрана се индуцира е.д.н., предизвикващо протичането на вихрови токове, които създават вторично магнитно поле. Във вътрешността на екрана това вторично магнитно поле е противоположно, а извън екрана – съпосочно с възбуждащото поле, в резултат на което резултатното поле се оказва отслабено във вътрешността на екрана и усилено – извън него, т.е. извършва се изтласкване на полето извън екрана.

Както е известно вихровите токове в екрана се разпределят неравномерно по неговото сечение, което е свързано с явлението повърхностен или скин-ефект. При увеличаване на честотата на смущаващото магнитно поле, ефективната дебелина на стените на екрана намалява, което е причина за намаляване на магнитната проникваемост на екрана. Ето защо при конструирането на по-високочестотни магнитни екрани често се предпочитат немагнитните материали, тъй като те не само че осигуряват достатъчна ефективност на екранирането, но и внасят в екранираните елементи и възли по-малки загуби от магнитните материали.



Фиг. 4.5

За определяне на ефективността на екраниране на верига, разположена във вътрешността на немагнитен екран в областта на ниските честоти, където дебелината на стените на екрана е много по-малка от ефективната дълбочина на проникване на полето, т.е. $d \ll \delta_c$, екранът се представя във вид на окъсена навивка с индуктивност L_E , активно съпротивление R_E и взаимна индукция с екранираната верига M (фиг. 4.5б). За изчисляване на L_E и R_E може да се използват формулите:

$$(4.14) \quad L_E = \mu_0 S / l; \quad R_E = 2\pi r / (\sigma d l),$$

където r е радиус на екрана; l — дължина на екрана; $S = \pi r^2$ — площ на напречното сечение на екранираната област в направление, перпендикулярно на линиите на магнитната индукция; d — дебелина на стените на екрана.

Анализът показва, че за определяне на ефективността на магнитно екраниране в този случай може да се използва изразът:

$$(4.15) \quad |A| = 20 \lg |1 + jQ_E| = 10 \lg [1 + (0,5\omega\mu_0\sigma r d)^2],$$

където $Q_E = \omega L_E / R_E$ е качественият фактор на екрана при честота ω . При $Q_E \ll 1$ ефективността на екранирането е практически равна на нула, а при $Q_E \gg 1$ тя се определя изцяло от качествения фактор на екрана. Ако Q_E клони към безкрайност, извън екрана се обезпечава пълна компенсация на магнитните полета, създадени от тока на екранираната верига I и тока, протичащ през екрана I_E .

С увеличаване на честотата на смущаващото магнитно поле при δ_c , екранът започва да работи в режим, при който трябва да се счита повърхностният ефект. В този случай екранът може да се представи във вид на няколко последователно включени екрани с дебелина на стените Δd , всеки от които образува окъсена навивка, свързана с външния магнитен поток на съседната навивка. Като резултат от това големината на остатъчния взаимосвързан магнитен поток в екрана намалява от слой в слой, което позволява отделните слоеве на екрана

да се разглеждат като Γ -образни звена на филтър (фиг. 4.5в). От това следва, че за определяне ефективността на екраниране на високочестотно магнитно поле трябва да се отчитат както загубите от поглъщане Ап съгласно (4.8), така и загубите от отражение или компенсация на полето на вихровите токове в екрана $A_0 = 20 \lg |r / (1,414\mu_r\delta_c m)|$, т.е.:

$$(4.16) \quad A = 8,68d/\delta_c + 20 \lg |r / (1,414\mu_r\delta_c m)|,$$

където m отчита формата на екрана и има следните стойности: $m = 1$ — за плосък; $m = 2$ — за цилиндричен и $m = 3$ — за сферичен екран.

При изготвяне на екрана от немагнитен метал ($\mu_r = 1$) екраниращият ефект при високи честоти се определя от проводимостта на екрана и честотата на смущаващото магнитно поле. Ако екранът е изготвен от магнитен материал, смущаващото поле индуктира в него при равни други условия по-голям е.д.н., което се обяснява с по-високата концентрация на магнитния поток. Това води до увеличаване на вихровите токове в екрана, а от там и до увеличаване на загубите от поглъщане в него, което обуславя и по-добрата му ефективност. Въпреки това изпользването на магнитни екрани, например такива от стомана, се предпочитва само в случаи, когато внесените от тях загуби не оказват влияние върху работоспособността на екранираните елементи и възли.

