

ლექცია 18

4.1 სიბნალები ამპლიტუდური მოდულაციით

სანამ შევისწავლიდეთ მოდულირებული სიგნალების ამ უმარტივეს სახეს, განვიხილოთ მოკლედ ზოგიერთი საკითხი, რომლებიც ეხება ნებისმიერი სახის მოდულაციის პრინციპებს.

4.1.1. გადამტანი რხევის ცნება

იდეა მეთოდისა, რომელიც საშუალებას იძლევა გადავიტანოთ სიგნალის სპექტრი მაღალი სიხშირეების არეში, მდგომარეობს შემდეგში. უწინარეს ყოვლისა გადამცემში ფორმირდება დამხმარე მაღალსიხშირული სიგნალი, რომელსაც ეწოდება **გადამტანი რხევა**. მისი მათემატიკური მოდელი $u_{\text{ბა}}(t) = f(t; a_1, a_2, \dots, a_m)$ ისეთია, რომ გვაქვს პარამეტრების რაღაც $a_1, a_2, \dots, a_m$ ერთობლიობა. ვთქვათ $s(t)$ დაბალსიხშირული შეტყობინებაა, რომელიც ექვემდებარება რადიოარხით გადაცემას. თუ, უკიდურეს შემთხვევაში, მითითებული პარამეტრებიდან ერთ-ერთი იცვლება დროში გადასაცემა შეტყობინების პროპორციულად, მაშინ გადამტანი რხევა იძენს ახალ თვისებას – ის თავის თავში შეიცავს ინფორმაციას, რომელიც თავდაპირველად მოთავსებული იყო $s(t)$ სიგნალში.

სწორედ გადამტანი რხევის პარამეტრების მართვის ფიზიკური პროცესი წარმოადგენს მოდულაციას.

რადიოტექნიკაში ფართო გავრცელება ჰპოვეს მოდულაციის სისტემებმა, რომლებიც გადამტან რხევად იყენებენ მარტივ ჰარმონიულ რხევას

$$u_{\text{ბა}}(t) = U \cos(\omega t + \phi_0), \quad (4.1)$$

რომელსაც გააჩნია სამი თავისუფალი პარამეტრი U , ω და ϕ .

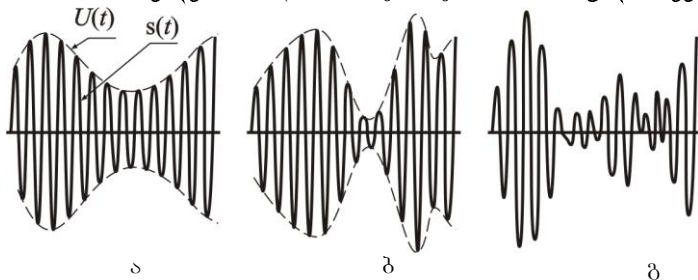
ამა თუ იმ პარამეტრის დროში ცვლილებით შეიძლება მივიღოთ მოდულაციის სხვადასხვა სახეები.

4.1.2. ამპლიტუდური მოდულაციის პრინციპი

თუ ცვლადი აღმოჩნდება $U(t)$ სიგნალის ამპლიტუდა, ამასთან დანარჩენი ორი ω და ϕ პარამეტრი უცვლელი, მაშინ გვექნება გადამტანი რხევის **ამპლიტუდური მოდულაცია**. ამპლიტუდურ-მოდულირებული, ანუ ამ-სიგნალის ჩაწერის ფორმა ასეთია:

$$u_{\text{აგ}}(t) = U(t) \cos(\omega_0 t + \phi_0) \quad (4.2)$$

ამ-სიგნალის ოსცილოგრამას აქვს მახასიათებელი სახე (იხ. ნახ. 4.1). ყურადღებას იქცევს გრაფიკის სიმეტრია დროის ღერძის მიმართ. (4.2) ფორმულის შესაბამისად **ამ-სიგნალი** არის $U(t)$ **მომვლებისა** და $\cos(\omega_0 t + \phi_0)$ **პარმონიული შევსების**



ნახ. 4.1. **ამ-სიგნალები** მოდულაციის სხვადასხვა სიდრმეებისას: ა – არაღრმა მოდულაცია; ბ – ღრმა მოდულაცია; გ – გადამოდულაცია

ნამრავლი. პრაქტიკულად საინტერესო შემთხვევების უმეტესობაში მომვლები იცვლება დროში უფრო ნელა, ვიდრე მაღალ-სიხშირული შევსება.

