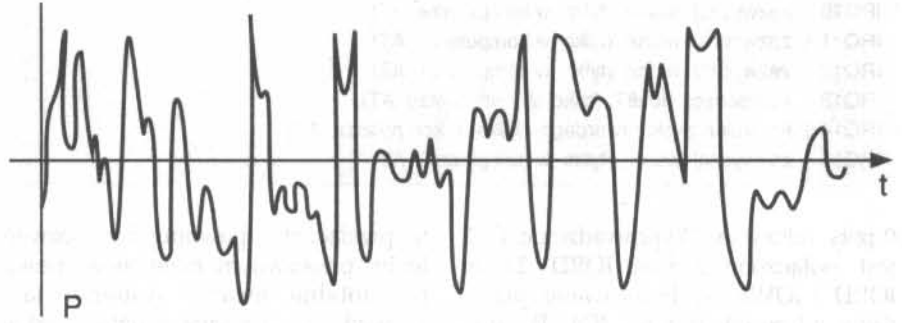


Kolejnym tematem, który bierzemy „na warsztat“, jest problem szumów. Z dobrze poinformowanych źródeł wiemy, że duża część naszych Czytelników gubi się w tym temacie. I nic dziwnego. Czy trudno jest stracić orientację w gąszczu terminów takich jak: napięcie szumów, szum biały, współczynnik szumów, szum termiczny, prąd szumów, temperatura szumowa, szum „popcorn“, poziom szumów odniesiony do wejścia, szumy wybuchowe, stosunek sygnał/szum, szumy śrutowe, szum różowy, moc szumów itp? A już najbardziej ciekawe jest, co za mądrała wymyślił pierwiastek z herca, spotykany właśnie przy opisie szumów!



Szumy część 1



Rys. 1.

Wstęp

Wśród elektroników-praktyków temat szumów jest jednym z mniej rozumianych zagadnień. Zagadnienie to jest rzeczywiście złożone, nie ma jednak problemu, którego nie dałoby się uproszczyć czy wytłumaczyć.

W cyklu „Notatnik praktyka“ poświęcimy więc trochę uwagi problemowi szumów. Naszym celem jest przedstawienie od podstaw tego nieco zawilego tematu w sposób jak najbardziej przystępny. Materiał ten przeznaczony jest przede wszystkim dla elektroników budujących samodzielnie sprzęt audio, podane informacje mają jednak charakter uniwersalny i dotyczą wszelkich szumów.

Na początku chcemy przedstawić kompleksowo naturę i źródła szumów, szumy elementów elektronicznych, podać sposoby i przykłady korzystania z danych katalogowych. Ponieważ koncentrujemy się na szumach aparatury audio, odpowiednią ilość miejsca poświęcimy zagadnieniom ściśle akustycznym - omówimy charakterystykę czułości ucha ludzkiego i zagadnienia maskowania dźwięku. Podsumowaniem całości będą praktyczne wskazówki i przykłady układów niskoszumnych oraz najważniejsze dane

katalogowe niskoszumnych elementów półprzewodnikowych.

Zajmiemy się też trochę sprawą zakłóceń, ponieważ jest to sprawa ściśle związana z szumami.

Postaramy się z całego obszernego zagadnienia wybrać to, co jest przydatne praktykowi, nie unikniemy jednak na początku sporej dawki teorii.

Równoległe z omawianiem tematu szumów w dziale „Notatnik praktyka“, na łamach EP będziemy też publikować przykłady praktycznych rozwiązań, związanych z tym zagadnieniem. W tym numerze opiszemy generatory szumu. W najbliższym czasie opiszemy moduł dynamicznej redukcji szumów oraz pasmowy filtr szumów.

Na początek proponujemy niewielki lyk teorii. Dla łatwiejszego zrozumienia wzajemnych związków między omawianymi pojęciami pomocny będzie spis treści. Podstawy teoretyczne przedstawiamy w dwóch częściach.

I. Niezbędna odrobina czystej teorii

- Gęstość spektralna
- Szum biały
- Szum różowy

- Średnia moc szumów
- Dodawanie szumów

II. Rodzaje i źródła szumów

- Szumy zewnętrzne

- Szumy wewnętrzne

- Szumy termiczne

- Szumy śrutowe

- Szumy generacji - rekombinacji

- Szumy strukturalne

- Szumy migotania

Niniejszy artykuł zawiera część pierwszą. Część druga, kończąca wykład teoretyczny, znajdzie się w następnym numerze EP.