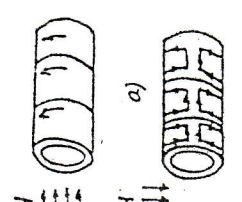
На базата на изложеното могат да се формулират основните изисквания към екраните, действащи на принципа на изгасване на магнитното поле от полето на вихровите токове в екрана:

1) Дебелината на екрана трябва да се избира по-голяма от еквивалентната дълбочина на проникване на полето в него. Поради малката дебелина на скин-слоя на различните метали в областта на високите честоти, при избора на дебелината на екрана определящи могат да се окажат изискванията за устойчивост на механични въздействия, на корозия, технологичност на конструкцията и др.

2) За изготвяне на високочестотни екрани се предпочитат немагнитни метали (мед, алуминий, месинг). Това се обуславя както от малкото съпротивление, което оказват такива екрани на вихровите токове и от там високата им ефективност, така и от по-малките загуби, които те внасят в екранираните възли на РСА в сравнение с тези на магнитните материали.

3) Сглобките, разрезите и шевове в екрана трябва да се разполагат по направление на вихровите токове, които текат в плоскост, перпендикулярна на направление на смущаващото магнитно поле (фиг. 4.6а). При това се обяснява най-малко съпротивление за вихровите токове и от там най-висока ефективност на екранирането. Ако спомнатите нееднородности са паралелни на смущаващото поле, вихровите токове отслабват, тъй като им се налага да ги заобикалят (фиг. 4.6б).

4) Заемването на екран, работещ за сметка на създаването на вихрови токове, не влияе на ефективността на магнитното екраниране.



Фиг. 4.6

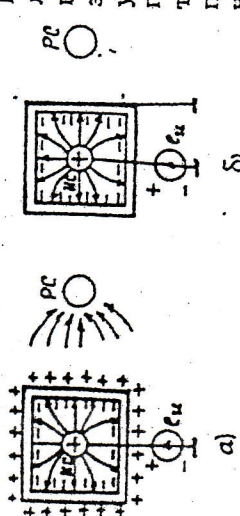
4.3.3. Електростатични екрани

Принципът на електростатичното екраниране се свежда до затваряне на смущаващото електрическо поле чрез метален екран към корпуса на РСА.

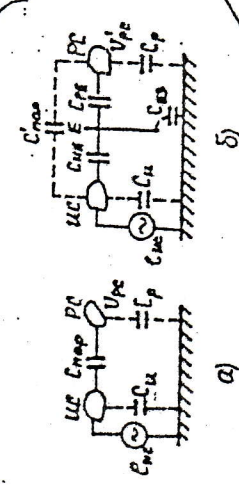
Ако източникът на електростатично или квазиелектростатично поле (ИС) е поместен в метален екран, то в резултат на електрическата индукция върху вътрешната и външната повърхност на екрана се натрупват заряди с противоположни знаци (фиг. 4.7). При това в стационарен режим във всеки момент от време външната повърхност на екрана се явява носител на заряд със същия знак както и източника. Ако екранът не е заземен, рецепторът на смущения (РС) ще бъде подложен на същото въздействие, както и при отсъствието на екрана.

При заземяване на екрана отделният върху външната му повърхност заряд се отвежда към заземения корпус, където се неутрализира от заряда на другия полюс на смущаващия източник. В този случай не се предявяват специални изисквания към дебелината и проводимостта на металния екран.

Основна цел на екранирането на електрическо поле е намаляване на капацитивната връзка $C_{\text{пар}}$ между елементите на конструкцията (фиг. 4.8а). На фиг. 4.8б е представена заместна схема за определянето на нивото на смущенията при разделяне на източника и рецептора с екраниращ метален лист. Приетите на фигурите означения имат следното значение: $C_{\text{пар}}$ и $C'_{\text{пар}}$ — паразитни капацитети между източника и рецептора на смущения преди и след екраниране; $C_{\text{иЕ}}$ и $C_{\text{РЕ}}$ — капацитети на елементите на ИС и РС спрямо металния лист Е; $C_{\text{ЕЗ}}$ — капацитет на металния лист спрямо маса (земя). Смущаващото напрежение, което подава на рецептора преди ($U_{\text{РС}}$) и след ($U'_{\text{РС}}$) екраниране може да се определи от:



Фиг. 4.7



Фиг. 4.8

Вържание: $C_{\text{пар}}$ и $C'_{\text{пар}}$ — паразитни капацитети между източника и рецептора на смущения преди и след екраниране; $C_{\text{иЕ}}$ и $C_{\text{РЕ}}$ — капацитети на елементите на ИС и РС спрямо металния лист Е; $C_{\text{ЕЗ}}$ — капацитет на металния лист спрямо маса (земя). Смущаващото напрежение, което подава на рецептора преди ($U_{\text{РС}}$) и след ($U'_{\text{РС}}$) екраниране може да се определи от:

$$(4.17) \quad U_{\text{РС}} = \epsilon_{\text{иЕ}} C_{\text{ПАР}} / (C_{\text{ПАР}} + C_{\text{Р}})$$

$$(4.18) \quad U'_{\text{РС}} = U_{\text{РС}} C_{\text{РЕ}} / (C_{\text{РЕ}} + C_{\text{Р}}),$$

където $U_{\text{РС}}$ представлява напрежение на смущенията върху екрана, а $U'_{\text{РС}}$ — напрежение на смущенията върху корпуса на РСА.

$$(4.19) \quad U_{\text{ЕЗ}} = \epsilon_{\text{иЕ}} C_{\text{иЕ}} / (C_{\text{иЕ}} + C_{\text{ЕЗ}}).$$

Замествайки израз (4.19) в (4.18) за $U'_{\text{РС}}$ се получава:

$$(4.20) \quad U'_{\text{РС}} = \epsilon_{\text{иЕ}} C_{\text{иЕ}} C_{\text{РЕ}} / (C_{\text{иЕ}} + C_{\text{ЕЗ}}) (C_{\text{РЕ}} + C_{\text{Р}}).$$

Ако $C_{\text{ЕЗ}} \ll \epsilon_{\text{иЕ}} C_{\text{иЕ}}$, напрежението на екрана ще бъде равно на с.д.н. на смущаващия източник и следователно:

$$(4.21) \quad U'_{\text{РС}} \approx \epsilon_{\text{иЕ}} C_{\text{РЕ}} / (C_{\text{РЕ}} + C_{\text{Р}}).$$

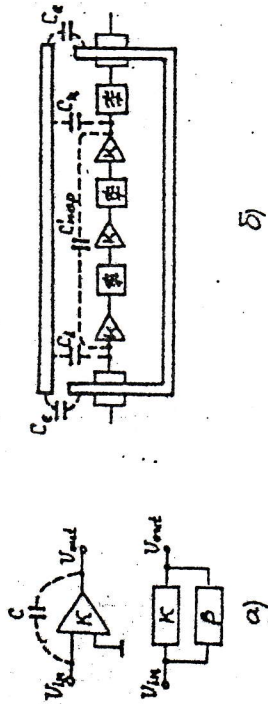
Тъй като капацитетът между екраниращия лист и рецептора на смущения е практически много по-голям от паразитния капацитет между източника и рецептора на смущения при отсъствие на екран, т.е. $C_{\text{РЕ}} \gg C_{\text{ПАР}}$, то следва че смущаващото напрежение на рецептора в разглеждания случай нараства в сравнение с това преди установяване на екрана. Очевидно е, че ефективността на екранирането нараства при увеличаване на капацитета на екрана спрямо маса и става максимална при заземяване на екраниращия лист. Това се обяснява с възможността за отвеждане на индуктираните в екрана заряди на "маса" и затваряне на електрическата верига на източника на смущения. Ако в случая на заземен екран се пренебрегне остатъчният паразитен капацитет $C_{\text{ПАР}}$ между източника и рецептора на смущения, тогава $U_{\text{РС}} = 0$. В действителност $C'_{\text{ПАР}}$, който е много по-малък от паразитния капацитет $C_{\text{ПАР}}$ между елементите преди разполагане на екрана, т.е. $C'_{\text{ПАР}} \ll C_{\text{ПАР}}$, слава появата във входа на рецептора на смущаващо напрежение:

$$(4.22) \quad U'_{\text{РС}} = \epsilon_{\text{иЕ}} C'_{\text{ПАР}} / (C'_{\text{ПАР}} + C_{\text{Р}} + C_{\text{РЕ}}) \approx \epsilon_{\text{иЕ}} C'_{\text{ПАР}} / (C_{\text{Р}} + C_{\text{РЕ}}),$$

където е значително по-малко от $U_{\text{РС}}$ (виж израз 4.17).