ამპლიტუდური მოდულაციის დროს $U(t)$ მომვლებსა და მამოდულირებელ $s(t)$ სასარგებლო სიგნალს შორის კავშირი მიღებულია განისაზღვროს შემდეგნაირად:

$$U(t) = U_m[1 + Ms(t)]. \quad (4.3)$$

აქ U_m მუდმივი კოეფიციენტი, რომელიც უდრის გადამტანი რხევის ამპლიტუდას მოდულაციის არარსებობის დროს, M - **ამპლიტუდური მოდულაციის კოეფიციენტი**.

სიდიდე M ახასიათებს ამპლიტუდური მოდულაციის სიდრმეს. ამ ტერმინის აზრი განიმარტება ამ-სიგნალების ოსცილოგრამებით, რომლებიც გამოსახულია ნახ. 4.1, ა-გ.

მოდულაციის მცირე სიდრმის დროს მომვლების ფარდობითი ცვლილება დიდი არ არის, ე.ი. $|Ms(t)| \ll 1$ დროის ყოველ მომენტში დამოუკიდებელად $s(t)$ სიგნალის ფორმისაგან.

თუ დროის მომენტებში, როცა $s(t)$ სიგნალი აღწევს ექსტრემალურ მნიშვნელობებს, ადგილი აქვს მიახლოებით ტოლობებს $Ms_{\max}(t) \approx 1$ ან $Ms_{\min}(t) \approx -1$, მაშინ ლაპარაკობენ ღრმა ამპლიტუდურ მოდულაციაზე. ხანდახან დამატებით შემოაქვთ **ზემოთ მოდულაციის ფარდობითი კოეფიციენტი**

$$M_b = (U_{\max} - U_m) / U_m$$

და ქვემოთ მოდულაციის ფარდობითი კოეფიციენტი

$$M_j = (U_m - U_{\min}) / U_m$$

ამ-სიგნალები მოდულაციის მცირე სიღრმით რადიოარხე-ბში არ არის მიზანშეწონილი გადამცემის სიმძლავრის არა-სრული გამოყენების გამო. ამავე დროს 100%-იანი მოდულაცია ზემოთ ($M_b > 1$) ორჯერ ამაღლებს რხევების ამპლიტუდას მოდულირებული შეტყობინების პიკური მნიშვნელობებისას. ამ ამპლიტუდის შემდგომ ზრდას, როგორც წესი, მიეყვება არა-სასურველ დამახინჯებებამდე გადამცემის გამოსასვლელი კასკადების გადატვირთვის გამო.

ნაკლებ საშიში არ არის ღრმა ამპლიტუდური მოდულაცია ქვემოთ. ნახ. 4.1.გ გამოსახულია ეგრეთწოდებული **გადამოდუ-ლაცია** ($M_j > 1$). აქ მომენტების ფორმა წყვეტს მოდულირებული სიგნალის ფორმის გამეორებას.

4.1.3. ერთტონალური ამპლიტუდური მოდულაცია

უმარტივესი ამ-სიგნალი შეიძლება მივიღოთ იმ შემთხვე-ვაში, როცა მამოდულირებელ დაბალსიხშირულ სიგნალს წარ-მოადგენს Ω სიხშირიანი პარმონიული რხევა. ასეთ სიგნალს

$$u_{\text{აგ}}(t) = U_m [1 + M \cos(\Omega t + \Phi_0)] \cos(\omega_0 t + \phi_0) \quad (4.4)$$

ეწოდება **ერთტონალური ამ-სიგნალი**.