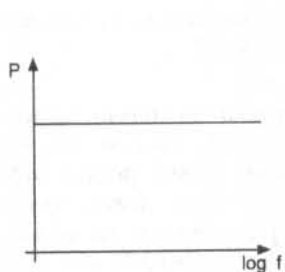
Prosta definicja szumu

Szumem nazywamy każdy pojawiający się w układzie sygnał przypadkowy, którego nie można przewidzieć stosując metody analizy stało- i zmiennoprądowej. Przykładowy przebieg szumy przedstawia rysunek 1.

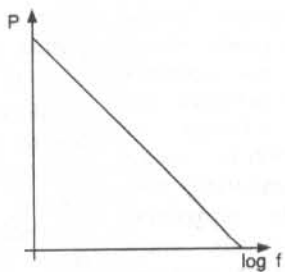
Szumy są więc przebiegami niepowtarzalnymi, wzajemnie nieskorelowanymi, mającymi gaussowski rozkład amplitudy - czym większa amplituda, tym mniejsze prawdopodobieństwo jej wystąpienia. Wartość średnia napięcia szumów wynosi oczywiście zero, możemy natomiast mówić o wartości skutecznej mocy, napięcia czy prądu szumów; rozkład gaussowski pozwala przewidzieć także wartości szczytowe.

Często do obliczeń przydatna jest informacja, że wartość międzyszczytowa szumów przez 99,73% czasu nie przekracza wartości skutecznej tego szumu pomnożonej przez 6 (niekiedy dla 99% czasu mnoży się przez 5).

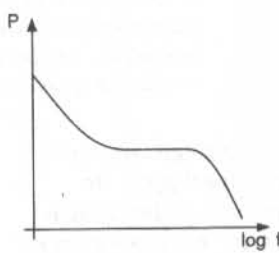
W jaki sposób można prosto opisać takie przypadkowe przebiegi?



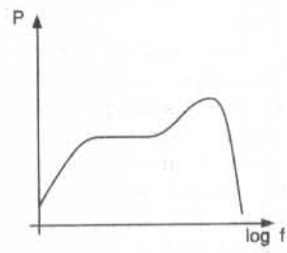
Rys. 2a.



Rys. 2b.



Rys. 2c.



Rys. 2d.

Określa się dwa podstawowe parametry:

1. średnia energia lub moc szumów,
2. średni rozkład tej mocy w funkcji częstotliwości (gęstość widmowa).

Gęstość widmowa

Mówiliśmy już, że amplitudy o określonych wielkościach pojawiają się z pewnym prawdopodobieństwem. Podobnie, dla danego przebiegu szumowego możemy mówić o prawdopodobieństwie pojawienia się składników o określonych częstotliwościach. Możemy więc określić lub zmierzyć średni rozkład poszczególnych

Koniecznienależy zrozumieć i zapamiętać, co znaczy rozkład mocy w funkcji częstotliwości. Jest to bowiem klucz do zrozumienia dalszych zagadnień.

składowych w funkcji częstotliwości. Składowe te mają znowu pewne amplitudy, a więc jakąś moc. Możemy przedstawić na wykresie uśredniony w czasie rozkład mocy w funkcji częstotliwości. Przykładowe gęstości mocy w funkcji częstotliwości przedstawiono na rysunkach 2a...2d - zarówno częstotliwość, jak i moc podano tam w mierze logarytmicznej. Szczególnym przypadkiem (jak się okaże - bardzo powszechnie występującym w praktyce) jest szum mający równomierny rozkład mocy w funkcji częstotliwości - patrz rysunek 2a. Nazywany jest on szumem białym.

Szum biały

Koniecznienależy zrozumieć i zapamiętać, co znaczy rozkład mocy w funkcji częstotliwości. Jest to bowiem klucz do zrozumienia dalszych zagadnień. Przedstawmy to na przykładzie.

Załóżmy, że mamy filtry pasmowe (lub jeden filtr przestrajany - co jest bliższe praktyki) o różnych częstotliwościach i jednakowym pasmie przenoszenia, powiedzmy 1Hz. Oczywiście, dobroć każdego takiego filtru będzie inna. Czym większa częstotliwość środkowa filtru przy tym samym pasmie przepustowym, tym większa dobroć - patrz też rysunek 3.

