

_HARDWARE DESIGN

MASTERCLASSES #5

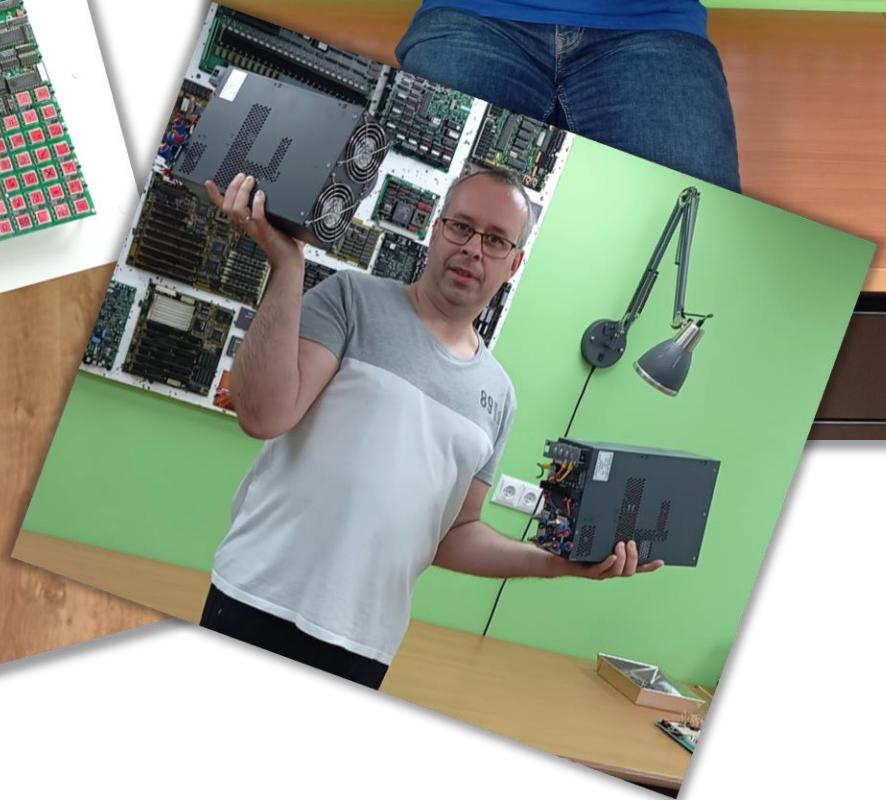
WROCŁAW, 27-28 LISTOPAD 2025



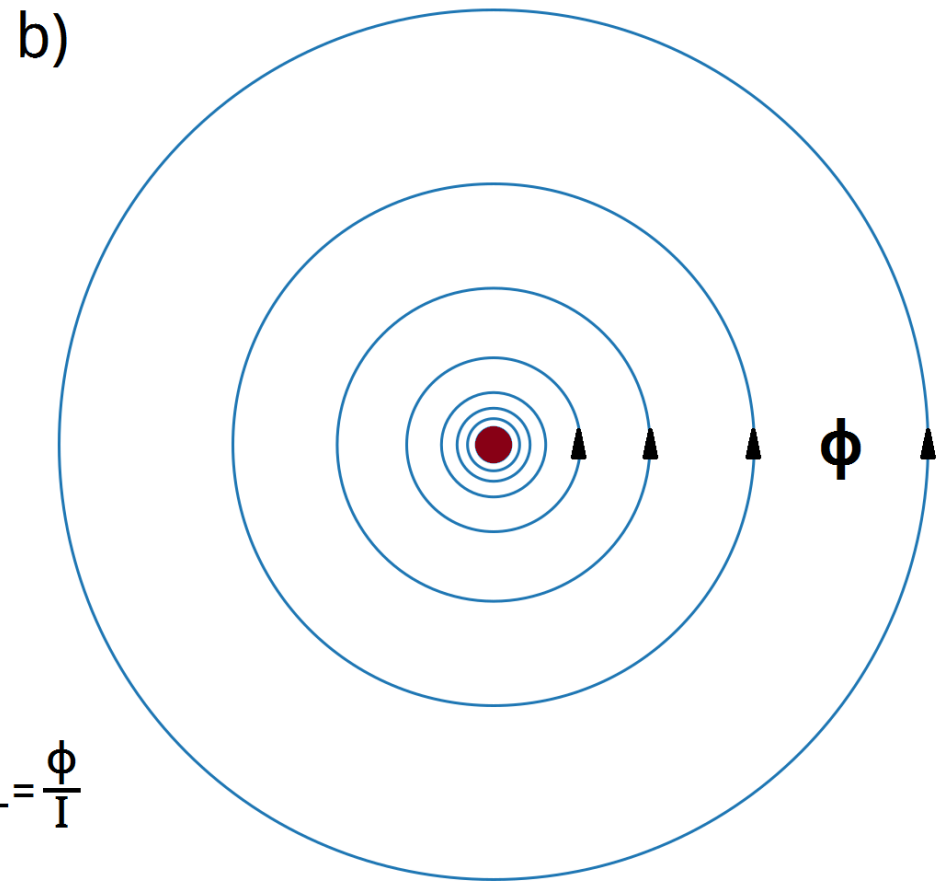
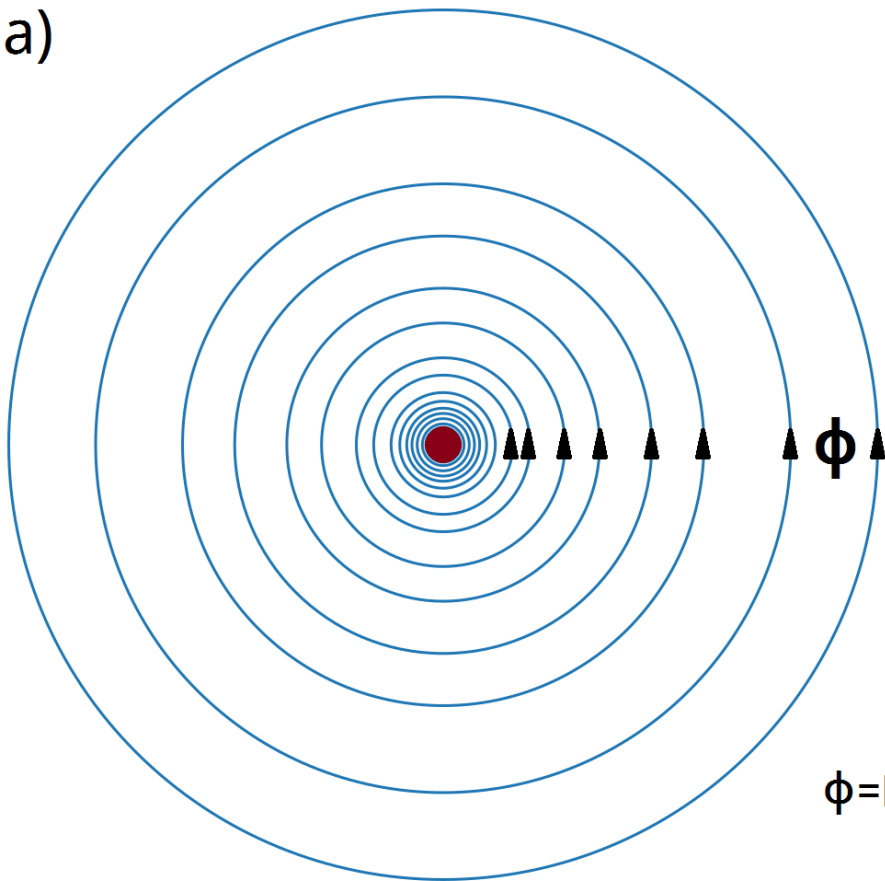
Rafał Wiśniewski
Konstruktor Elektronik

Temat wystąpienia:

*Jak skutecznie zapewnić energię szybkim układom
cyfrowym w czasie przełączania, czyli co nieco o
odsprężaniu zasilania.*

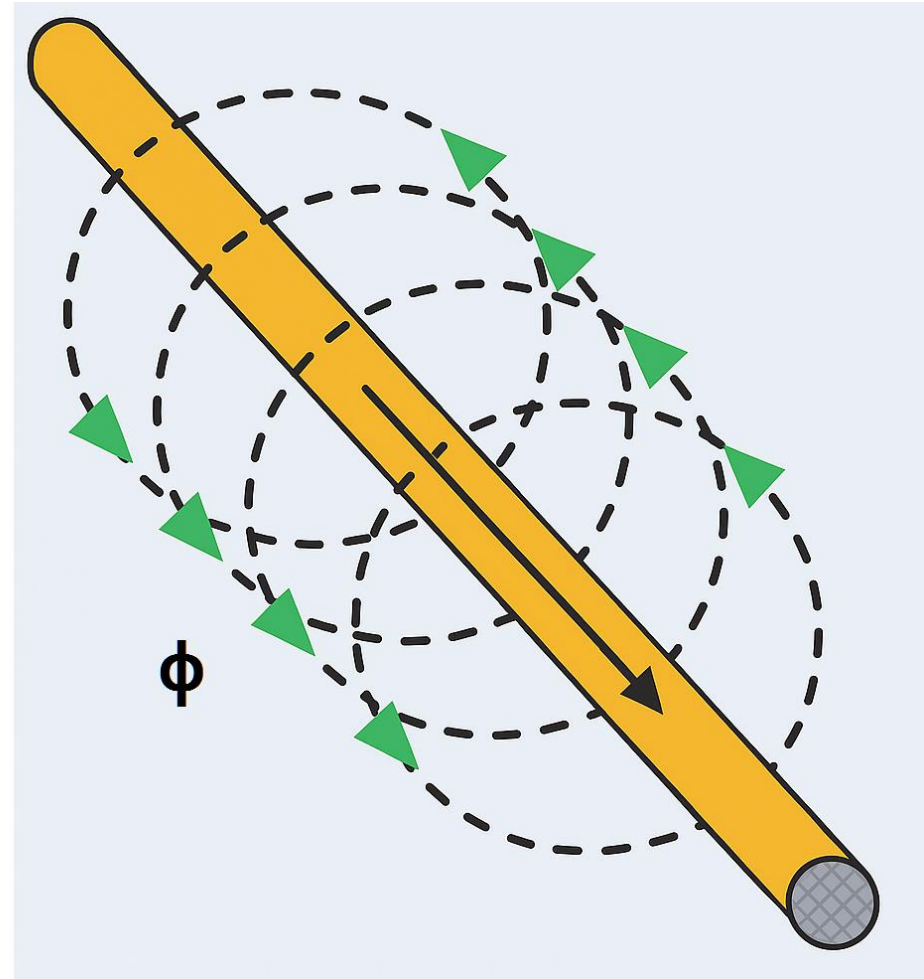
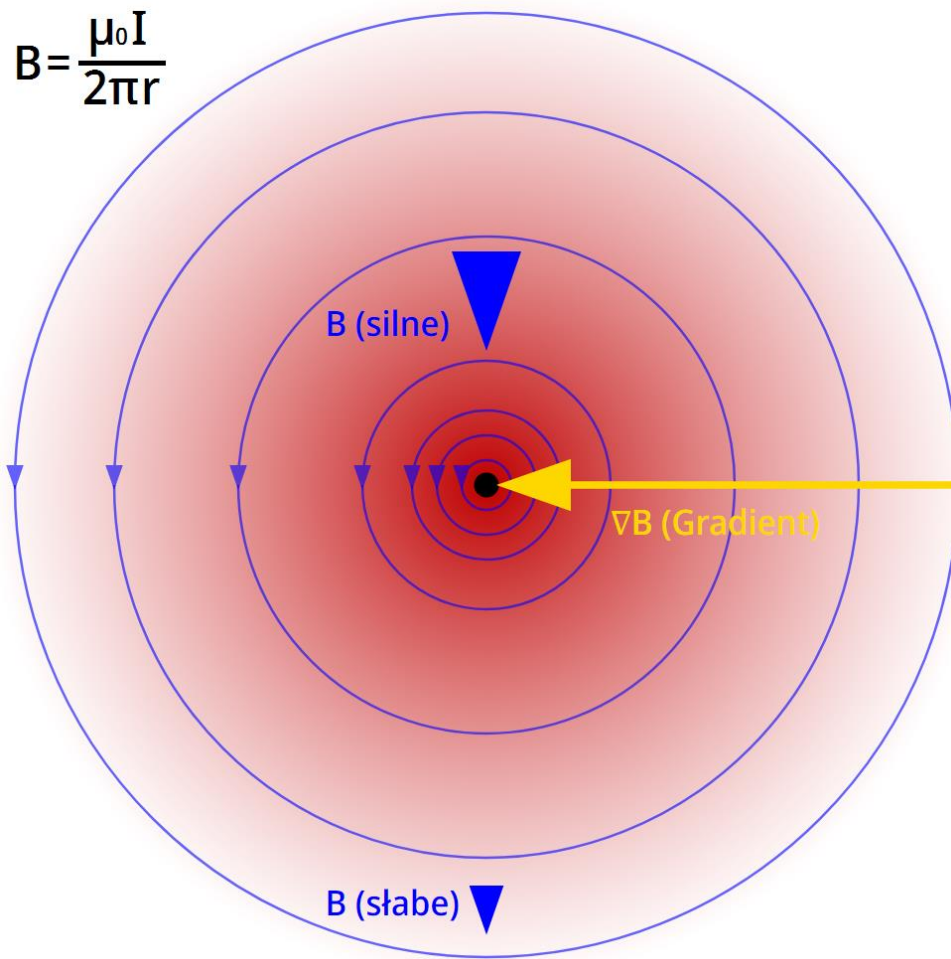


