

## Kryterium oceny nierówności terenu

ANDRZEJ SOŁTYŃSKI

Ocena każdego pojazdu terenowego wymaga sprawdzenia jego charakterystyki dynamicznej, sprawności trakcyjnej i eksploatacyjnej, a także trwałości, wygody jazdy itd. Niemożliwa jest dzisiaj ocena jakiegokolwiek pojazdu terenowego w oderwaniu od ośrodka, w którym ma się on poruszać, a tym ośrodkiem jest różnorodnie ukształtowany teren.

Dotychczas przeprowadzone studia wykazały, że ukształtowanie terenu, po którym pojazd porusza się, w większym stopniu niż obciążenie i prędkość oddziałuje na charakterystykę dynamiczną pojazdu, a więc z jednej strony na jego sprawność trakcyjną, z drugiej strony na jego trwałość.

Ocena nierówności terenu i analiza oddziaływania tych nierówności wymaga określenia modelu matematycznego profilu terenu.

Sfalowanie terenu naturalnego ma charakter niestabilny i przypadkowy i może być z tego powodu określone za pomocą funkcji losowych, charakteryzujących się nieperiodycznym występowaniem fal o różnej amplitudzie i długości [1].

Gdy długość fali terenu zmniejsza się, a amplituda wzrasta — ruch pojazdu staje się coraz trudniejszy aż ustaje po przekroczeniu pewnych granicznych długości i amplitudy fali. Wypadek taki w sensie fizycznym odpowiada wypadkowi najechania na przeszkodę terenową, co jest równoznaczne z ustaniem ruchu i nie będzie stanowić tematu niniejszych rozważań.

W obszarze zainteresowań pozostaje teren o możliwie płaskim profilu, ale o różnorodnym mikroprofilu, w którym to terenie ruch pojazdu, jakkolwiek utrudniony, jest jednak możliwy. Teren taki nazwać można terenem trakcyjnym.

Mikroprofil takiego terenu będzie posiadał charakter tego typu co krzywa na rys. 1, będąca typową krzywą o niestabilnym przebiegu i losowym rozkładzie wartości zmiennych.

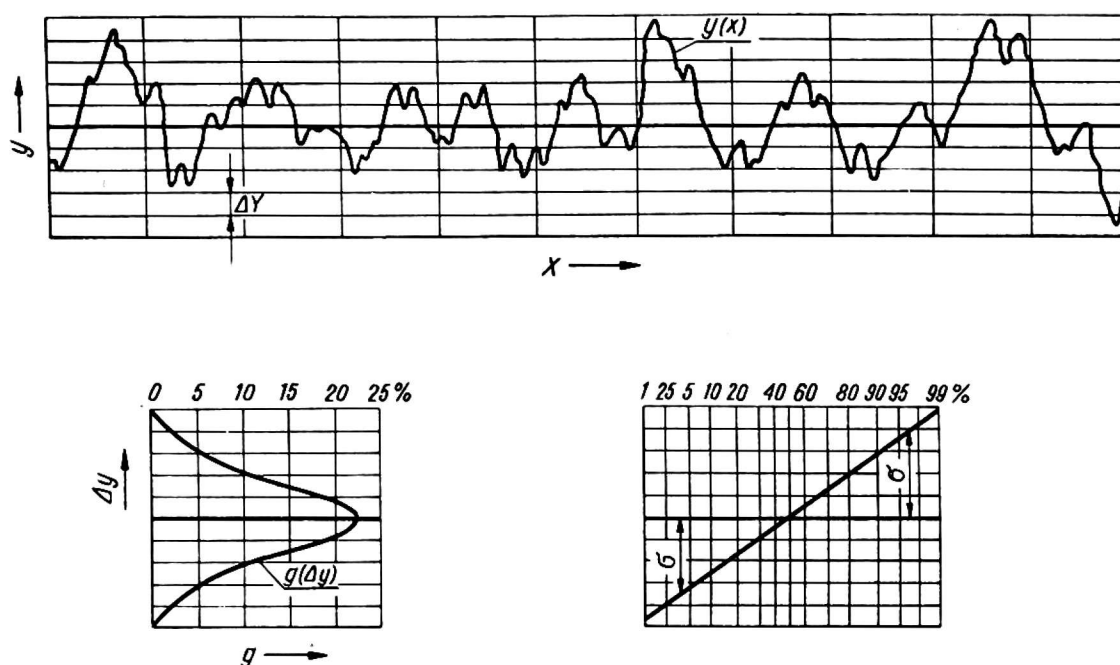
Dla rozkładu normalnego zmiennej losowej, wartością charakterystyczną oprócz funkcji gęstości  $g(y)$  będzie wartość średnia i wariancja  $\sigma^2$ , czyli kwadrat odchylenia.