Jeśli teraz wykorzystamy nasze filtry do wyłowienia z szumu białego skła-

dowych o określonych częstotliwościach, to mierząc napięcie lub moc składowych szumu białego na wyjściu dowolnych filtrów (zawsze w pasmie 1Hz), na przykład 3Hz, 1354Hz, 184,5kHz czy 12,548GHz, otrzymamy jednakowe napięcia lub moce.

Podobnie, gdybyśmy użyli filtrów o szerszym (ale jednakowym) pasmie przepustowym, wyniki pomiarów w obszarze całego pasma częstotliwości będą jednakowe.

Dla unaocznienia weźmy jako następny przykład odbiornik radiokomunikacyjny pozwalający odbierać sygnały w zakresie 100kHz...144MHz -

pasmo przenoszenia częstotliwości akustycznych takiego odbiornika jest stałe, określone przez filtry kwarcowe p. cz. i wynosi, powiedzmy, od 300 do 2400Hz, czyli 2100Hz. Otrzymujemy więc w sumie przestrajany miernik selektywny o pasmie pomiarowym od 2100Hz (SSB) do ok. 5kHz (AM i FM). Jeśli użylibyśmy takiego odbiornika jako selektywnego miernika do pomiaru szumu białego, to znowu przeciętna amplituda szumu dla dowolnego zakresu mierzonych częstotliwości byłaby stała (w

tym wypadku nie chodzi jednak o szum z głośnika odbiornika po detekcji AM, FM czy SSB, lecz o wskazanie S-metru).

Szumy, nie mające takiego równomiernego rozkładu mocy w funkcji częstotliwości, w których energia skupiona jest w określonej części widma, nazywamy szumami kolorowymi - rysunki 2b, c, d pokazują przykładowe charakterystyki szumów kolorowych.

Szczególnym i ważnym w praktyce rodzajem szumu kolorowego jest szum różowy.

Szum różowy

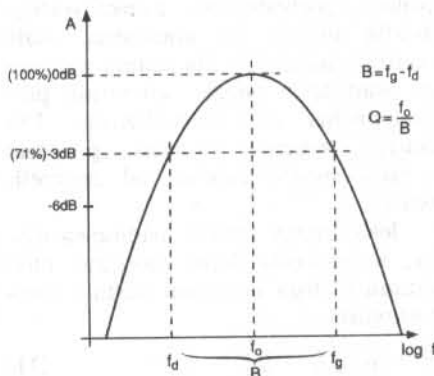
Jak mówi sucha definicja, gęstość widmowa energii szumu różowego jest odwrotnie proporcjonalna do częstotliwości (rys. 2b). Inne określenie głosi, że szum różowy ma stałą ilość energii w każdej dekadzie (lub oktawie) pasma częstotliwości. Ponieważ niezbyt wiele to nam mówi, znowu posłużymy się przykładem, przedstawiając problem jak najprościej, wręcz „łopatologicznie“.

Przed wszystkim dekada oznacza tu zakres częstotliwości od dowolnej częstotliwości f do 10f, oktawa - od f do 2f.

Powiedzmy, że mamy zestaw wielu filtrów pasmowych o różnych częstotliwościach środkowych i, co ważne, o jednakowej dobroci. Dobroć filtru środkowo-przepustowego określa się jako stosunek częstotliwości środkowej i 3-decybelowej szerokości pasma:

$$Q = \frac{f_0}{B}$$

Pokazuje to rysunek 3. Tym razem wraz ze zmianą częstotliwości środkowej zmienia się też szerokość pasma przepustowego - są to więc filtry całkiem inne, niż omawiane przy szumie białym. Teraz pasmo przenoszenia filtru rośnie ze wzrostem częstotliwości środkowej. Przykładowo, mamy dwa filtry o dobroci 2: pierwszy - o częstotliwości środkowej 100Hz ma pasmo przenoszenia 50Hz, drugi - o częstotli-



Rys. 3.

wości środkowej 50kHz ma pasmo 25kHz.