Strumień magnetyczny towarzyszący przewodnikowi z prądem

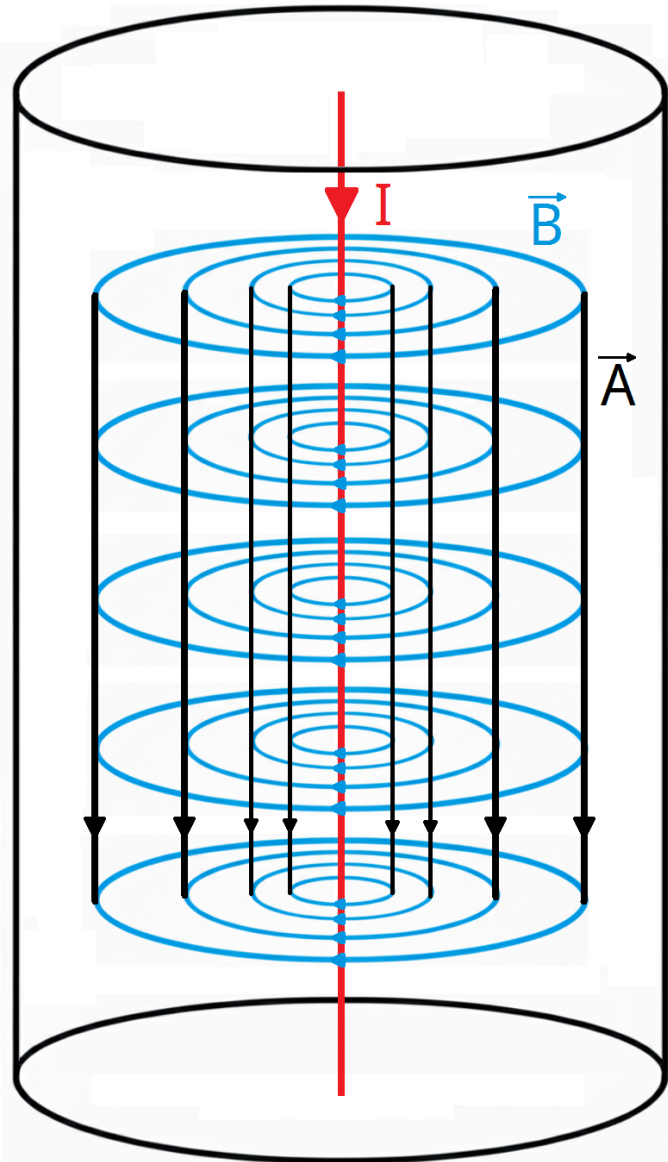


$$\Phi = LI \quad L = \frac{\Phi}{I}$$

Wektor indukcji magnetycznej dla prostoliniijnego przewodnika



Wizualizacja 3D przewodnika z prądem



Kierunek prądu: Prąd I płynie z góry na dół.

Kierunek pola $\vec{B}$ (niebieskie okręgi): Zwrot okręgów jest zgodny z regułą prawej dłoni.

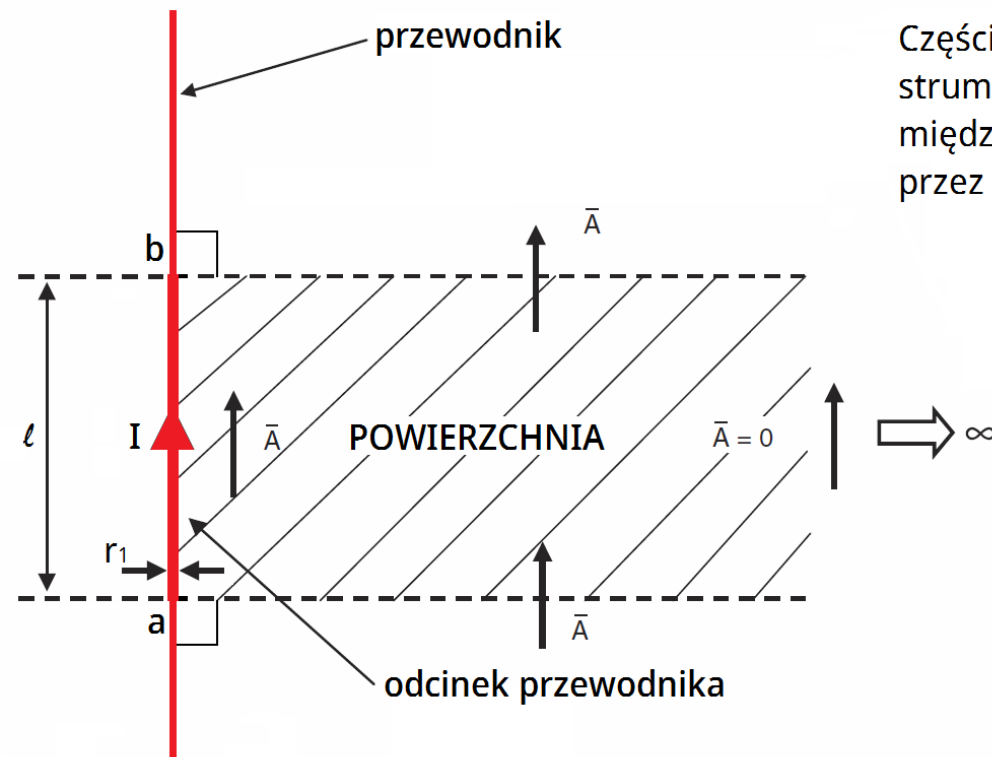
Kierunek potencjału magnetycznego $\vec{A}$ (czarne strzałki): Wektory potencjału $\vec{A}$ są skierowane w dół, równoległe do przewodnika z prądem.

Relacja $\vec{B}$ i $\vec{A}$: Linie pola magnetycznego $\vec{B}$ (okręgi) owijają się wokół wektorów potencjału magnetycznego $\vec{A}$ (pionowe linie), co jest zgodne z definicją $\vec{B} = \nabla \times \vec{A}$ (indukcja jest wirowością potencjału).

Wartość indukcji magnetycznej $\vec{B}$: wartość maleje wraz z odległością od przewodnika (im dalej od centrum, tym mniejsza wartość).

Wartość potencjału magnetycznego $\vec{A}$: wartość ta również maleje wraz z odległością od przewodnika (im dalej od centrum, tym mniejsza wartość).

Częściowa indukcyjność własna

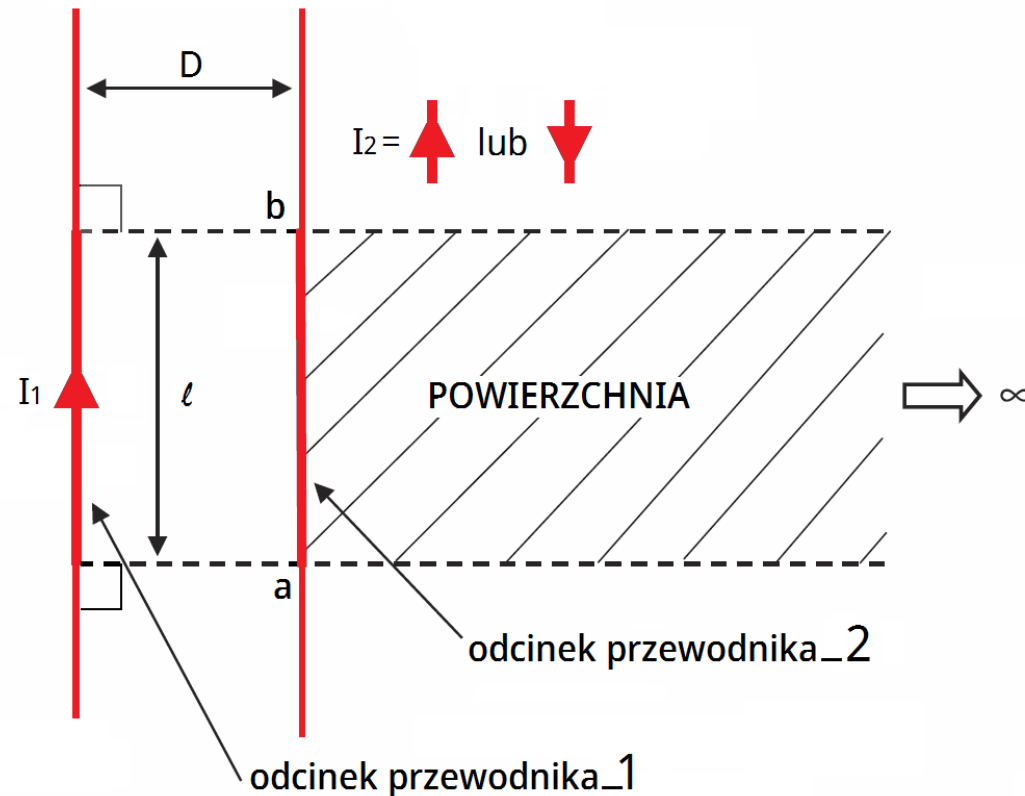


Częściowa indukcyjność własna odcinka przewodnika to strumień magnetyczny Φ przenikający przez pole powierzchni między odcinkiem przewodnika a nieskończonością, podzielony przez natężenie prądu płynącego w tym odcinku.

$$L_P = \frac{\Phi_P}{I} = \frac{\mu_0 \ell}{2\pi} \left[\ln \frac{2\ell}{r_1} - 1 \right]$$

$\vec{A}$ - wektorowy potencjał magnetyczny
 L_P - częściowa indukcyjność własna
 μ_0 - przenikalność magnetyczna próżni
 ℓ - długość przewodnika
 r_1 - promień przewodnika
 I - prąd płynący przez przewodnik

Częściowa indukcyjność wzajemna



Częściowa indukcyjność wzajemna między dwoma odcinkami przewodników to stosunek strumienia magnetycznego Φ przenikającego przez powierzchnię między drugim odcinkiem przewodnika, a nieskończonością, podzielony przez natężenie prądu I_1 płynącym w pierwszym odcinku przewodnika.