გამოვარკვეით, შეიძლება თუ არა ასეთი სიგნალი წარმო-ვიდგინოთ სხვადასხვა სიხშირიანი მარტივი პარმონიული რხე-ვების ჯამად. კოსინუსების ნამრავლის ცნობილი ტრიგონომე-ტრიული ფორმულის ($\cos x \cos y = 1/2 [\cos(x+y) + \cos(x-y)]$) გა-მოყენებით, (4.4) გამოსახულებიდან მივიღებთ

$$u_{\text{აგ}}(t) = U_m \cos(\omega_0 t + \phi_0) + \frac{U_m M}{2} \cos[(\omega_0 + \Omega)t + \phi_0 + \Phi_0] + \\ + \frac{U_m M}{2} \cos[(\omega_0 - \Omega)t + \phi_0 - \Phi_0]. \quad (4.5)$$

ფორმულა (4.5) ადგენს ერთტონალური ამ-სიგნალის სპექ-ტრალურ შემადგენლობას. მიღებულია შემდეგი ტერმინოლო-გია: ω_0 - **გადამტანი სიხშირე**, $\omega_0 + \Omega$ - **ზედა გვერდითი სიხ-შირე**, $\omega_0 - \Omega$ - **ქვედა გვერდითი სიხშირე**.

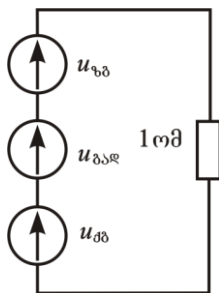
(4.5) ფორმულის მიხედვით სპექტრალური დიაგრამის აგე-ბისას საჭიროა უწინარეს ყოვლისა ყურადღება მივაქციოთ ზე-და და ქვედა გვერდითი რხევების ამპლიტუდების ტოლობას,

ასევე ამ სპექტრალური შემდგენლების განლაგების სიმეტრიას გადამტანი რხევების მიმართ.

ერთტონალური მოდულაცია სიმეტრიულია, ანუ $M_{\psi} = M_{\phi} = M$

4.14. ამ-სიგნალის ენერგეტიკული მახასიათებლები

განვიხილოთ გადამტანი და გვერდითი რხევების სიმძლავრეების თანაფარდობის საკითხი. ერთტონალური ამ-სიგნალის წყარო ექვივალენტურია ჰარმონიული რხევების სამი მიმდევრობით ჩართული წყაროსი:



ნახ. 4.2

$$u_{\text{бад}}(t) = U_m \cos(\omega_b t + \phi_0),$$

$$u_{\text{нб}}(t) = \frac{U_m M}{2} \cos[(\omega_0 + \Omega)t + \phi_0 + \Phi_0],$$

$$u_{\text{აბ}}(t) = \frac{U_m M}{2} \cos[(\omega_0 - \Omega)t + \phi_0 - \Phi_0].$$

გარკვეულობისათვის დავუშვათ, რომ ესენია მძმ-ის წყაროები, რომლებიც შეერთებულია მიმდევრობით და დატვირთულია ერთეულ რეზისტორზე. მაშინ ამ-სიგნალის მყისიერი სიმძლავრე შეიძლება რიცხობრივად ტოლი იყოს ჯამური ძაბვის კვადრატის:

$$P_{\text{სა}}(t) = u_{\text{აბ}}^2 = u_{\text{бад}}^2 + u_{\text{нб}}^2 + u_{\text{აბ}}^2 + 2u_{\text{бад}}u_{\text{нб}} + 2u_{\text{бад}}u_{\text{აბ}} + 2u_{\text{нб}}u_{\text{აბ}} \quad (4.6)$$

((4.6) გამოსახულება შეიცავს როგორც საკუთარი სიმძლავრეების წყაროების, ასევე ურთიერთსიმძლავრეებს, პროპორციულებს წვეილ-წვეილად დაჯჭუბებული მყისიერი ძაბვების ნამრავლს).