Jeśli takich filtrów użyjemy do pomiarów szumu różowego, to na wyjściu każdego z nich skuteczna wartość amplitudy będzie jednako-
kowa. Jak widać na rysunku 2b, charakterystyka widmowa szumu różowego opada

Dla szumu białego wartość mocy przypadająca na dowolne pasmo jednostkowe jest stała, więc całkowita moc jest wprost proporcjonalna do pasma częstotliwości.

ze wzrostem częstotliwości. Spadek ten jest jednostajny, więc w sumie zmniejszenie energii i zwiększenie pasma pomiarowego wzajemnie się kompensują, dając zawsze jednakową moc (a także wartość skuteczną napięcia) na oktawę (dekadę) pasma częstotliwości.

Jakie wyniki osiągniemy mierząc takimi filtrami szum biały?

Oczywiście, czym większa częstotliwość, tym większa amplituda na wyjściu filtru.

Odwrotnie, jeśli zmierzmy szum różowy przestrajającym filtrem o stałym pasmie (w praktyce - selektywnym miernikiem poziomu lub analizatorem widła), to wraz ze wzrostem częstotliwości amplituda będzie jednostajnie spadać. Właśnie tak powstają charakterystyki pokazane na rysunku 2.

Szum różowy ma więc widmową gęstość energii, odwrotnie proporcjonalną do częstotliwości. Matematycznie funkcję odwrotną zapisujemy w postaci $y=1/x$. Wykresem tej funkcji we współrzędnych logarytmicznych będzie linia prosta nachylona do osi x - taka, jak na rysunku 2b, dlatego szumy różowe nazywa się często szumami 1/f.

Podsumujmy zatem nasze rozważania o kolorach: nazwy „szum biały“, „szum różowy“, „szum 1/f“ określają charakter widma szumu, nie mają natomiast związku z mechanizmami powstawania i źródłami szumów.

Średnia moc szumów

Czujemy intuicyjnie, że średnia moc jest parametrem trafnie charakteryzującym przebieg szumowy. Jednocześnie z tego, co już wiemy wynika, iż wartość tej mocy jest związana z interesującym nas pasmem częstotliwości. Dla szumu białego wartość mocy przypadająca na dowolne pasmo jednostkowe jest stała, więc całkowi-

ta moc jest wprost proporcjonalna do pasma częstotliwości. To proste, wręcz oczywiste stwierdzenie ma ogromne znaczenie praktyczne. W układach au-

dio słychać to wyraźnie - czy nie mieliśmy niekiedy wrażenia, że proste stare radio czy przenośny magnetofon szumi mniej niż zestaw lepszej klasy? Powodem jest tu głównie różna szerokość pasma przenoszenia całego urządzenia, przede wszystkim głośnika.

Z tego powodu, jeśli sygnał audio nie zawiera najwyższych składowych, to ze względu na szumy jest celowe i korzystne zmniejszenie pasma przenoszenia (nie dotyczy to oczywiście sprzętu najwyższej klasy, z pasmem przenoszenia wiąże się bowiem zdolność przenoszenia przebiegów impulsowych, a także pewne odczucia subiektywne).

Okazuje się, że dla wielu przebiegów szumowych właśnie moc jest podstawowym, niejako naturalnym parametrem - okaże się to jasno w dalszej części artykułu przy opisie szumu termicznego.

My jednak przyzwyczajeni jesteśmy do posługiwania się raczej napięciami i prądami niż mocą. I tu powolutku zmierzamy do słynnego pierwiastka z herca, który wielu elektronikom odebrał chęć zajmowania się tematem szumów.

Jeśli mówiliśmy, że szum biały ma stały rozkład mocy w pasmie, to możemy mówić o widmowej gęstości mocy, czyli mocy (w watach lub mikrowatach) przypadającej na pasmo o szerokości jednego herca. Wprowadzamy więc pojęcie jednostkowej gęstości mocy szumów p . Dla szumu białego pochodzącego z rzeczywistego źródła będzie to konkretna, stała wartość, natomiast dla szumu różowego wartość p będzie odwrotnie proporcjonalna do częstotliwości. Dla innych szumów wartość p będzie w jakiś sposób zależna od częstotliwości.

Jeśli znamy gęstość widmową mocy, to możemy łatwo obliczyć moc szumu białego w danym pasmie częstotliwości:

$$P = p \cdot (f_g - f_d) = p \cdot B \quad (1)$$

gdzie f_g i f_d to górna i dolna czę-

stotliwość graniczna interesującego nas pasma częstotliwości,

$$B = \Delta f = f_g - f_d$$

W tym miejscu niektórym Czytelnikom nasunie się pytanie, po co wprowadzać dość złożone pojęcie widmowej gęstości mocy (czyli mocy jednostkowej przypadającej na jednostkowe pasmo częstotliwości); czy tego samego nie można wyrazić i obliczyć inaczej?