Dla warunku, gdy $D \ll \ell$ wyniesie:

$$L_{M12} = \frac{\Phi_{12}}{I_1} = \frac{\mu_0 \ell}{2\pi} \left[\ln \frac{2\ell}{D} - 1 \right]$$

L_{M12} - częściowa indukcyjność wzajemna

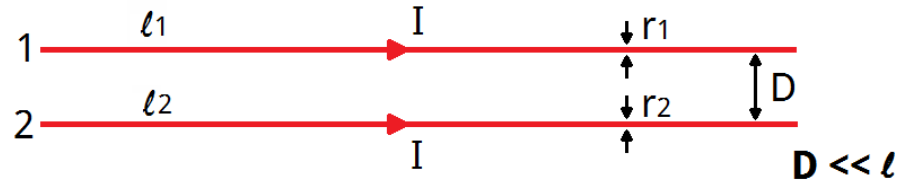
μ_0 - przenikalność magnetyczna próżni

I_1 - prąd płynący przez przewodnik_1

ℓ - długość przewodnika, przez który płynie prąd I_1

D - odległość między przewodnikami

Częściowa indukcyjność segmentu dla prądu płynącego w tym samym kierunku



Wzór dla różnych indukcyjności składowych:

$$L_S = \frac{L_{P1}L_{P2} - L_M^2}{L_{P1} + L_{P2} - 2L_M}$$

Wzór dla identycznych indukcyjności składowych:

$$L_S = \frac{L_P + L_M}{2} = \frac{\frac{\mu_0 \ell}{2\pi} \left[\ln \frac{2\ell}{r} + \ln \frac{2\ell}{D} - 2 \right]}{2}$$

L_S - częściowa indukcyjność segmentu

L_{P1}, L_{P2} - indukcyjności własne przewodników

L_M - indukcyjność wzajemna

μ_0 - przenikalność magnetyczna próżni

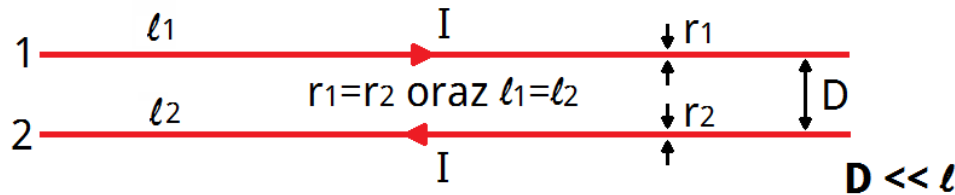
I - prąd płynący przez przewodniki

ℓ_1, ℓ_2 - długości przewodników, przez które płynie prąd I

r_1, r_2 - promienie przewodników

D - odległość między przewodnikami

Częściowa indukcyjność segmentu dla prądu płynącego w przeciwnych kierunkach



$$L_S = (L_{P11} - L_{M21}) + (L_{P22} - L_{M12})$$

$$L_{P11} = L_{P22} \text{ oraz } L_{M12} = L_{M21}$$

$$L_S = 2(L_{P11} - L_{M12}) = \frac{\mu_0 \ell}{\pi} \left[\ln \frac{2\ell}{r} - 1 - \ln \frac{2\ell}{D} + 1 \right] = \left(\frac{\mu_0 \ell}{\pi} \right) \ln \frac{D}{r}$$

L_S - częściowa indukcyjność segmentu

L_{PXX} - indukcyjności własne przewodników

L_{MXX} - indukcyjności wzajemne

μ_0 - przenikalność magnetyczna próżni

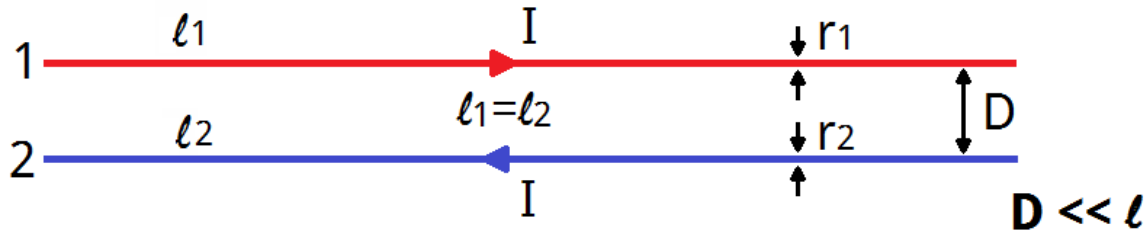
I - prąd płynący przez przewodniki

ℓ_1, ℓ_2 - długości przewodników, przez które płynie prąd I

r_1, r_2 - promienie przewodników

D - odległość między przewodnikami

Częściowa indukcyjność segmentu dla wybranego przewodnika



$$L_S = (L_{P22} - L_{M12}) = \frac{\mu_0 \ell}{2\pi} \left[\ln \frac{2\ell}{r_2} - \ln \frac{2\ell}{D} \right]$$

L_S - częściowa indukcyjność segmentu

L_{P22} - indukcyjność własna przewodnika_2

L_{M12} - indukcyjność wzajemna przewodników 1 i 2

μ_0 - przenikalność magnetyczna próżni

I - prąd płynący przez przewodniki

ℓ_1, ℓ_2 - długości przewodników, przez które płynie prąd I

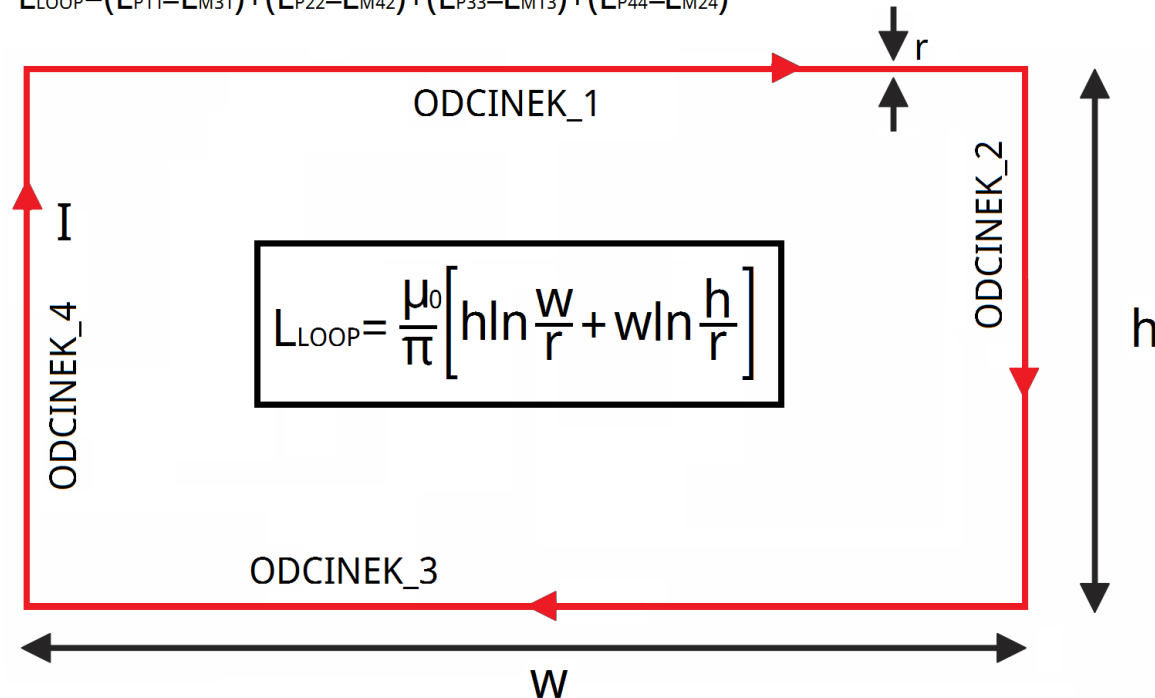
r_1, r_2 - promienie przewodników

D - odległość między przewodnikami

Indukcyjność pętli prostokątnej

Jeśli pętla składa się z wielu odcinków, a częściowe indukcyjności - zarówno własne, jak i wzajemne każdego z odcinków zostaną zsumowane, wynikiem będzie indukcyjność pętli.

$$L_{\text{LOOP}} = (L_{P11} - L_{M31}) + (L_{P22} - L_{M42}) + (L_{P33} - L_{M13}) + (L_{P44} - L_{M24})$$



L_{LOOP} - indukcyjność pętli

L_{PXX} - indukcyjności własne przewodników

L_{MXX} - indukcyjności wzajemne

I - prąd płynący przez przewodniki

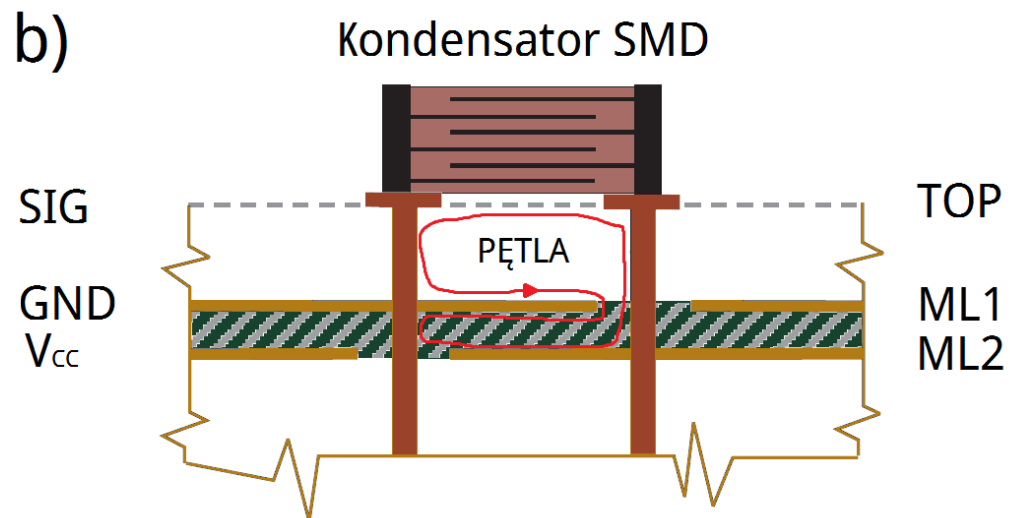
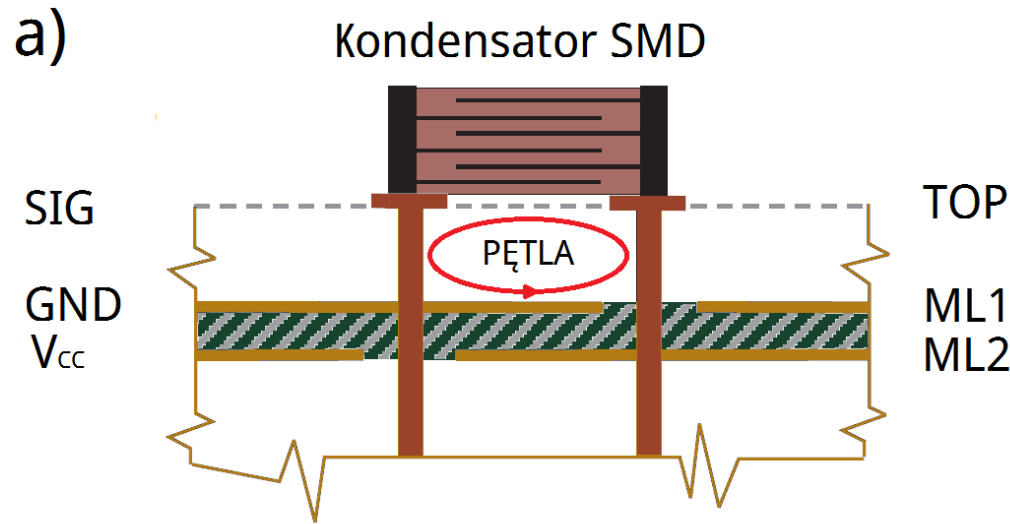
r - promień przewodnika