Dla pełnego scharakteryzowania jednak funkcji losowej należy przeprowadzić analizę prawdopodobieństwa występowania danych częstości.

Funkcje nieperiodyczne  $y(x)$ , ale ciągłe o niestabilnym przebiegu, mogą być przedstawione przy pomocy całki Fouriera w postaci sumy drgań harmonicznym o różnych częstościach  $\omega$  i amplitudach losowych  $A$  [2].

$$y(x) = \int_0^{\infty} A \sin(\omega x + \gamma) d\omega$$

gdzie:  $\gamma$  — kąt fazowy.



Rys. 1. Wykresy typowej funkcji o niestabilnym przebiegu oraz jej rozkładu gęstości i wielkości odchylenia

Dla wariancji

$$\sigma^2 = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} y^2(x) dx$$

a po podstawieniu całki Fouriera można otrzymać:

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{4\pi}{T} A^2(\omega) d\omega$$

Średnią wartość powyższego wyrażenia otrzymać można z widma amplitudy, gdy wartość  $A^2$  zcałkować dla danego zakresu  $\omega$ . Wyrażenie ujęte pod całką nazywane jest gęstością widmową.

W odniesieniu do częstości  $\Omega$  drogi przy uwzględnieniu zależności:  $\omega = v \Omega$  gęstość widmowa odpowiadać będzie w naszym wypadku średniej wartości kwadratu wysokości mikroprofilu odniesionej do danej częstości. Funkcję tę jako funkcję losową stacjonarną określi zależność [3]:

$$S(\Omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} R(\tau) e^{-i\Omega\tau} d\tau$$

gdzie:  $\tau$  — przedział całkowania

$i$  — liczba zespolona

$R(\tau)$  — funkcja korelacji określona wzorem

$$R(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(\Omega) e^{i\Omega\tau} d\Omega$$

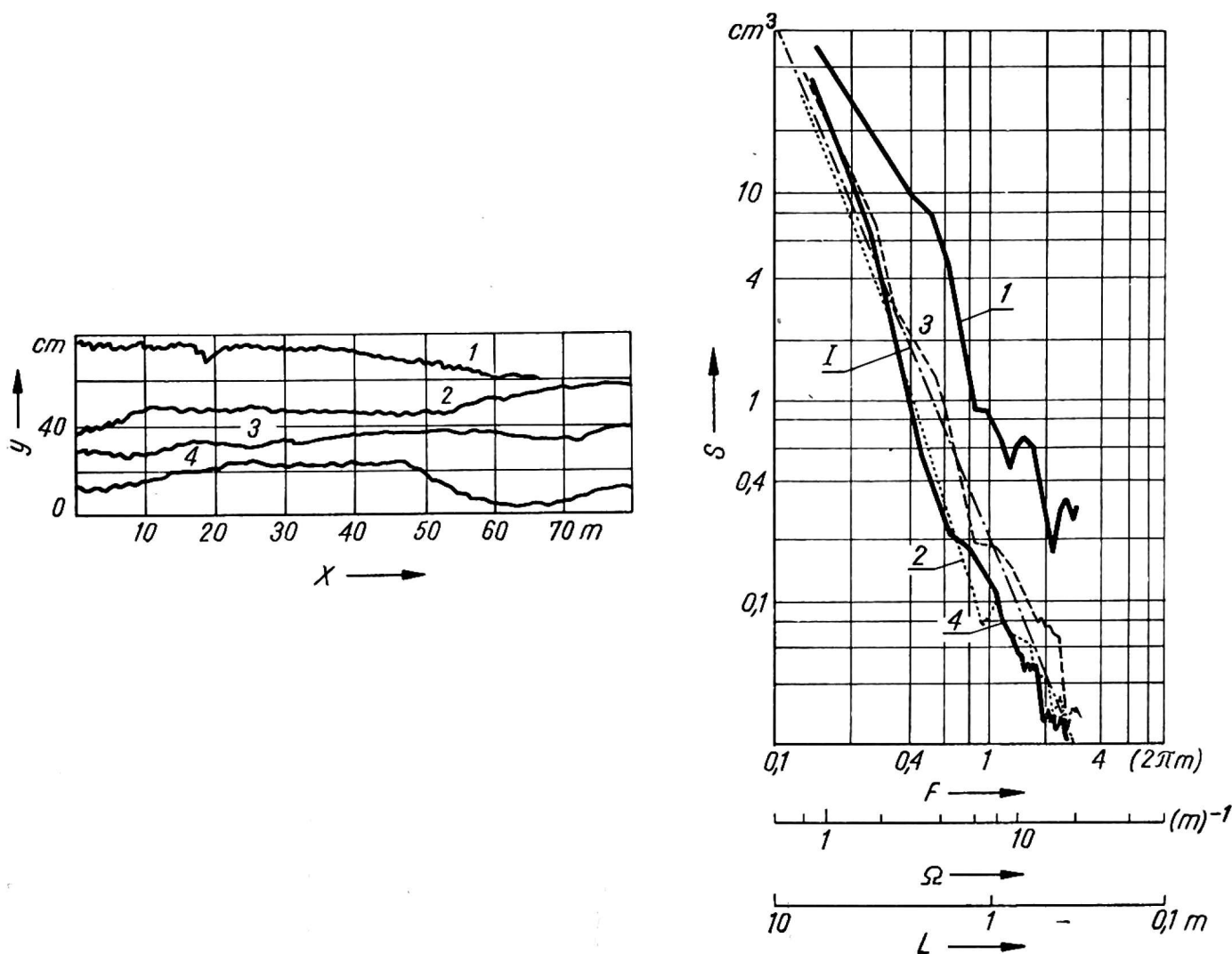
Stąd można wyrazić wariancję jako funkcję gęstości widma