Jak powiedzieliśmy, w praktyce częściej posługujemy się napięciami i prądami, poza tym w wielu obliczeniach przejście na wartości napięcia czy prądu jest wręcz konieczne. Analogicznie jak dla mocy, wprowadzimy pojęcia widmowej gęstości napięcia i prądu szumów. W ten sposób będziemy mogli łatwo obliczyć napięcie szumów, a dokładniej napięcie tych składowych szumu białego, które występują w pasmie akustycznym, bo tylko te, słyszalne składowe są dla nas istotne.

I tu mamy odpowiedź na postawione pytanie: w praktyce, w katalogach znajdziemy właśnie wykresy przedstawiające przebieg widmowej gęstości napięcia i prądu szumów. Żeby więc umieć świadomie korzystać z tych wykresów, konieczne trzeba dobrze zrozumieć omawiane pojęcia.

Teraz skorzystamy ze starych, prostych wzorów:

$$P = \frac{U^2}{R} \text{ oraz } P = I^2 \cdot R$$

Wolno nam to zrobić, bo w rzeczywistych układach moc wydziela się zawsze na oporności (powiedzmy, że na rezystancji R).

Wzór (1) zapiszemy więc:

$$\frac{U^2}{R} = \frac{u^2}{R} \cdot B \quad (2)$$

$$I^2 \cdot R = i^2 \cdot R \cdot B \quad (3)$$

Ponieważ R z obu stron równania to ta sama rezystancja pracy, eliminujemy ją przez odpowiednio pomnożenie lub podzielenie obu stron przez R . Otrzymujemy:

$$U^2 = u^2 \cdot B \quad (4)$$

$$I^2 = i^2 \cdot B \quad (5)$$

$$\text{Stąd: } U = u \cdot \sqrt{B} \quad (6)$$

$$I = i \cdot \sqrt{B} \quad (7)$$

W tych wzorach p , u , i oznaczają jednostkową gęstość widmową odpowiednio mocy, napięcia i prądu szumów. Sens fizyczny p - mocy przypadającej na jednostkowe pasmo (1Hz) jest oczywisty. Gorzej z napięciem i prądem. Ze wzorów (4)...(6) wynika mianowicie, iż wymiarem u musi być właśnie $V/\sqrt{\text{Hz}}$, natomiast wymiarem i jest

A/√Hz. Cała trudność wzięła się stąd, że, jak mówiliśmy, „naturalnym“ parametrem szumów jest moc, a ta jest proporcjonalna do kwadratu napięcia lub prądu - jeśli od mocy przechodzimy do napięcia czy prądu, pojawia się pierwiastek.

I choć rzeczywiście trudno sobie wyobrazić pierwiastek z herca, nie bójmy się tego - w praktycznych obliczeniach trzeba tylko do wzorów (5) i (6) podstawić \sqrt{B} , czyli pierwiastek z wartości interesującego pasma częstotliwości. Do tego wątku jeszcze kilkakrotnie wrócimy.

Dodawanie szumów

Szumy z różnych źródeł dodają się do siebie, tworząc szum całkowity. Jak obliczyć wielkość szumu całkowitego, znając wielkości szumów składowych?

Znowu wracamy do „naturalnego“ parametru - mocy: po prostu należy dodać do siebie moce poszczególnych szumów składowych! Nie wolno natomiast sumować napięć. Jest to oczywiste, bo przecież napięcie we wzorze na moc występuje w drugiej potęgze. Patrząc na sprawę z innego punktu widzenia, też dojdziemy do wniosku, że nie możemy wprost dodawać napięć, bo przypadkowe przebiegi szumowe w pewnych momentach mają zgodną fazę i rzeczywiście się dodają, ale w innych fazę przeciwną i odejmują się lub nawet znoszą.