w - szerokość prostokąta tworzącego pętlę

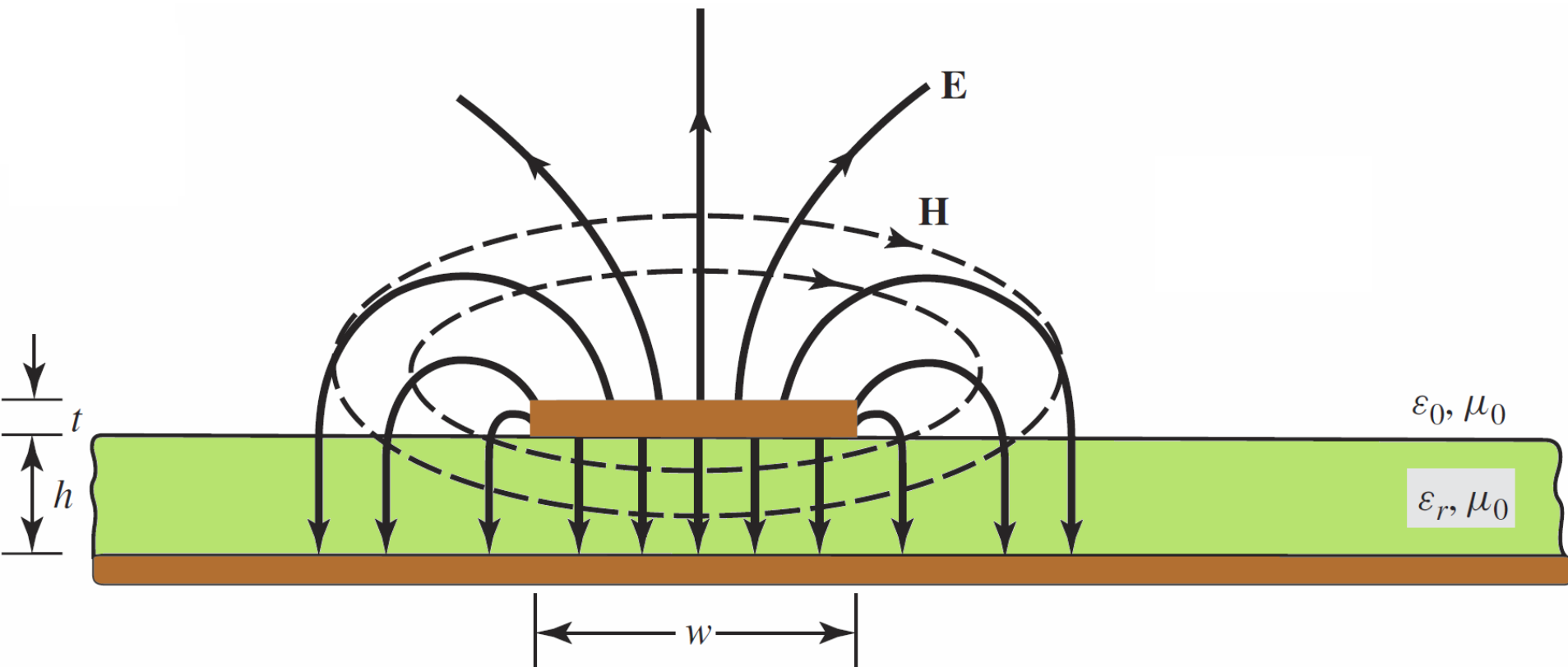
h - wysokość prostokąta tworzącego pętlę

μ_0 - przenikalność magnetyczna próżni

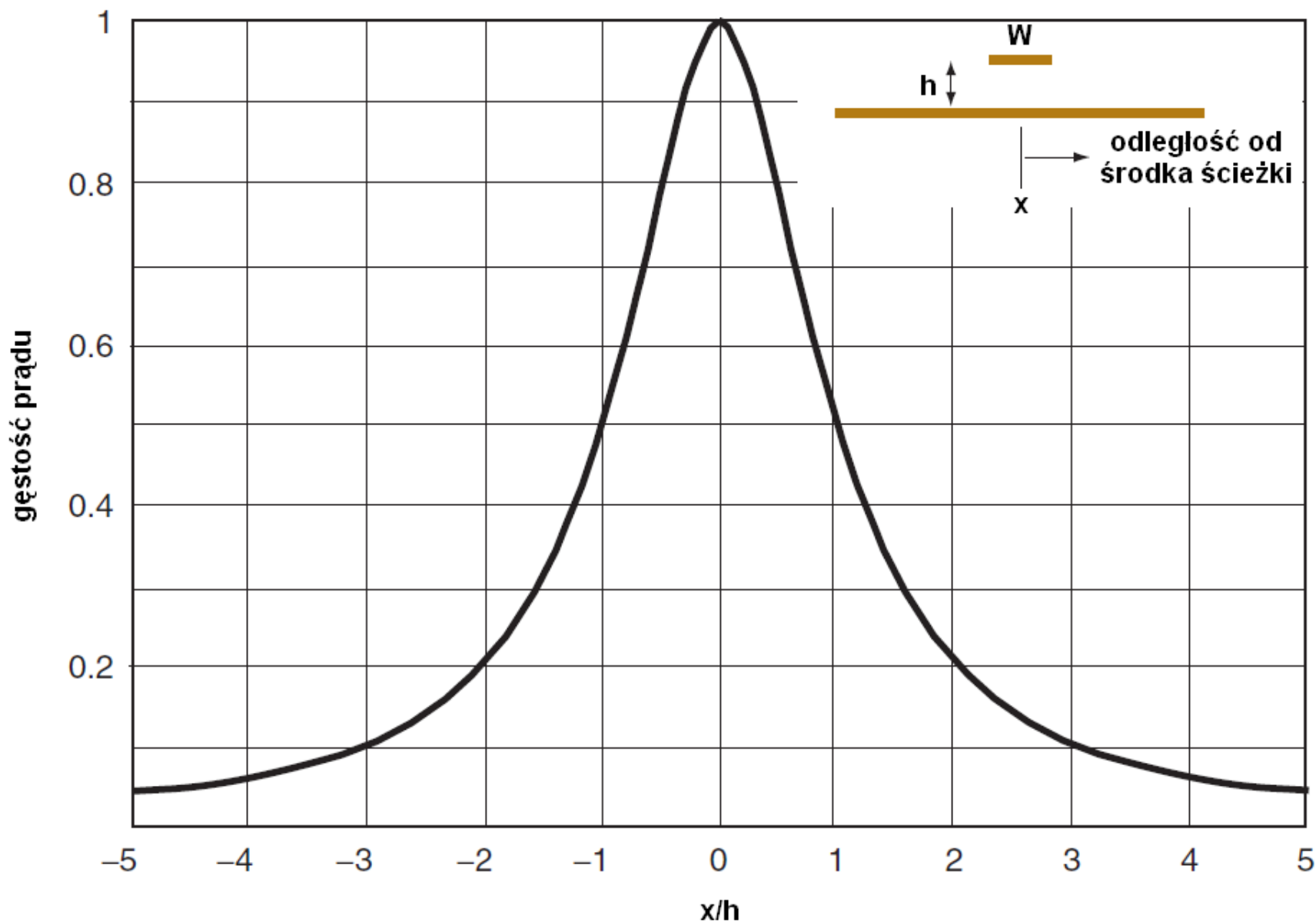
Realne pętle indukcyjne mają bardziej skomplikowane kształty...



Rozkład pola elektromagnetycznego dla ścieżki mikropaskowej



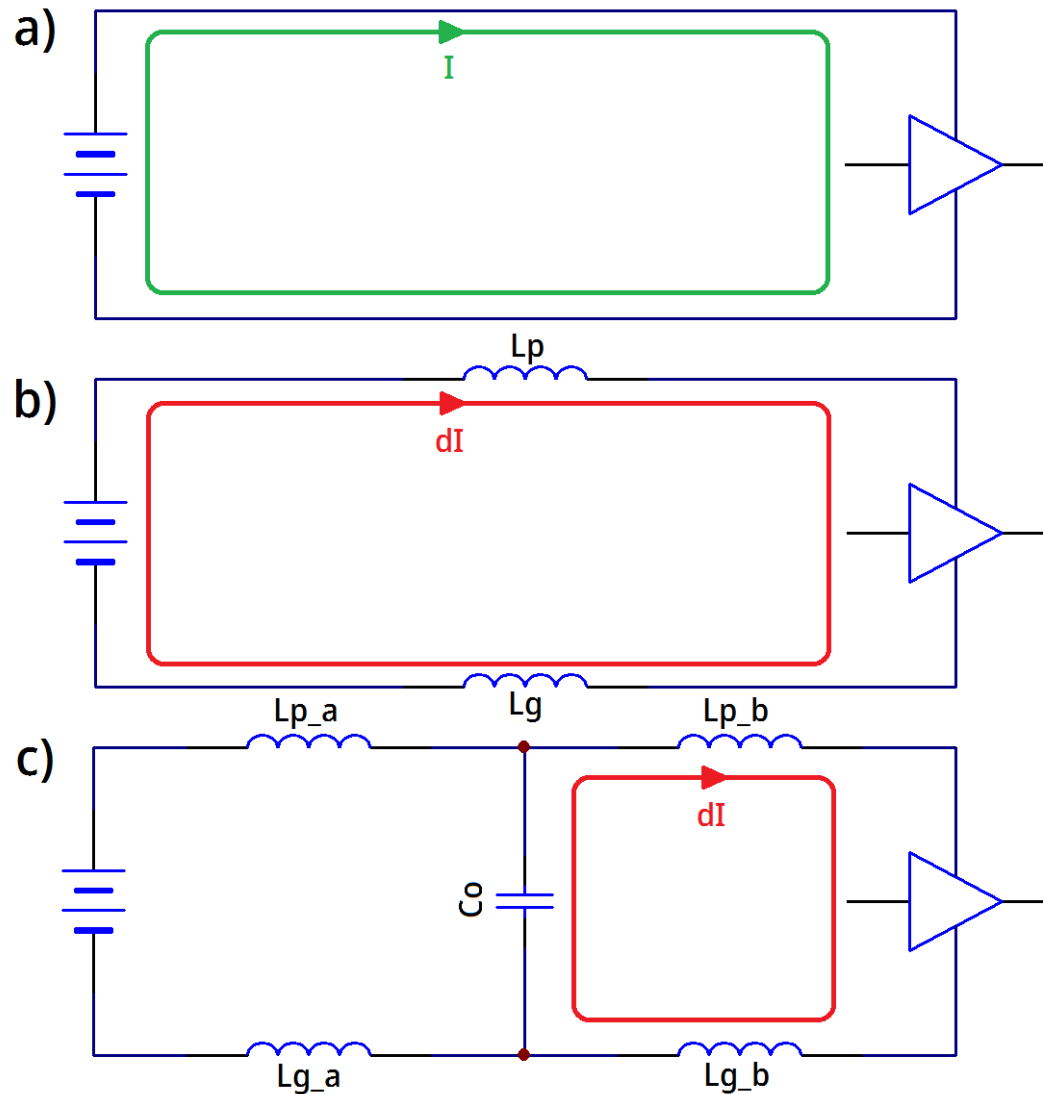
Gęstość prądu dla ścieżki mikropaskowej



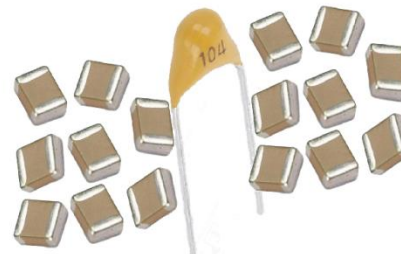
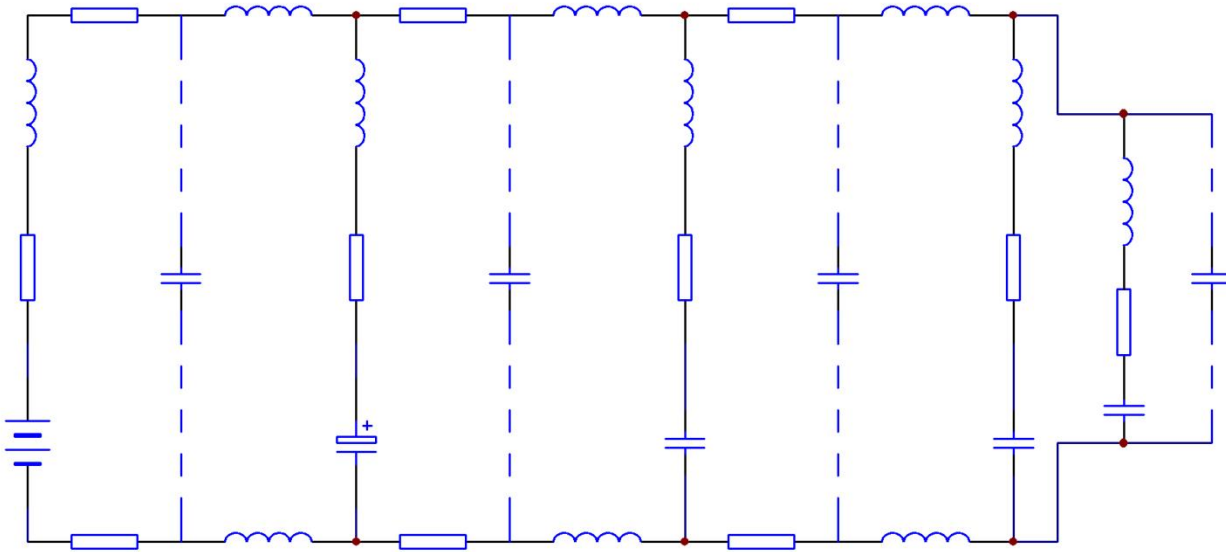
Indukcyjność danego segmentu może być zróżnicowana, gdy zmienia się efektywna powierzchnia przez którą płynie prąd