$$\sigma^2 = R(0) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(\Omega) d\Omega$$

Chcąc ustalić charakterystykę mikroprofilu terenu należy pomierzyć wartości funkcji  $y(x)$  i na tej podstawie, w zależności od tego czy pomiar wykonywano aparatem do ciągłego zapisu [4] czy metodą punktową, wykonać obliczenie gęstości widmowej. W tym drugim wypadku i tak pracochłonne obliczenia jeszcze bardziej się komplikują ze względu na konieczność doboru odpowiednich przedziałów pomiarowych.

W literaturze wielokrotnie podawane były wyniki pomiarów mikroprofilu terenu [1, 5, 6]. Analiza widmowa gęstości tych mikroprofilów wykazuje, że różnorodny rolniczy teren trakcyjny można podzielić na cztery zasadnicze grupy, a mianowicie:

- I — drogi o twardej nawierzchni,
- II — drogi o miękkiej nawierzchni,
- III — pola orne,
- IV — pola upraw międzyrzędowych.



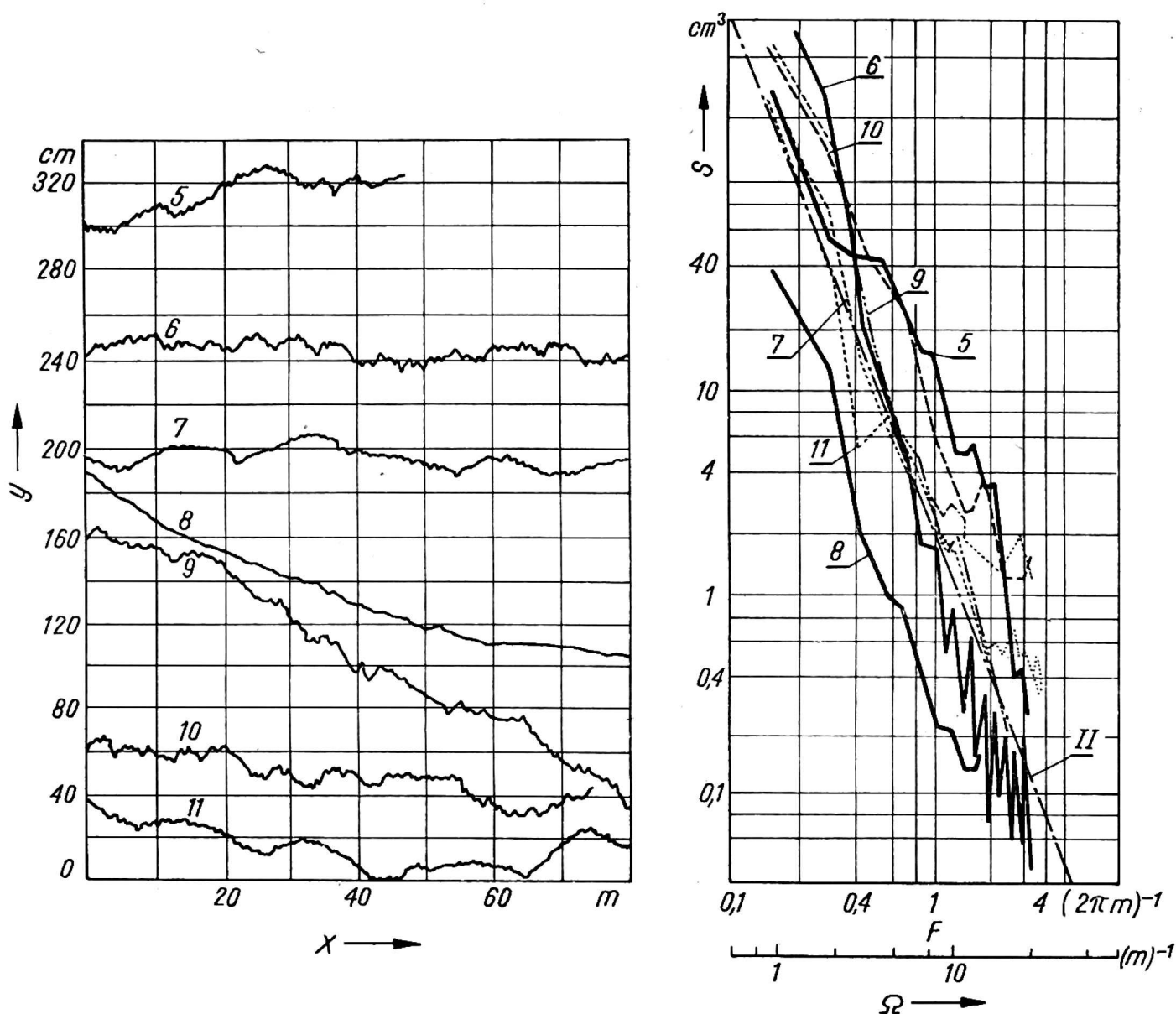
Rys. 2. Wykresy mikroprofilów dróg o twardej nawierzchni wraz z wykresem ich gęstości widmowej. 1 — droga betonowa, nawierzchnia zniszczona; 2 — droga z wałowanego żużlu, stan bardzo dobry; 3 — droga z wałowanego żużlu, stan bardzo zły; 4 — droga o nawierzchni żużlowej