В резюме екраниращият ефект на заземения метален лист се свежда до свързване на по-голяма част от паразитните капацитети между елементите на конструкцията към заземения корпус на прибора.

При екраниране на смущаващото електрическо поле в рамките на едно усилвателно устройство, ефективността на екранирането зависи от неговия коэффициент на усилване K и коэфиниента на обратна връзка β , който се определя от нежеланата капацитивна обратна връзка от изхода към входа (фиг. 4.9а). Коэффициентът на усилване $K_{\text{ов}}$, отчитащ наличието на паразитна капацитивна връзка между изхода и входа на усилвателя, може да се определи от известната формула: $K_{\text{ов}} = K / (1 - \beta K)$. Ако $|1 - \beta K| < 1$ обратната връзка е положителна и усилвателят може да се самовъзбуди, а при $|1 - \beta K| > 1$ — тя е отрицателна и коэффициентът на усилване на усилвателя намалява. Произведението βK зависи от честотата, като за едни честоти се наблюдава положителна, а за други — отрицателна обратна връзка.



Фиг. 4.9

При зададена допустима стойност на коефициента на усилване с отчитане на обратната връзка $K_{\text{овд}}$, допустимата стойност на коефициента на обратна връзка $\beta_{\text{доп}}$ може да се определи от:

$$(4.23) \quad \beta_{\text{доп}} = (1 - K/K_{\text{овд}}) / K.$$

За определяне на ефективността на екраниране на електрическото поле на смущенията в едно усилвателно устройство може да се използва формулата:

$$(4.24) \quad A = 20 \lg |\beta / \beta_{\text{доп}}| = 20 \lg |\beta K / (1 - K/K_{\text{овд}})|.$$

Представеният начин за определяне на ефективността на екраниране може да се използва при проектиране на многостъпални усилватели (високочестотни, междинночестотни, видеоусилватели и т.н.), като за целта се вземе предвид, че най-опасна е капацитивната връзка на последното и първото стъпало $C_{\text{пар}1-n}$.

Обикновено в радиоелектрониката за осигуряване на защита от механични и климатични въздействия, апаратите се разполагат в метални корпуси. Влиянието на металния капак върху работата на устройството ще бъде разглеждано за случая на изобразения на фиг. 4.9б n -стъпален междинночестотен усилвател. Както беше вече споменато, най-опасна е капацитивната връзка между последното и първото стъпало на усилвателя. Очевидно е, че въвеждането на метален капак, на присъединен към корпуса на прибора, води до увеличаване на капацитета на обратната връзка за сметка на създаването на допълнителен канал за пренасяне на смущенията, формиран от последователно включените по отношение на капака кондензатори на последното C_n и първото C_1 стъпала. Тъй като $C_n C_1 / (C_n + C_1) > C'_{\text{пар}}$, прехвърленият от изхода към входа сигнал може да доведе до самовъзбуждане или изкривяване на честотната характеристика на усилвателя. При свързване на капака с корпуса ($C_e = \infty$), двата кондензатора C_1 и C_n се включват към масата и екраниращият ефект се обезпечава основно за сметка на значително по-малката стойност на паразитния капацитет $C'_{\text{пар}}$ в сравнение със стойността му $C_{\text{пар}}$ при отсъствие на капака.

Следователно за екраниране на електрическо поле пълни метални елементи на конструкцията трябва да бъдат съединени с общия корпус или земята на РСА. Основно внимание при това трябва да се обърща на конструктивното изпълнение на присъединяването на скрана към корпуса на прибора. В това отношение е нежелателно използването на дълги съединителни проводници между скрана и корпуса, особено във високочестотните обхвати, където тяхното индуктивно съпротивление влошава ефективността на екранирането.

В резюме основните изисквания, които се поставят към електростатичните екрани, могат да се формулират по следния начин:

- 1) Конструкцията на скрана трябва да бъде избрана така, че силните линии на електрическото поле да завършват на повърхността на екрана, без да излизат зад неговите граници.
- 2) В областта на ниските честоти (при $d < \delta_c$) ефективността на електростатичното екраниране се определя практически от качеството на електрическия контакт на екрана с корпуса на прибора и зависи слабо от материала на скрана и неговата дебелина.
- 3) В областта на високите честоти (при $d > \delta_c$) ефективността на екрана, работещ в електромагнитен режим, се определя от неговата дебелина, проводимост и магнитна проникнемост.