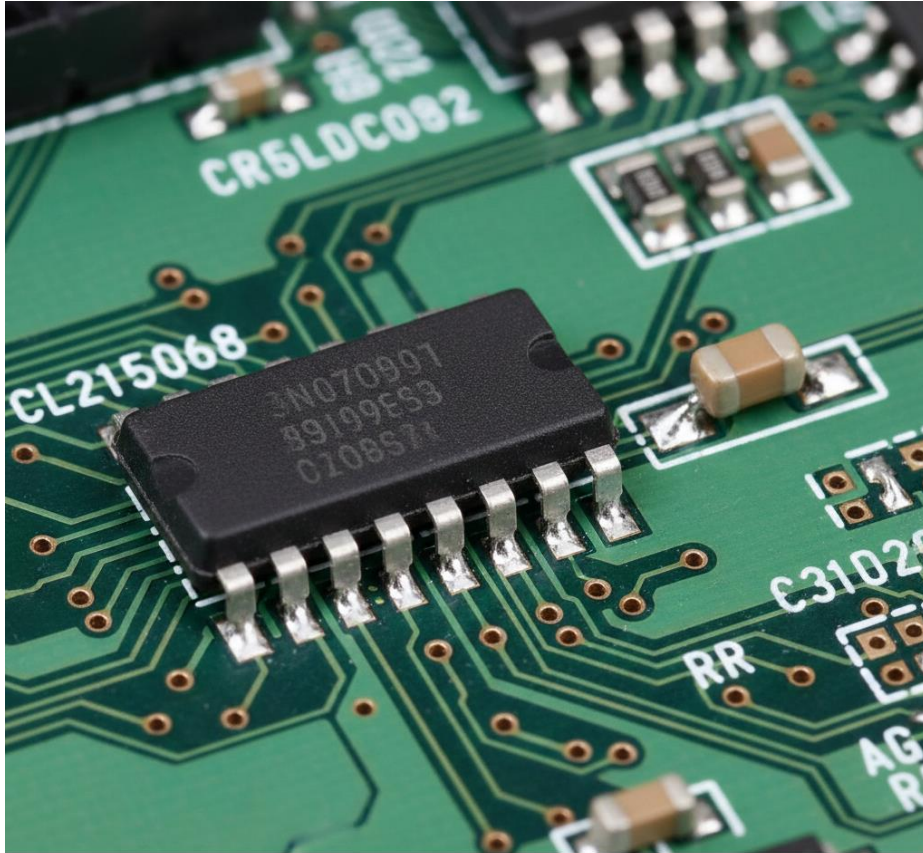
Dystrybucja energii ze źródła do komponentu cyfrowego



System dystrybucji energii – sieć PDN



Szacowanie pojemności kondensatora odsprzęgającego



Czas narastania t_r danego zbocza to szybkość z jaką zmienia się napięcie na jego wyjściu. Większość obciążeń ma charakter pojemnościowy. W związku z czym można powiązać prąd docierający do obciążenia z szybkością zmian napięcia przy zmianie stanu logicznego.

$$I = C \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

Przykładowo, pojemność obciążenia wynosi **50pF**, czas narastania t_r przebiegu wyjściowego to **3ns**, a zmiana napięcia to **5V**. Przy tych parametrach prąd, który przeładuje pojemność pasożytniczą wynosi **83mA**.

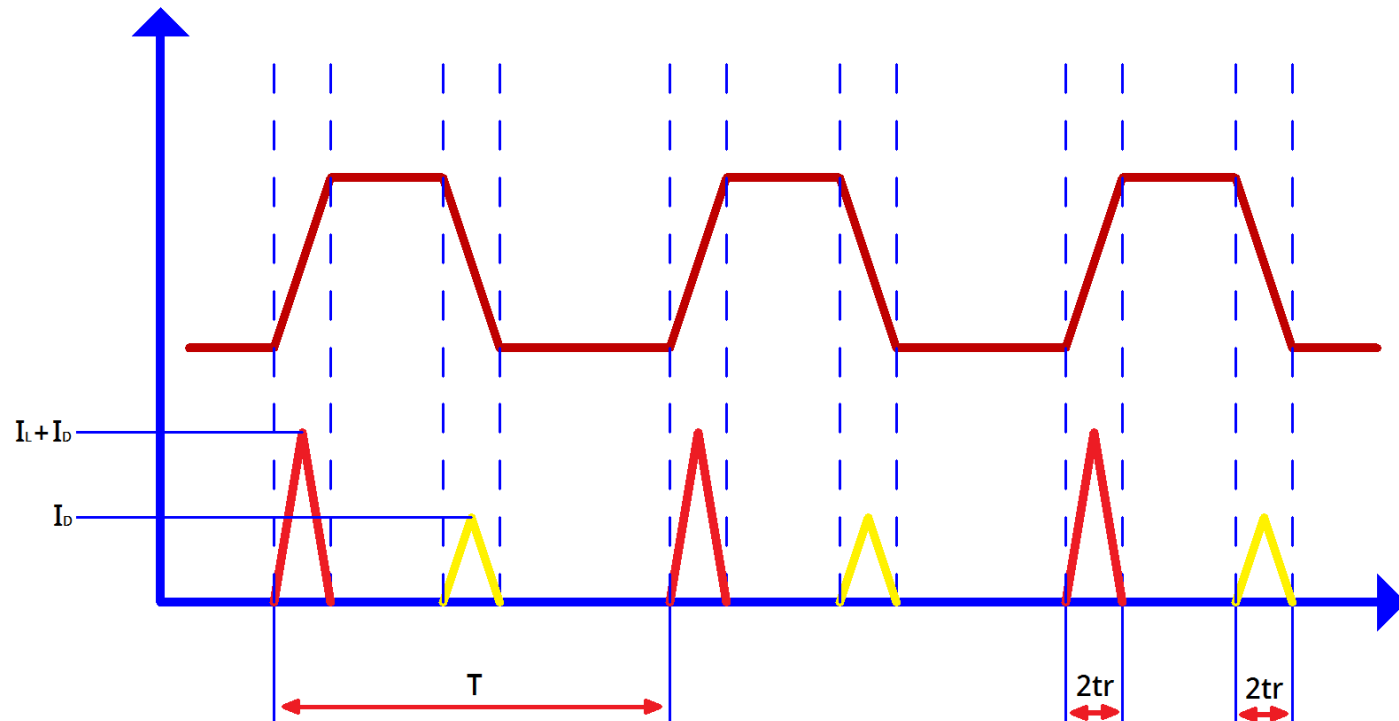
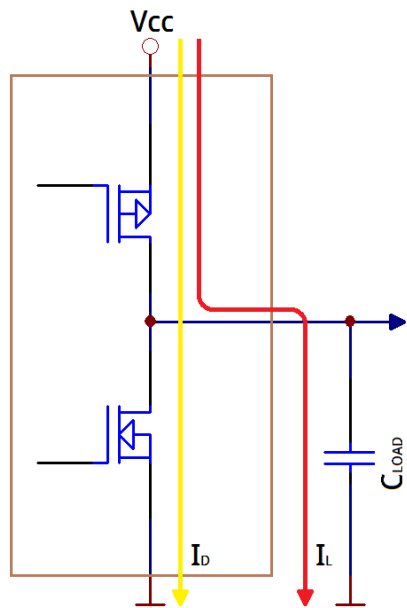
Gdyby jednocześnie 8 wyjść przełączyło się na stan przeciwny, sumaryczny prąd wyniósłby **664mA**.

Prąd ten przepływając przez nieuniknioną indukcyjność, którejś z gałęzi zasilających spowoduje zmianę jej potencjału, przykładowo o **0,5V**. **Kondensator odsprzęgający** musi skompensować tę stratę i kompensacja ta musi wystąpić dla tego przykładu w czasie **3ns**. Zatem minimalna jego pojemność musi wynieść **4nF**.

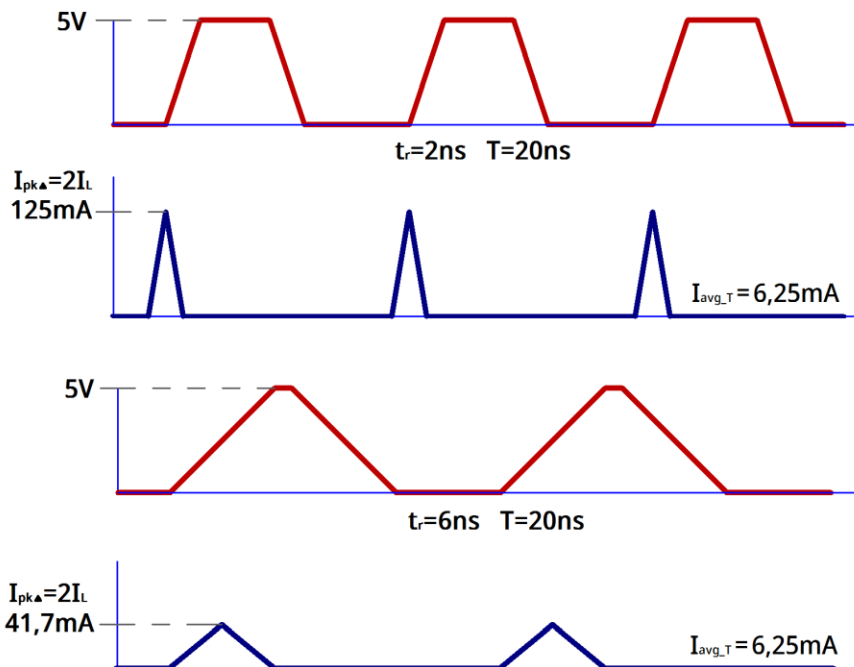
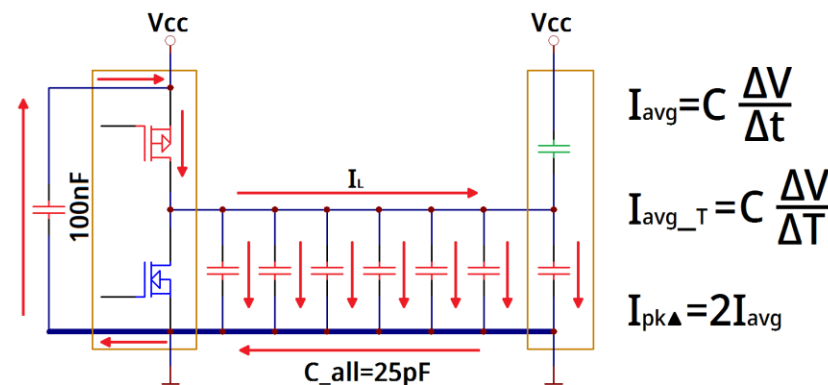
Jednak w rzeczywistości tak prosto nie jest,
bo nie uwzględniliśmy mnóstwa czynników!