Na podstawie wykresów na rys. 2 można spróbować wykreślić „średnią” prostą logarytmiczną dla grupy I odzwierciedlającej przebieg funkcji  $S(\Omega)$  o równaniu:

$$\log S = -0,48 \text{ cm}^3 - 2,33 \log F(2\pi m)^{-1}$$

Podobnie na podstawie wykresów rys. 3 można wykreślić prostą „średnią” dla grupy II dróg o miękkiej nawierzchni

$$\log S = 0,46 \text{ cm}^3 - 2,25 \log F(2\pi m)^{-1}$$



Rys. 3. Wykresy mikroprofilów dróg o miękkiej nawierzchni wraz z wykresem ich gęstości widmowej. 5 — droga z bali drewnianych; 6 — droga polna o złym stanie; 7 — typowa droga polna; 8 — droga polna o lekkim spadku w bardzo dobrym stanie; 9 — błotnista droga polna; 10 — droga polna w bardzo złym stanie; 11 — droga dojazdowa na pole ziemniaczane

Dla widm gęstości terenów rolniczych (rys. 4) rozrzut wartości jest większy, można tutaj wyznaczyć: dla zoranego pola (krzywa nr 14, grupa IV)

$$\log S = 2 \text{ cm}^3 - 0,38 \log F(2\pi m)^{-1}$$

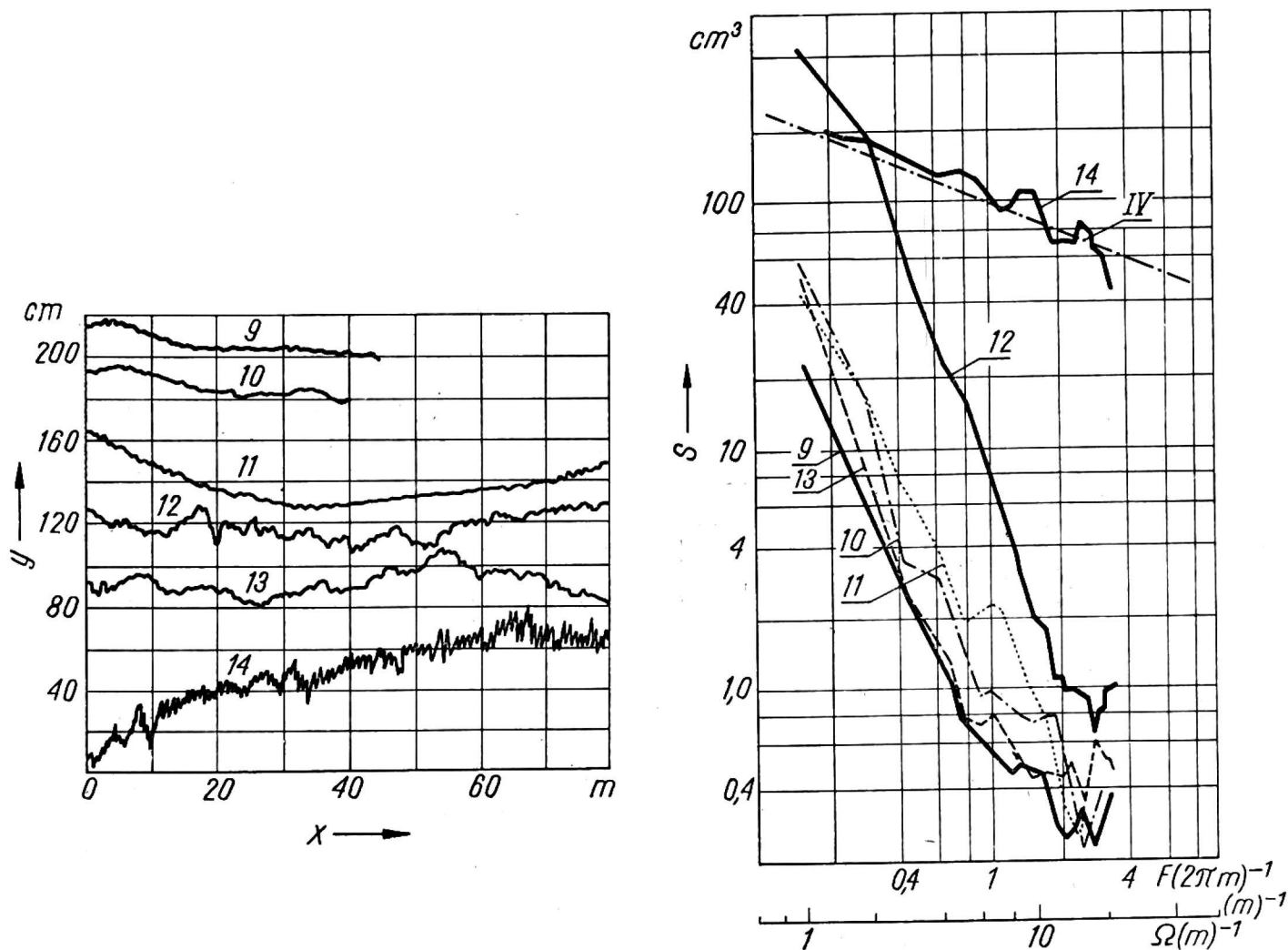