იმისათვის, რომ ვიპოვოთ სიგნალის საშუალო სიმძლავრე, $p(t)$ სიდიდე აუცილებელია გავასაშუალოო დროის საკმაოდ

დიდ T მონაკვეთზე:

$$\langle p_{\text{სა}} \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt.$$

ადვილად დავრწმუნდებით, რომ გასაშუალოებისას ყველა ურთიერთ სიმძლავრეები მოგვცემენ ნულოვან შედეგს, ამიტომ ამ-სიგნალის საშუალო სიმძლავრე აღმოჩნდება გადამტანი და გვერდითი რხევების საშუალო სიმძლავრეების ჯამის ტოლი:

$$\langle p_{\text{სა}} \rangle = \langle p_{\text{бад}} \rangle + [\langle p_{\text{нб}} \rangle + \langle p_{\text{აბ}} \rangle] = \frac{U_m^2}{2} + \frac{U_m^2 M^2}{4} \quad (4.7)$$

აქედან გამომდინარეობს, რომ

$$[\langle p_{\text{нб}} \rangle + \langle p_{\text{აბ}} \rangle] / \langle p_{\text{бад}} \rangle = \frac{U_m^2 M^2}{4} / \frac{U_m^2}{2} = \frac{M^2}{2} \quad (4.8)$$

ასე რომ, 100%-იანი მოდულაციის ($M=1$) დროსაც კი ორივე გვერდითი რხევის სიმძლავრის წილი შეადგენს არამოდულირებული გადამტანი რხევის სიმძლავრის მხოლოდ 50%. რამდენადაც ინფორმაცია შეტეობინების შესახებ ჩადებულია გვერდით რხევებში, შეიძლება აღინიშნოს სიმძლავრის გამოყენების არაეფექტურობა ამ-სიბნალის გადაცემისას.

4.15 აპლიტუდური მოდულაცია რთული მამოღულირებელი სიბნალის დროს

პრაქტიკაში ერთტონალური ამ-სიბნალები იშვიათად გამოიყენება. უფრო მეტად რეალურია შემთხვევა, როცა მამოღულირებელ დაბალსიხშირულ სიბნალს აქვს რთული სპექტრალური შემადგენლობა. ასეთი სიბნალის მათემატიკური მოდელი შეიძლება იყოს, მაგალითად ტრიგონომეტრიული ჯამი

$$s(t) = \sum_{i=1}^N a_i \cos(\Omega_i t + \Phi_i). \quad (4.9)$$

აქ Ω_i სიხშირეები ქმნიან მოწესრიგებულ ზრდად მიმდევრობას $\Omega_1 < \Omega_2 < \dots < \Omega_N$, იმ დროს როცა, a_i აპლიტუდები და Φ_i საწყისი ფაზები - ნებისმიერია.

(4.9) ფორმულის ჩასმით (4.3)-ში, მივიღებთ

$$u_{\text{ამ}}(t) = U_m [1 + \sum_{i=1}^N M \alpha_i \cos(\Omega_i t + \Phi_i)] \cos(\omega_0 t + \phi_0) \quad (4.10)$$

შემოვიტანოთ *მოდულაციის პარციალური (ნაწილობრივი) კოეფიციენტების* ერთობლიობა $M_i = M \alpha_i$ (4.11)

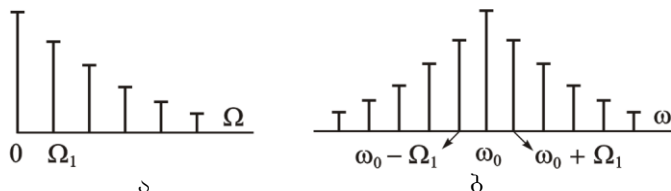
და ჩავწეროთ რთულდამოღულირებული (მრავალტონალური) ამ-სიბნალის ანალიზური გამოსახულება ფორმით, რომელიც განაზოგადებს (4.4) გამოსახულებას:

$$u_{\text{ამ}}(t) = U_m [1 + \sum_{i=1}^N M_i \cos(\Omega_i t + \Phi_i)] \cos(\omega_0 t + \phi_0). \quad (4.12)$$