$$C = I \frac{\Delta t}{\Delta V}$$

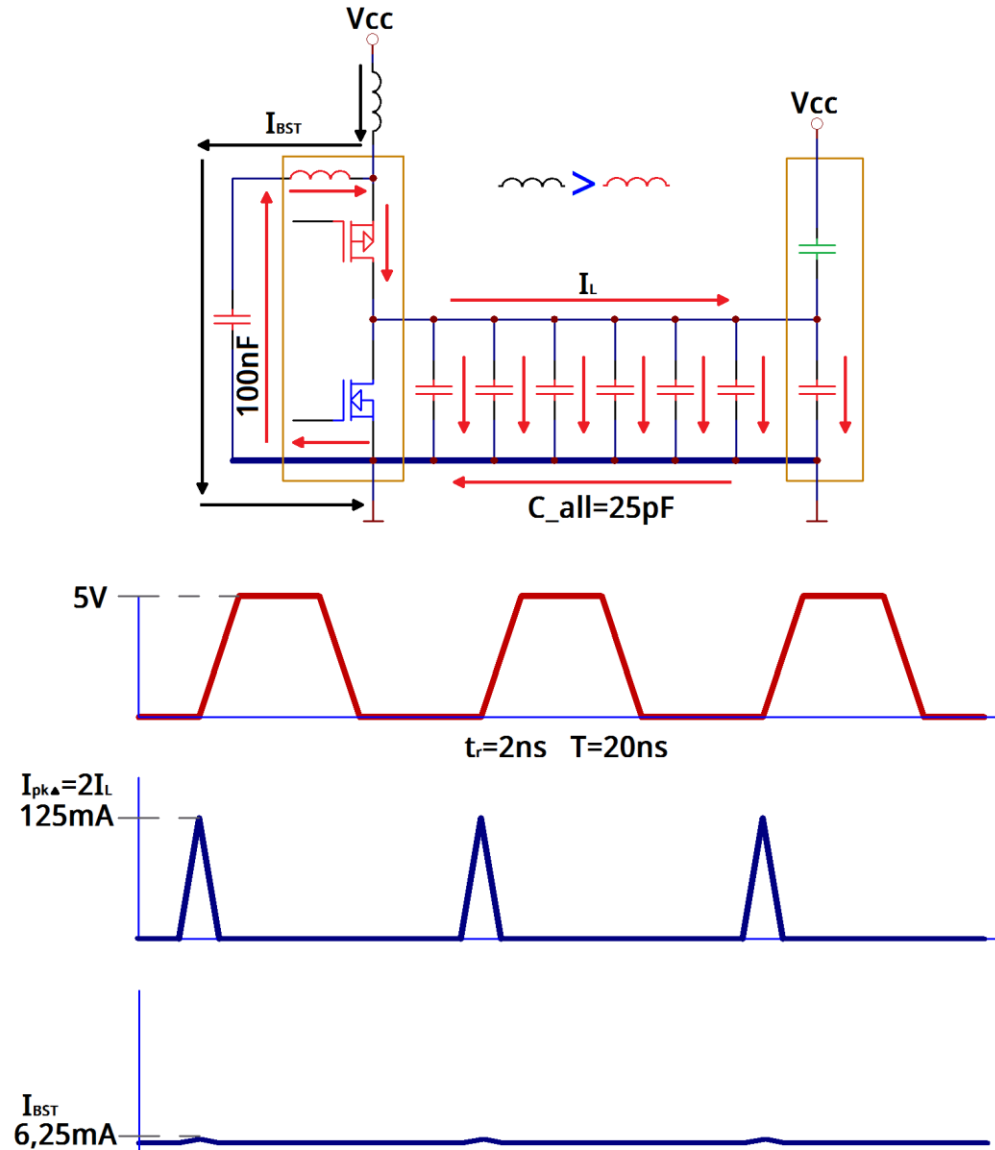
Dwa rodzaje prądów przejściowych w czasie przełączania funktora logicznego



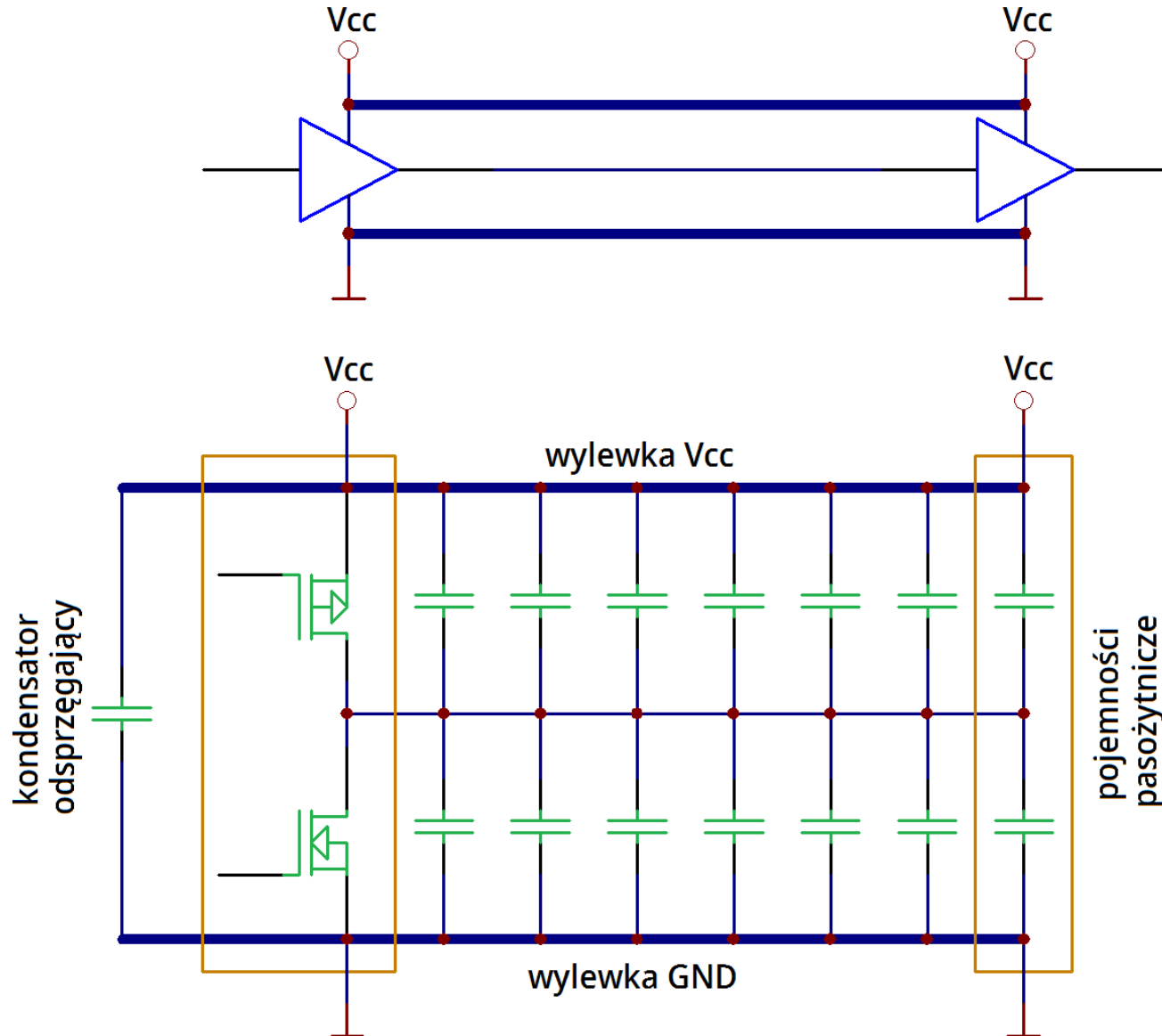
Kondensator odsprężający w akcji, prąd przejściowy – uproszczona wizualizacja



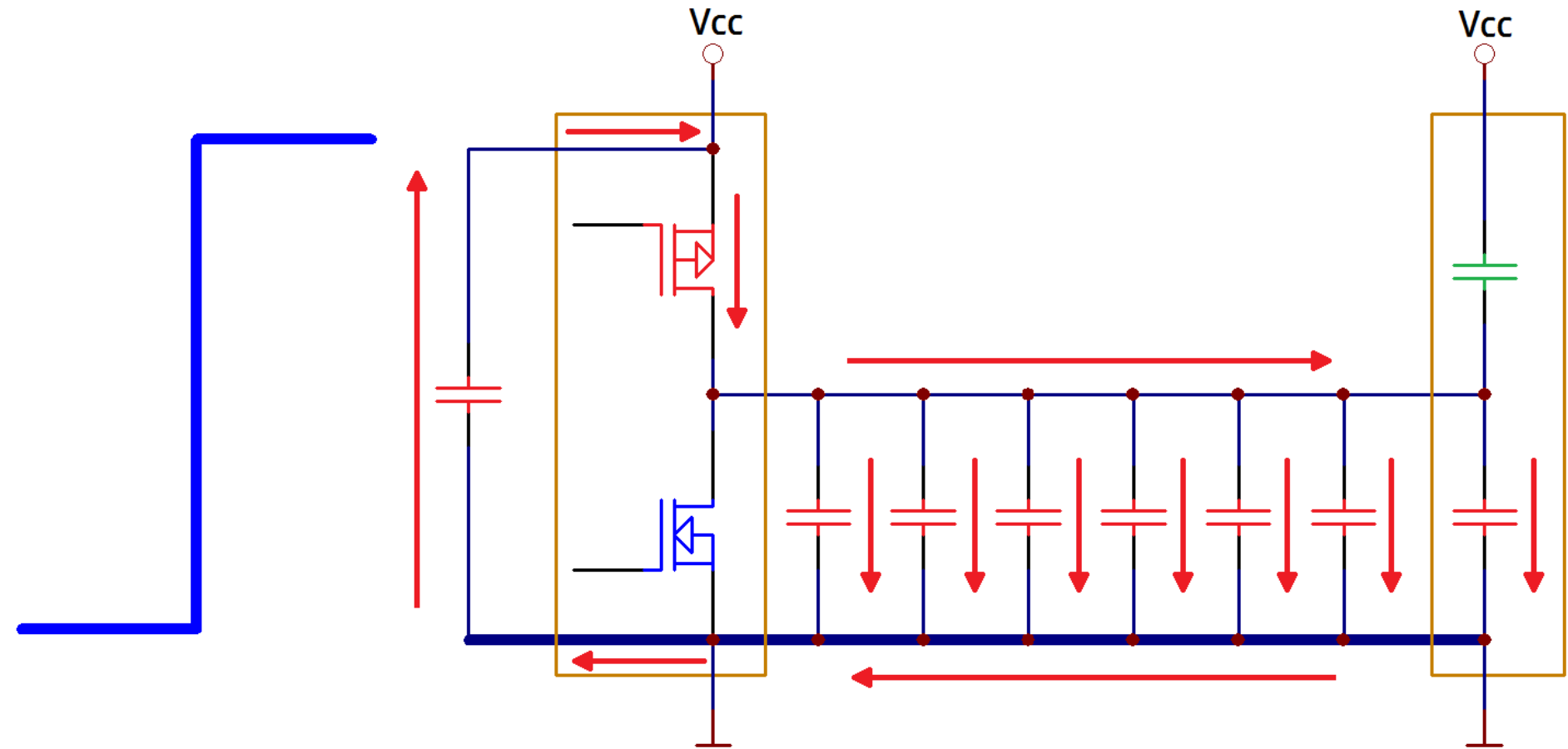
Kondensator odsprężający w akcji, prąd doładowujący – uproszczona wizualizacja