dla pastwiska z nierównościami po wykarczowanych pniach (krzywa nr 12)

$$\log S = 1,08 \text{ cm}^3 - 2,45 \log F(2\pi m)^{-1}$$

dla pozostałych terenów rolnych (krzywa nr 9, 10, 11, 13):

$$\log S = 0,1 \text{ cm}^3 - 2,3 \log F(2\pi m)^{-1}$$

Ostatnią grupę stanowią pola po uprawie ziemniaków i buraków (rys. 5) charakteryzujące się pewną cyklicznością terenu, widoczną wyraźnie tylko na wykresach



Rys. 4. Wykresy mikroprofilów terenów rolniczych wraz z wykresem ich gęstości widmowej.  
 9 — zorane pole; 10 — pole po zebranych grochu; 11 — ściernisko; 12 — pastwisko;  
 13 — łąka; 14 — zmarznięte zorane pole

gęstości widmowej i zależną od technologii upraw, a występującą dla częstotliwości 0,8 1,4, 2,0 odpowiadającej długości fali 1,25, 0,625, 0,5 m.

Dla tego typu podłoży (grupa III) prosta określona zależnością:

$$\log S = 1,37 \text{ cm}^3 - 1,15 \log F(2\pi m)^{-1}$$

stanowiąc będzie tylko pewne przybliżone zobrazowania wartości przeciętnej nie oddając cyklicznego charakteru gęstości widma.