სპექტრალური გაშლა ხდება ისევე, როგორც ერთტონალური ამ-სიბნალისა:

$$\begin{aligned} u_{\text{ამ}}(t) = U_m \cos(\omega_0 t + \phi_0) + \sum_{i=1}^N \frac{U_m M_i}{2} \cos[(\omega_0 + \Omega_i)t + \phi_0 + \Phi_i] + \\ + \sum_{i=1}^N \frac{U_m M_i}{2} \cos[(\omega_0 - \Omega_i)t + \phi_0 - \Phi_i] \end{aligned} \quad (4.13)$$

ნახ. 4.3,ა გამოსახულია მამოდულირებელი სიგნალის სპექტრალური დიაგრამა, რომელიც აგებულია (4.9) ფორმულის შესაბამისად. ნახ. 4.3,ბ ასახავს მრავალტონალური ამ-სიგნალის სპექტრალურ დიაგრამას, რომელიც პასუხობს ამ მამოდულირებელ რხევას.



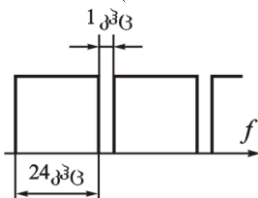
ნახ. 4.3. სპექტრალური დიაგრამები: ა – მამოდულირებელი სიგნალის; ბ – ამ-სიგნალის მრავალტონალური მოდულაციისას

ამრიგად, რთულადმოდულირებული ამ-სიგნალის სპექტრში გადამტანი რხევის გვერდით, არის ზედა და ქვედა გვერდითი რხევების ჯგუფები. ზედა გვერდითი რხევების სპექტრი წარმოადგენს მამოდულირებელი სიგნალის სპექტრის ასლს, რომელიც დაძრულია მაღალი სიხშირეების არეში ω_0 სიდიდით.

ქვედა გვერდითი სიხშირეების სპექტრი ასევე იმეორებს $s(t)$ სიგნალის სპექტრალურ დიაგრამას, მაგრამ განლაგდება სარკისებურად გადამტანი სიხშირის ω_0 მიმართ.

ნათქვამიდან გამომდინარეობს მნიშვნელოვანი შედეგი: ამ-სიგნალის სპექტრის სიგანე ტოლია მამოდულირებელი დაბალსიხშირული სიგნალის უდიდესი სიხშირის გაორმაგებული მნიშვნელობისა.

მაგალითი 4.1. განსაზღვრეთ მაუწყებელი რადიოარხების რიცხვი, რომელიც შეიძლება მოთავსდეს 0.5-დან 1.5 მგჰც სიხშირეთა დიაპაზონში (საშუალოტელელოვანი სამაუწყებლო დიაპაზონის დაახლოებით საზღვრებში).



რადიომაუწყებელი სიგნალების დამაკმაყოფილებელი კვლავწარმოებისათვის აუცილებელია 100 კჰც-დან 12 კჰც-მდე ბგერითი სიხშირეების კვლავწარმოება. ამგვარად, სიხშირეთა ზოლი, რომელიც მიიყვანება ერთ ამ-არხზე, ტოლია 24 კჰც. იმისათვის, რომ თავიდან ავიცილოთ ჯვარედინი ხელშეშვები არხებს შორის, საჭიროა გავითვალისწინოთ დამცავი ინტერვალი 1 კჰც სივანით. ამიტომ არხების დასაშვები რიცხვია $N = (1.5 - 0.5) \cdot 10^6 / (25 \cdot 10^3) = 40$.

ნახ. 4.4

ნახ. 4.4-ზე მოყვანილია სიხშირეთა ზოლები