4.3.4. Многослойно екраниране

За постигане на висока ефективност на екранирането в широк честотен диапазон, включвайки и областта на ниските честоти, се използват многослойни конструкции на екрани, които се състоят от редуващи се немагнитни (мед, алуминий, месинг) и магнитни (столана, пермалой) слоеве. Беше изяснено, че екраниращото действие на електромагнитния екран се дължи на поглъщане на енергията във вътрешността на метала и на нейното отразяване на границите среда-метал и метал-екранирана област, предизвикано от различните характеристики съпротивления, които оказват диелектричните и металите на разпространяващата се в тях електромагнитна вълна. В многослойните екрани се използва ефектът на многократно отразяване на електромагнитното поле на границите между отделните метални слоеве, които се избират с различни характеристики съпротивления. Вследствие на това екран, състоящ се от няколко тънки слоеве от различни метали, притежава в нискочестотната област по-голямо екраниращо действие в сравнение с еднороден екран със същата дебелина.

Ефективността на екраниране на многослойен екран зависи от използваните материали, тяхното взаимно разположение и дебелина на слоевете. На базата на проведен анализ на този тип екрани, могат да се дадат следните препоръки за тяхното конструктивно проектиране:

- 1) За осигуряване на добро екраниране и минимизиране на внесени в екранираните радиоелектронни възли загуби, вътрешните слоеве на многослойните екрани трябва да се изработват от немагнитни метали. Най-добри резултати се получават при използване на екрани

в) от 10...20 до 1000 кГц. Медният и стоманеният слоеве работят в електромагнитен режим, като с нарастване на честотата оптималната дебелина на медния слой намалява, а на стоманения - расте, което се обяснява с нарастване ролята на поглъщането;

г) над 1000 кГц. Използването на съставен екран с нецелесъобразно, тъй като по-голяма ефективност на екранирането се обезпечава от еднороден стоманен екран. Това се обяснява с преобладаващата роля на поглъщането в стоманата пред затихването вследствие на отражение на границата среда - меден слой на екрана.

Като пример на фиг. 4.10б е дадена зависимост на ефективността на екранирането A на биметален екран от дебелината на медния d_m и стоманения d_s слоеве за честота 55 кГц и радиус на екрана 17,5 mm. От графиката се вижда, че с увеличаване на d_s затихването от погълцата не A_p расте, а затихването от отражение A_o - намалява. Максимална ефективност на екранирането се получава при използване на тънък меден слой ($d_m = 18\%$) и дебел стоманен слой ($d_s = 82\%$), като тя е по-голяма от тази на еднороден стоманен и меден екран със същата дебелина съответно с 11,3% и 20,9%.

4.3.5. Екраниране на проводници

За да се намали излъчването на съединителни линии, по които преминават информационните сигнали и захранващата енергия на отделните радиоелектронни възли, блокове и устройства, а така също индуктирането на смущения в тях, се налага те да бъдат екранирани. Екраните могат да се изготвят като оплетка от тънки проводници, като цилиндрична спирала от плоски метални ленти или като плътна метална обвивка. Използването на екранирани проводници налага да се спазват определени изисквания при заземяването на екраниращата обвивка.

Когато екраниращата обвивка на проводника не е свързана към корпуса, не се постига екраниращ ефект, тъй като в екрана не могат да възникнат допълнителни токове, чисто магнитно поле би намалило полето, създадено от основния ток в проводника и липсват условия за оттичане на електрическите заряди. При свързване на произволна точка от екрана към корпуса, който има нулев потенциал спрямо земя, (фиг. 4.11а), капацитетът между екраниращата обвивка и корпуса се определя и цялото електрическо поле се концентрира в капацитета на проводник - екран, при което външно електрическо поле отсъства. За повишаване на ефективността на екрана, той трябва да се свърже към корпуса с възможно най-къс проводник. Екранираният проводник се заземява в една точка когато неговата дължина $l \leq 0,05\lambda_{min}$, където λ_{min} е дължина на вълната на най-високочестотната съставка от спектъра на сигнала. Такова заземяване изключва влиянието на електрическото поле на смущенията, но не и на магнитното. За подтискане и на магнитното поле на смущенията трябва да протече през екраниращата обвивка на екранираната верига трябва да протече през екраниращата обвивка на

състоящи се от немагнитни и магнитни слоеве, например мед-стоманна-мед. Високата ефективност на екранирането в този случай се дължи на голямата отражателна способност на медта и силното поглъщане на електромагнитната енергия в стоманата.