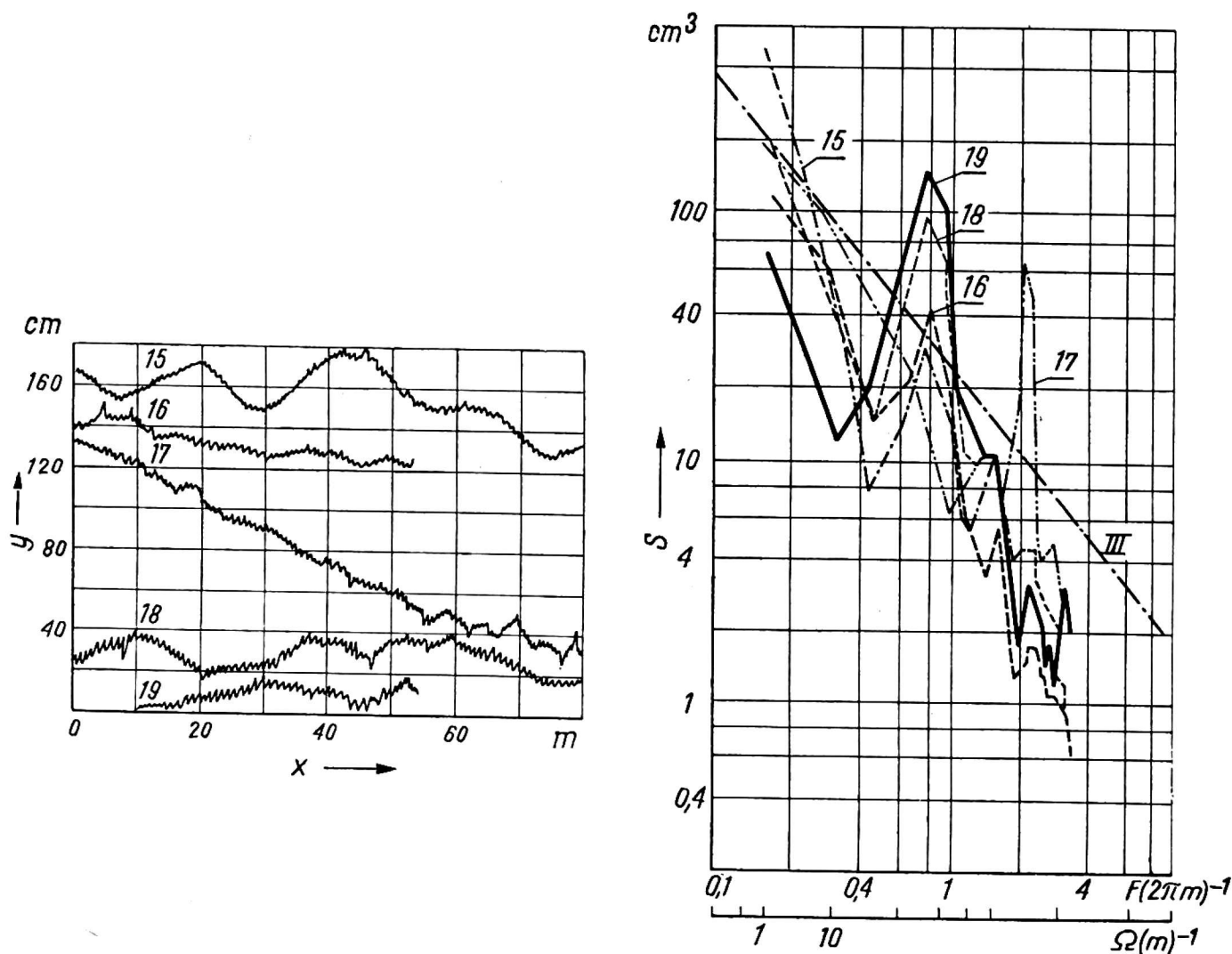
W celu porównania przebiegu „średnich” prostych logarytmicznych jak i prostych granicznych dla czterech grup terenu wykonano wykres zbiorczy (rys. 6) tych prostych, które, jak to wynika z uprzednio podanych równań, określone są ogólną zależnością:

$$S = F^a 10^b = AF^a$$

Na wykres nie naniesiono prostych „średnich” dla krzywych 9, 10, 11, 12, 13 — jako, że nie stanowią one oddzielnej charakterystycznej grupy i pokrywają się z pozostałymi.