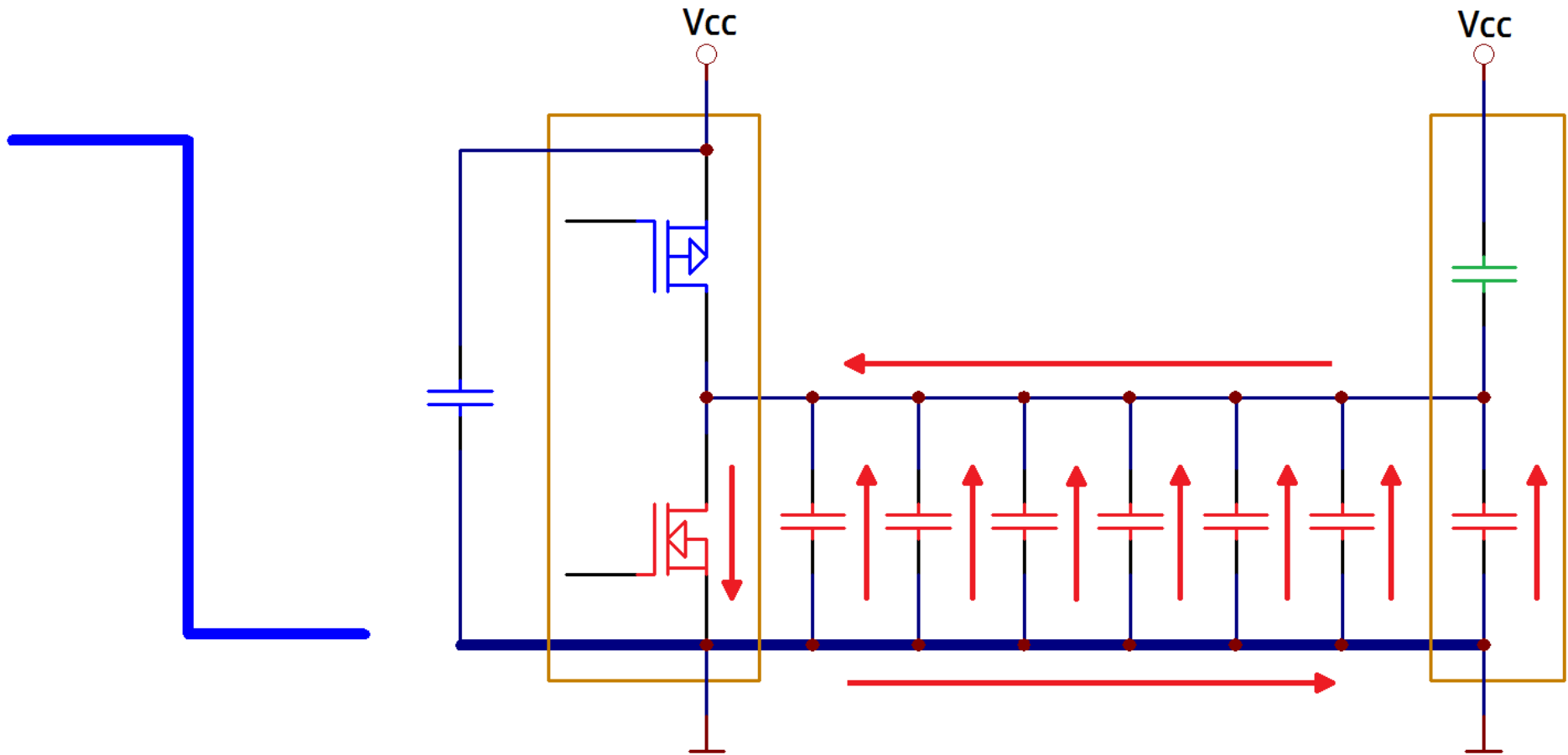
Prąd powrotny może płynąć przez płaszczyznę GND lub Vcc



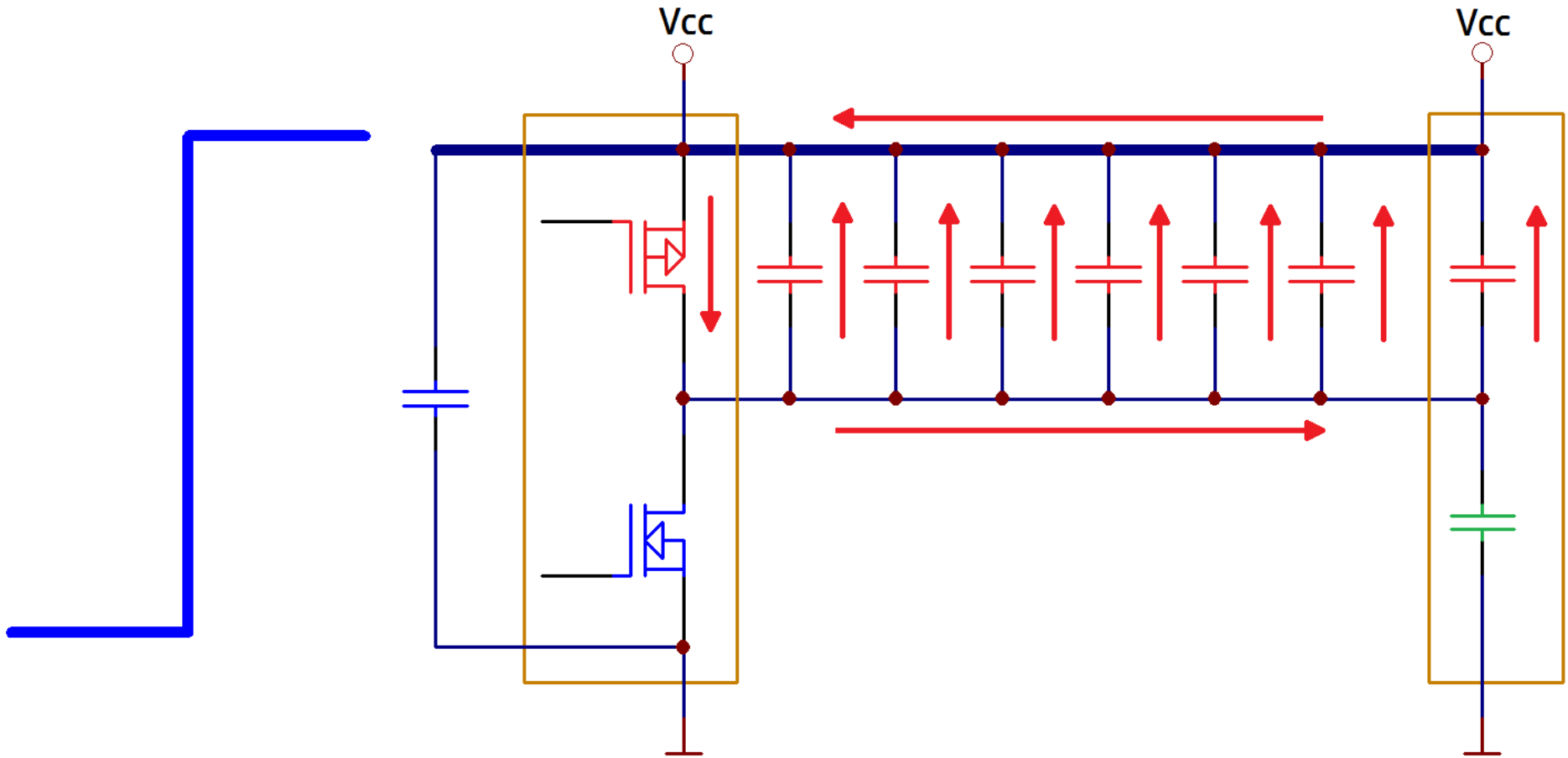
Prąd powrotny przepływający przez płaszczyznę GND przy zmianie stanu z 0 na 1



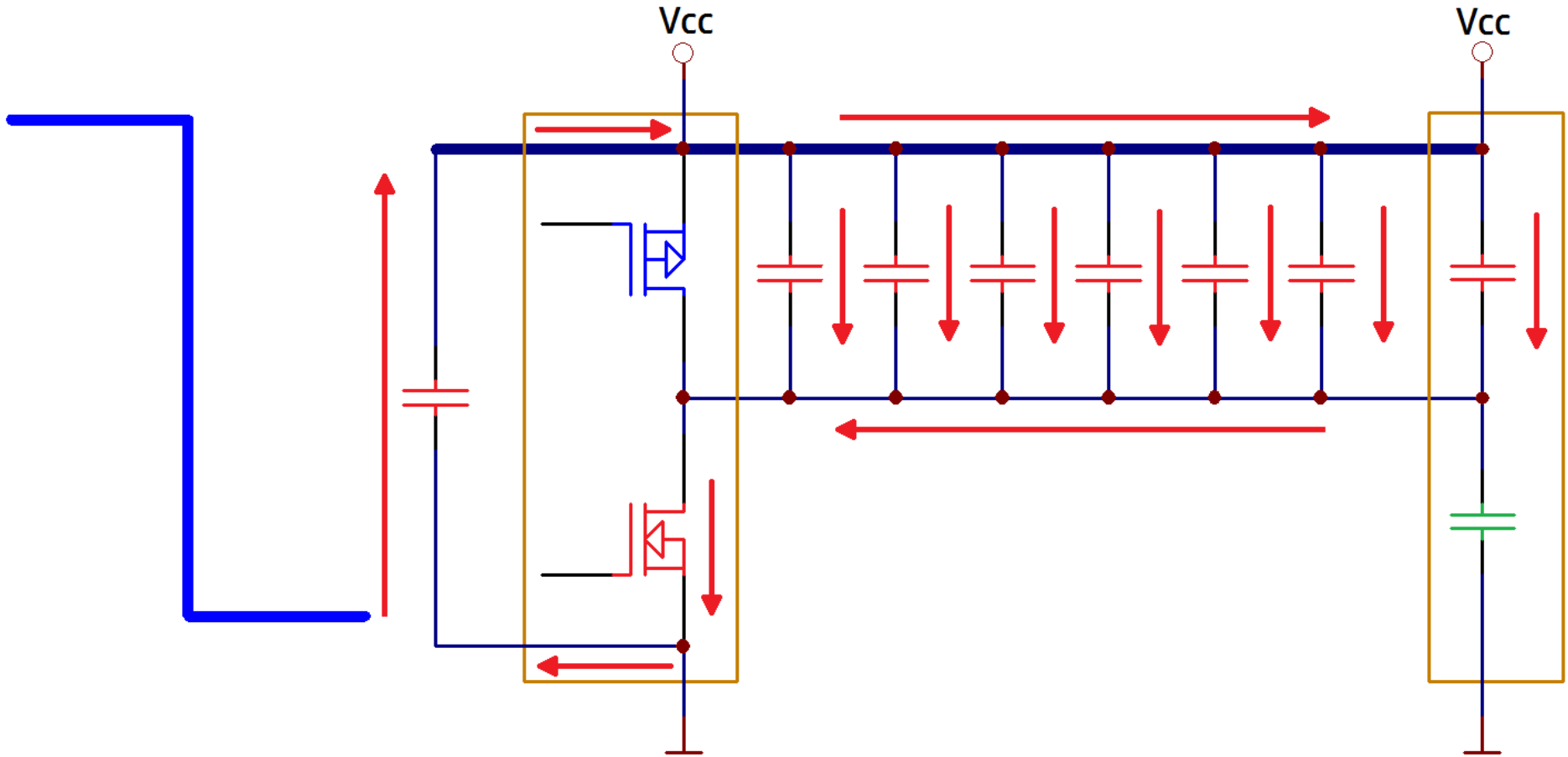
Prąd powrotny przepływający przez płaszczyznę GND przy zmianie stanu z 1 na 0



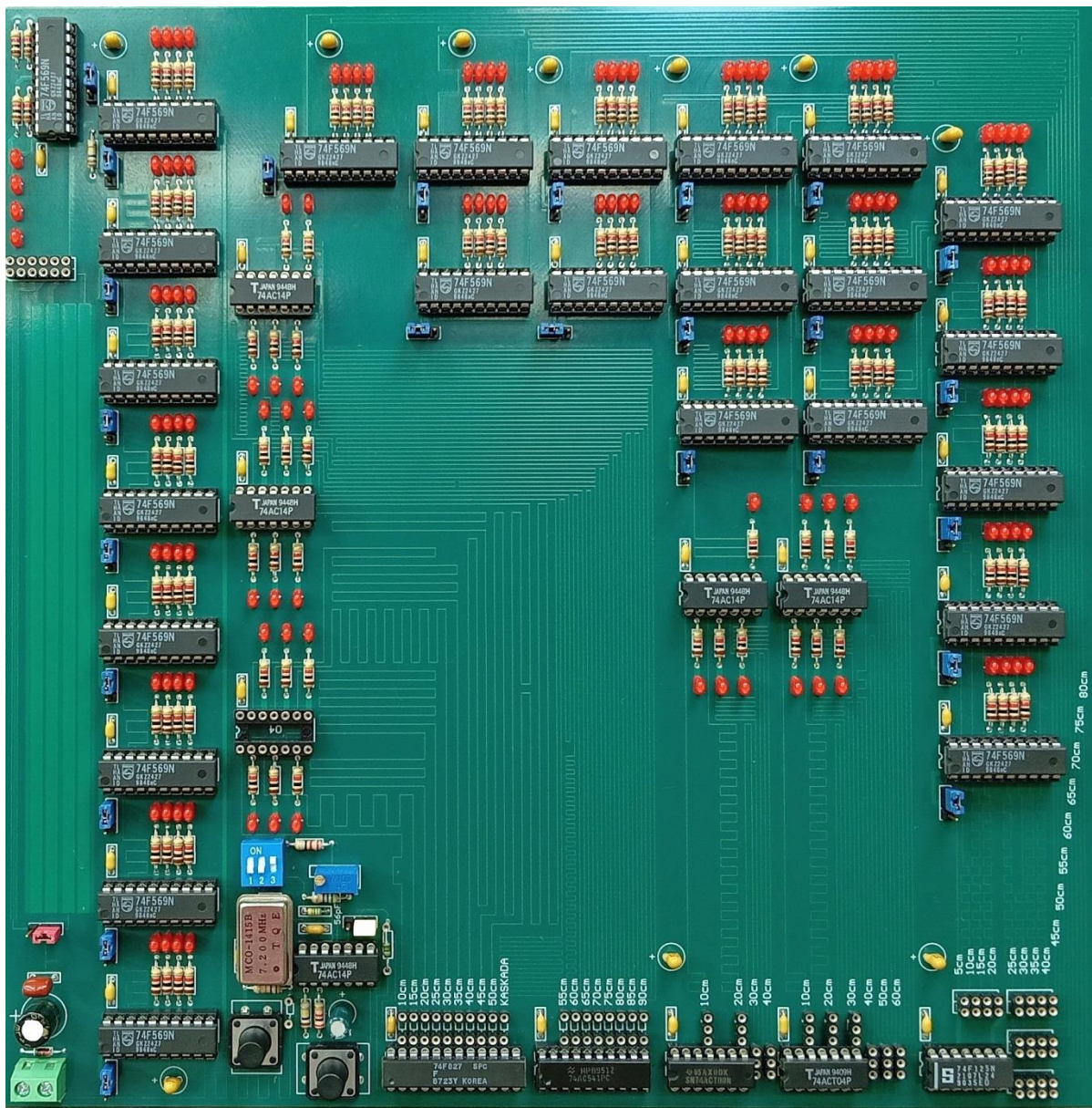
Prąd powrotny przepływający przez płaszczyznę V_{cc} przy zmianie stanu z 0 na 1