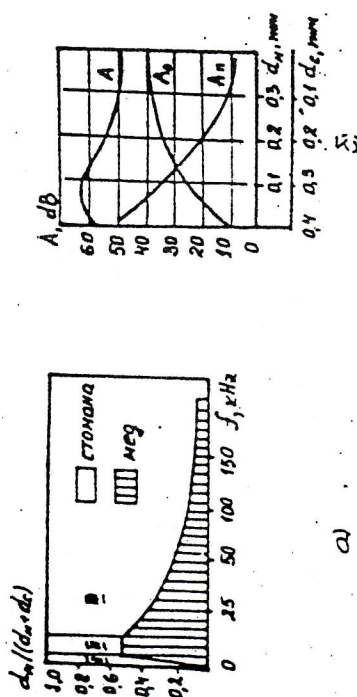
2) Повишаване на ефективността на екранирането може да се постигне като между отделните метални слоеве се разположат диелектрични слоеве, чиято дебелина превишава значително тази на металните слоеве. Такива екрани могат да се използват само тогава, когато условията допускат известно увеличаване на техните размери и маса.

3) Многослойната конструкция на екрани се оказва особено ефективна при екраниране на постоянни и нискофреkwотни магнитни полета с голяма напрегнатост. В случай на едностранен магнитен екран при висока напрегнатост на полето материалът на екрана се насища, вследствие на което неговата магнитна проницаемост μ рязко намалява и това води до понижаване на ефективността на екраниране. За изключване влиянието на насищането при използване на двустранен екран е необходимо слойът, обрънат към източника на смущаващо магнитно поле, да се изготви от магнитен материал с ниска μ и високо ниво на насищане или от немагнитен материал, а вторият слой - от материал с висока μ и ниско ниво на насищане. В такъв случай първият слой на екрана намалява напрегнатостта на магнитното поле до стойност, не предизвикваща насищане на втория слой, който осигурява основно екранирането.

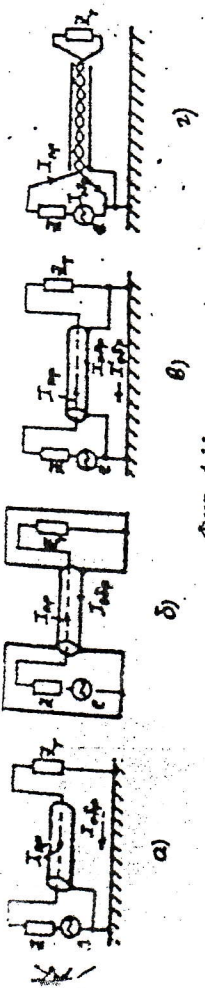
4) За избор на оптимално съотношение между дебелината на слоевете на екран от типа мед-стомана, който се използва за осигуряване на най-трудно осъществимото екраниране на магнитни полета, ще бъдат разгледани следните характерни честотни области (фиг. 4.10а):

а) от 0 до 0,5 кГц. В тази честотна област екранът работи в магнитостатичен режим за сметка на стоманения слой, като екраниращото действие на медния слой е много слабо изразено;

б) от 0,5 до 10 кГц. В тази честотна област медният слой преминава в електромагнитен режим на работа, докато стоманеният - продължава да работи в магнитостатичен режим. Поради това най-голяма ефективност на екранирането се получава при равни дебелини на слоевете;