Z wykresów na rys. 6 można dla długości fali odpowiadającej np. średnicy opony  $D = L = 1$  m odczytać stosunek gęstości widmowej czterech grup terenu:

$$\text{I} : \text{II} : \text{III} : \text{IV} \\
0,3 : 3 : 20 : 100$$



Rys. 5. Wykresy mikroprofilów terenów po uprawach międzyrzędowych wraz z wykresem ich gęstości widmowej. 15—16 — pole po zebranych ziemniakach; 17 — pole po zebranych burakach; 18—19 — pole po zebranych ziemniakach

co po uwzględnieniu kwadratu mikroprofilu daje:

$$1 : 3,5 : 9 : 20$$

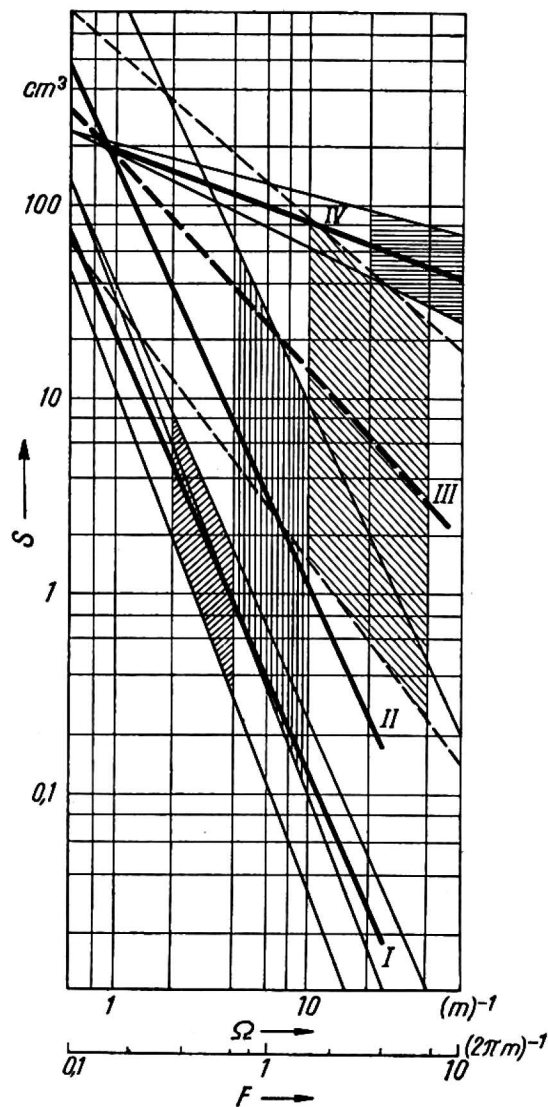
Dla małych częstotliwości jest ten stosunek mniejszy, dla dużych wzrasta bardzo poważnie, co oznaczać będzie, że o ile przy jeździe po łagodnie sfalowanym terenie wysokość sfalowania ma mniejsze znaczenie, o tyle przy krótkiej „fali” terenu wysokość sfalowania ma istotne znaczenie, oddziałując ujemnie na pojazd i jego ruch.

W celu ogólniejszego zobrazowania otrzymanych zależności wykonano wykresy wykładników równania krzywej  $S = F^a 10^b$  jako funkcję  $a = f(b)$ , przyjmując dla porównania jednakową intensywność gęstości widmowej  $S(F) = 0$ .

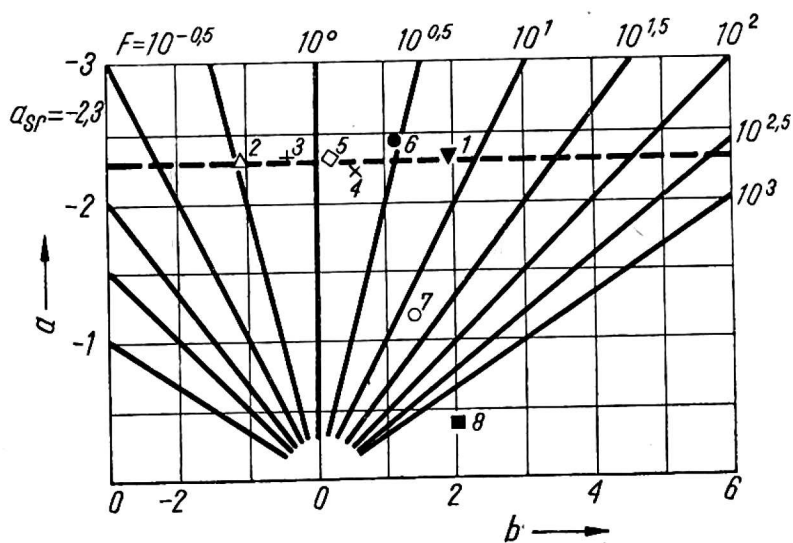
Z wykresu tego (rys. 7) wynika, że punkty dotyczące odpowiednio różnych podłoży o naturalnych nierównościach mikroprofilu leżą na jednej prostej odpowiadającej średniej wartości  $a = -2,3$ .