Zacznijmy więc od dodawania mocy szumów:

$$P_{\text{tot}} = P_1 + P_2 + P_3 + \dots$$

Ponieważ wszystkie dodające się szumy występują na tej samej rezystancji R, możemy napisać:

$$\frac{(U_{\text{tot}})^2}{R} = \frac{(U_1)^2}{R} + \frac{(U_2)^2}{R} + \frac{(U_3)^2}{R} + \dots \quad (8)$$

gdzie U oznacza wartości skuteczne poszczególnych szumów.

Mnożymy obie strony równania przez R:

$$(U_{\text{tot}})^2 = (U_1)^2 + (U_2)^2 + (U_3)^2 + \dots \quad (9)$$

Ponieważ są to wartości skuteczne, a więc nieujemne, wyciągamy obustronnie pierwiastek:

$$U_{\text{tot}} = \sqrt{(U_1)^2 + (U_2)^2 + (U_3)^2 + \dots} \quad (10)$$

Wiemy już jak dodawać szumy. Nie jest to tylko ciekawostka, ma bowiem duże konsekwencje praktyczne.

W praktyce, przy prawie wszystkich obliczeniach dotyczących szumów używamy napięć (niekiedy prądów), a nie mocy. W katalogach elementów półprzewodnikowych też podaje się napięcia i prądy szumów.

Spróbujmy więc teraz policzyć jaka będzie suma z dodania dwóch przebiegów szumowych, których napięcia szumów różnią się dziesięciokrotnie.

$$U_{\text{tot}} = \sqrt{U^2 + (10U)^2} = \sqrt{U^2 + 100U^2} = \sqrt{101U^2} = 10,05U$$

Cóż, wychodzi na to, że praktycznie nadal jest to ten sam szum 10U!

Policzmy więc, co będzie jeśli napięcia szumów składowych będą różnić się dwu- i trzykrotnie:

$$U_{1\text{tot}} = \sqrt{U^2 + (2U)^2} = \sqrt{U^2 + 4U^2} = \sqrt{5U^2} = 2,23U$$

lub

$$U_{2\text{tot}} = \sqrt{U^2 + (3U)^2} = \sqrt{U^2 + 9U^2} = \sqrt{10U^2} = 3,16U$$

Ponieważ ucho ludzkie ma logarytmiczną charakterystykę czułości, więc zwiększenie szumów o kilka procent (jeden decybel), w praktyce nie będzie zauważone.

Doszliliśmy więc do ważnego wniosku praktycznego: jeśli obliczamy całkowite napięcie szumów, to z uwagi na niewielki wpływ możemy pomijać składowe o napięciach mniejszych niż jedna trzecia największego napięcia składowego.

Piotr Górecki

Cd. w następnym numerze EP.

Komunikat AVT

Do Prenumeratorów i Wszystkich Czytelników Elektroniki Praktycznej i Elektora Elektronika

Prenumeratorom pism wydawanych przez AVT składamy serdeczne podziękowanie za współpracę w opracowaniu pierwszego wydania Panelu, czyli Panoramy Elektroniki w Polsce. Wszystkim Prenumeratorom EP i EE wystaliśmy egzemplarze gratisowe tego biuletynu, mogliście więc Państwo ocenić to nasze wspólne dzieło. Sądzymy, że zrobiliśmy razem rzecz całkiem pożyteczną dla środowiska elektroników, choć na razie jest to informator daleki od kompletności (zawiera dane ok. 1000 firm).

Kolejne wydania Panelu będą się pojawiały co kilka miesięcy i mamy nadzieję, że będą coraz grubsze, a publikowane w nich informacje będą coraz bardziej kompletne i aktualne. Ciągłe potrzebujemy Waszej pomocy w akwizycji zgłoszeń i reklam do Panelu. Prosimy Prenumeratorów EP i EE oraz wszystkich Czytelników naszych pism o informowanie zaprzyjaźnionych firm elektronicznych - dużych, średnich i całkiem małych, produkcyjnych, usługowych i handlowych, nawet sklepów - iż zgłoszenie do Panelu jest bezpłatną i niezwykle skuteczną promocją ich działalności. Mamy sygnały od różnych firm, iż dzięki umieszczeniu ich danych w Panelu uzyskały znaczny wzrost zamówień.

Zwracamy również uwagę na ofertę sprzedaży Panelu na dyskietce w formacie dBase 4, bardzo dogodnym do drukowania naklejek adresowych. Cena wynosi 900.000 zł (500.000 zł dla firm zamawiających płatną reklamę w Panelu).

AVT