Фиг. 4.10

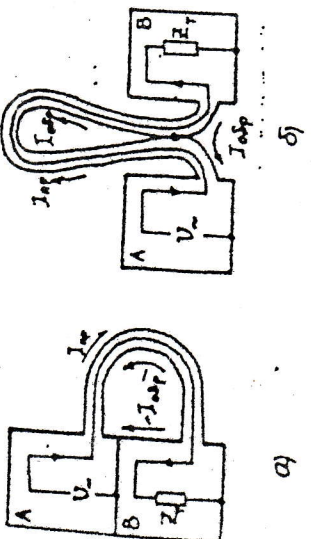


Фиг. 4.11

проводника (фиг. 4.11б). По този начин се постига компенсация на противооложните магнитни полета, създадени от правия $I_{пр}$ и обратния $I_{обр}$ токове на екранирания проводник. Пълно екраниране на магнитно поле се постига само когато екранът е единствен проводник за обратния ток, т.е. той не се шунтира от други проводници и корпуса. На практика екранираща обвивка на монтажни проводници с дължина по-голяма от 100 mm се заземява и в двата края (фиг. 4.11г). При това трябва да се отчита възможността за влошаване на магнитното екраниране поради появата на допълнителна верига на обратния ток, с което се нарушава компенсацията на магнитните полета на правия и обратния ток. Освен това екранът и земята образуват кръг, на който могат да въздействат външни магнитни полета и кондуктивни смущения, определящи се от крайното съпротивление на корпуса или шасито. При високи честоти, поради наличието на взаимна индуктивност между екрана и централния проводник, екранът създава за обратния ток верига с по-малко съпротивление от това на заземяващата верига и като резултат от това ефективността на екранирането нараства.

Висока ефективност на екранирането на електрически и магнитни полета се постига при използване на двойни екрани, а така също на усукана двойка проводници (бифиларна линия), поместена в екранна обвивка (фиг. 4.11г).

Ако корпусите на блокове А и В са свързани помежду си (фиг. 4.12а) или съществува частично окъсяване на екраниращата обвивка на свързващия ги проводник (фиг. 4.12б), екранирането може да се влоши съществено, поради създаване на допълнителна верига за обратния ток $I_{обр}$. В та-



Фиг. 4.12

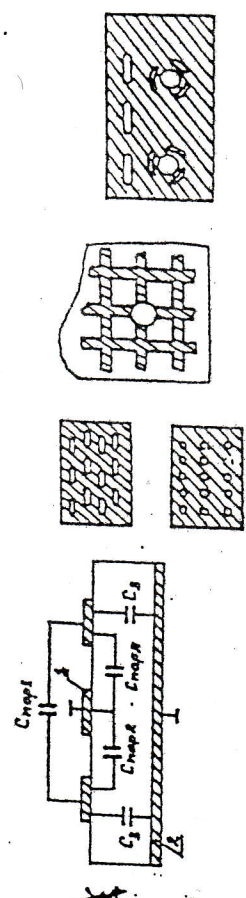
по-висока е честотата, толкова по-малка е дълбочината на проникване на тока в екрана, т.е. толкова по-малка част от тока тече по външната повърхност на екрана, с което се намалява ефектът на нарушаване на екранирането при външно късо.

Използването на екранираща обвивка увеличава монтажния капацитет на проводника спрямо корпус, в резултат на което се понижава широкотелността на стъпалото. Например използването на екраниран проводник във веригата на видеоусилвателя води до спад на неговата предавателна характеристика в областта на високите честоти. Изходната характеристика може да се възстанови чрез въвеждане на кохерентна индуктивност, включена последователно с екранирания проводник.

Екранираните проводници са големи, несудобни при монтаж и изискват специални мерки за предотвратяване на случайни къси съединения с други елементи на конструкцията. При това дължината на екранирания участък трябва да бъде по-малка от четвърт дължина на вълната за най-високочестотната съставка от спектъра на предавания сигнал. Ако това условие не е спазено, проводникът се разглежда като линия с разпределени параметри, която трябва да бъде изтеверена в двата ъкрая със съпротивления, равни на нейното характеристично съпротивление.

При нежелани електромагнитни връзки между монтажните проводници трябва да се екранират тези от тях, по които преминават сигнали с по-ниска честота, например проводниците на захранващата верига, на веригите за управление и т.н.

За намаляване на взаимното влияние на веригите на печатни платки, включително и многослойни, се използват печатни екрани, които представляват участъци от фолиото, свързани с корпуса или шасито на прибора. Ефективността на екранирането нараства с увеличаване на повърхността на екрана и намаляване на неговото отстояние до екранирания участък от схемата. Пример за екраниране на печатни проводници с помощта на шина с нулев потенциал (1) и на метална екранираща плоскост (2) е даден на фиг. 4.13а. Използването на фигурата означения имат следното съдържание: С_{пер1} — паразитен капацитет между



Фиг. 4.13