Dla innych podłoży można ogólnie stwierdzić, że im mniejsza wartość wykładnika  $a$ , a większa wykładnika  $b$ , tym bardziej ujemnie oddziałują podłoża te na pojazd.

Opierając się na proporcjonalności, jaka istnieje między energią prądu elektrycznego a kwadratem amplitudy odpowiedniej harmoniki, można przez analogię



Rys. 6. Wartości średnie i graniczne rozkładu gęstości widmowej dla mikroprofilów czterech charakterystycznych grup terenu



Rys. 7. Współzależność wartości wykładników funkcji  $S = 10^a F^b$  dla wypadku  $S(F) = 0$ .  
 1 — pole leżące odłogiem; 2 — betonowy pas startowy; 3 — droga utwardzona (grupa I);  
 4 — droga polna (grupa II); 5 — pole uprawne lub łąki (krzywe nr 9, 10, 11, 13);  
 6 — pastwisko (krzywa nr 30); 7 — pole o okresowych nierównościach (grupa III);  
 8 — zmarznięte zorane pole (grupa IV)

stwierdzić, że podobna proporcjonalność będzie zachodzić między nierównością terenu a energią mechaniczną włożoną w pokonanie tych nierówności. Czym energia ta będzie większa, a więc czym gęstość widmowa będzie wyższa, tym większe i bardziej ujemne będzie oddziaływanie terenu na pojazd (w jakim stopniu i zakresie trudno w tej chwili powiedzieć). Powinno to być tematem dalszych studiów, do których bazę wyjściową może stanowić omówiona powyżej metoda oceny mikroprofilu terenu.

### STRESZCZENIE

Jednym z warunków zachowania podobieństwa badań pojazdów, przeprowadzanych na sztucznie wymodelowanym torze, z warunkami rzeczywistymi jest zachowanie podobieństwa między profilem toru a profilem terenu.

Sfalowanie terenu naturalnego ma charakter nieustalony i przypadkowy i może być z tego powodu określone za pomocą funkcji losowych, o przyjętym rozkładzie normalnym zmiennej losowej.

Wartością charakterystyczną będzie w takim wypadku gęstość widmowa zwana też mocą gęstości widma.

Opierając się na analogii do przebiegu zmian energii prądu elektrycznego można stwierdzić, że między nierównością terenu a energią mechaniczną włożoną w pokonanie terenu będzie zachodzić proporcjonalność. Stąd wykresy gęstości widmowej odpowiadającej średniej wartości kwadratu wysokości mikroprofilu terenu, odniesionej do danej częstości drogi — mogą stanowić materiał wyjściowy do analizy i klasyfikacji różnych rodzajów nierówności ułatwiających wybór mikroprofilu toru, lub raczej terenu do badań zmęczeniowych różnego typu pojazdów terenowych, a więc i pojazdów rolniczych.

### LITERATURA

1. Gote L. I., Journal of Terramechanics, vol. 2. No. 3, 1965.
2. Söhne W., Grundlagen der Landtechnik, nr 1, hand 15.
3. Swiesznikow A. A., Podstawowe metody funkcji losowych. PWT Warszawa 1965.
4. Sołtyński S., Mechanika układu pojazd—teren. Wyd. MON 1966.
5. Perzner M., Journal of Terramechanics, vol. 1, No. 4, 1964.
6. Wendeborn I. O., Journal of Terramechanics, vol. 3, No. 3, 1966.

АНДЖЗЙ СОЛТЫНСКИ

### КРИТЕРИЙ ОЦЕНКИ РЕЛЬЕФА МЕСТНОСТИ

#### Резюме

Условием гарантируемым сходство проведенных испытаний транспортной машины на искусственном треке и в действительных местных условиях является сходство между рельефом трека а рельефом местности.

Рельеф местности имеет неустановившийся и случайный характер и поэтому надо описывать его при помощи случайных функций с принятым нормальным распределением случайной переменной.



В таком случае характерной величиной будет спектральная плотность называемая также мощностью плотности спектра.

Опираясь на соотношении, какое существует между энергией электрического тока а квадратом амплитуды соответствующей гармонике, можно по методу аналогии прийти к выводу, что таким же соотношением выразится зависимость между неровностями местности и механической энергией, затрачиваемой на преодоление этих неровностей.

Поэтому, графики спектральной плотности соответствующей среднему значению квадрата высоты микрорельефа местности по отношению к данной частоте дороги, могут использоваться в качестве исходных данных для анализа и классификации различных видов рельефа, что облегчает выбор микрорельефа трека или местности для проведения испытаний различного типа транспортных средств на выносливость.