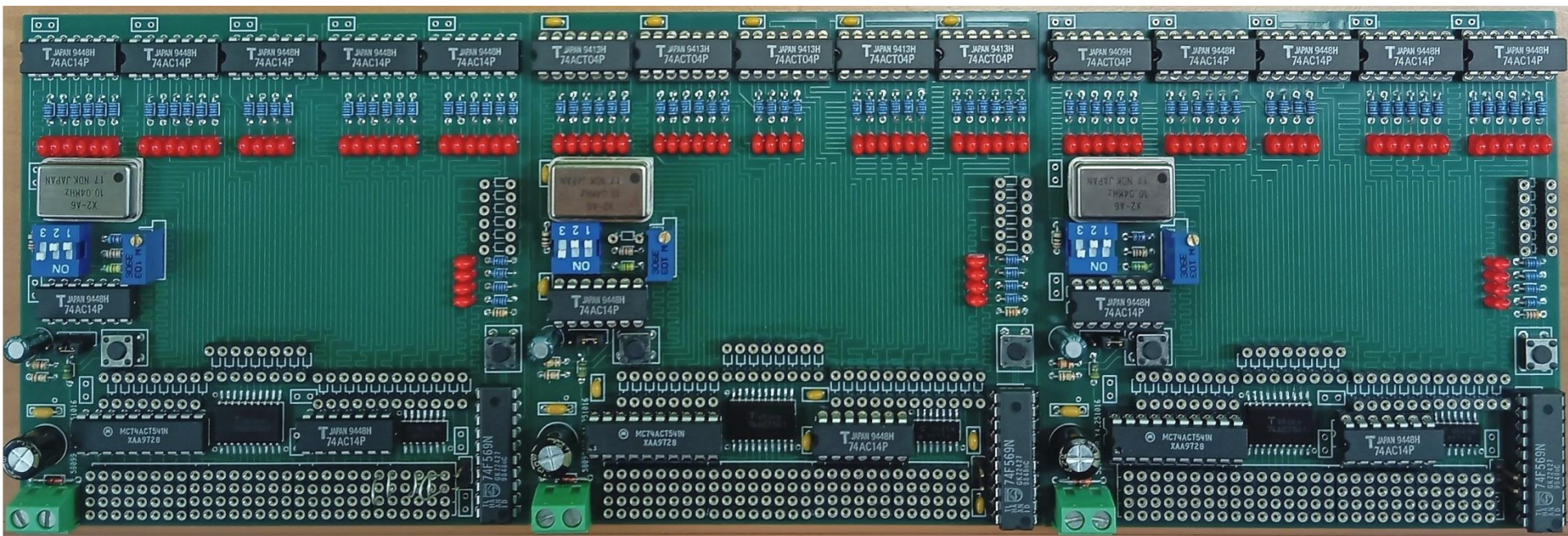
Prąd powrotny przepływający przez płaszczyznę V_{CC} przy zmianie stanu z 1 na 0



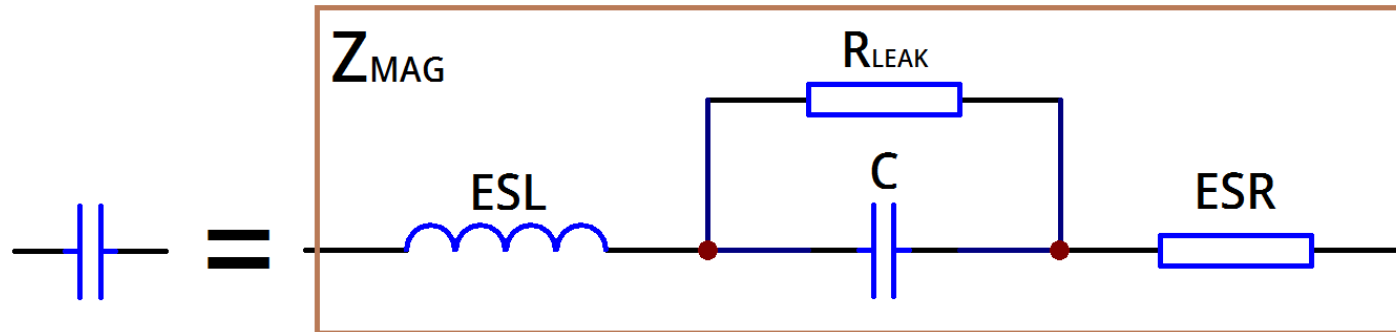
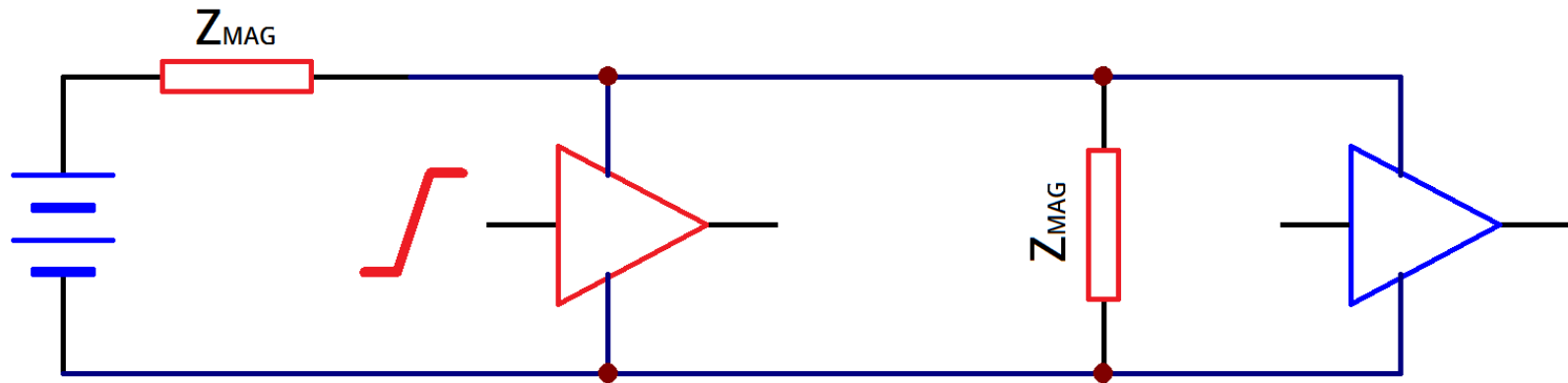
Czterowarstwowa płyta testowa 25cm×25cm



Czterowarstwowe płyty testowe 10cm×10cm



Realny kondensator to nie tylko czysta pojemność,
to szeregowy obwód rezonansowy...

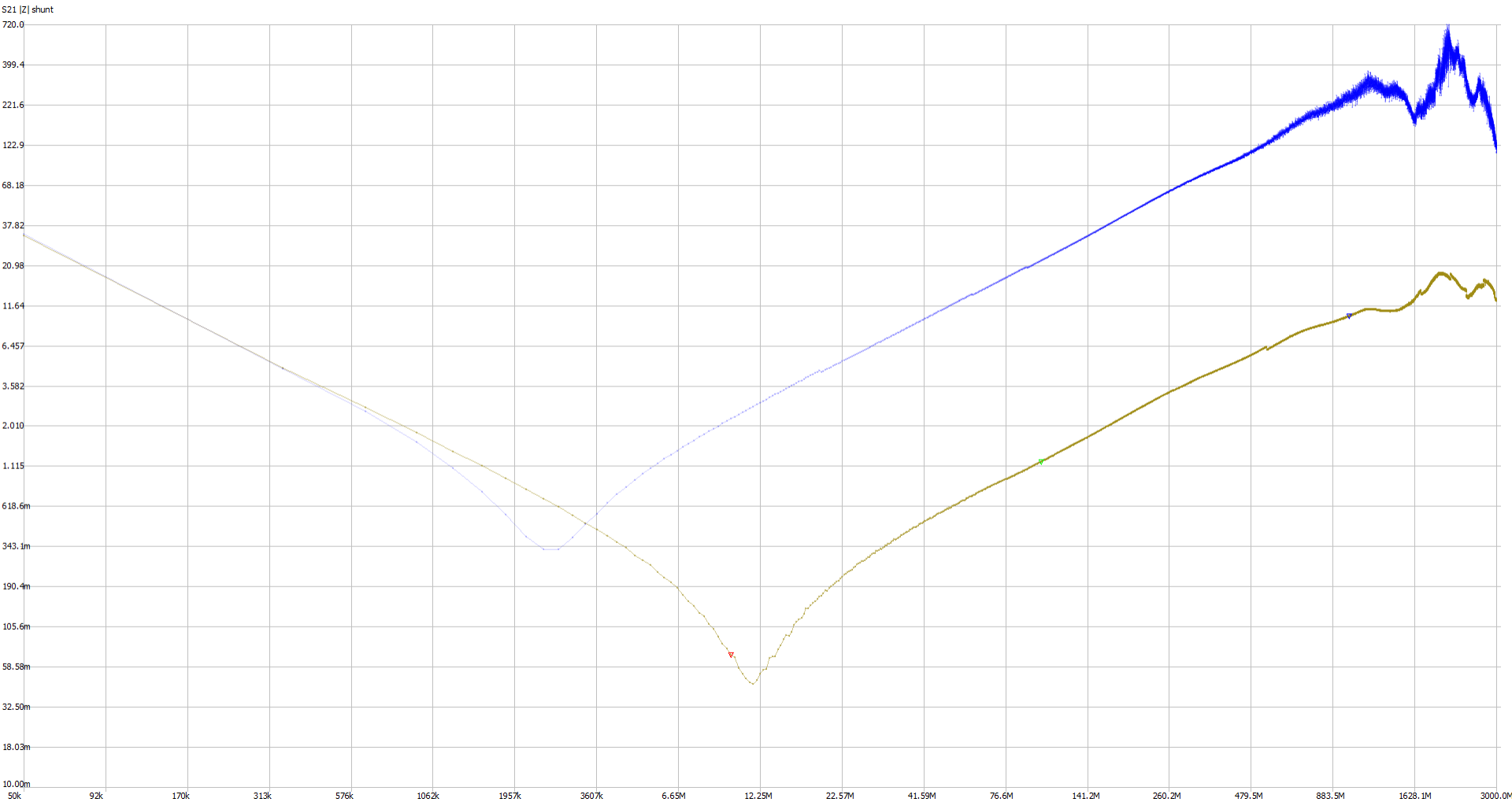


Z_{MAG} właściwości:

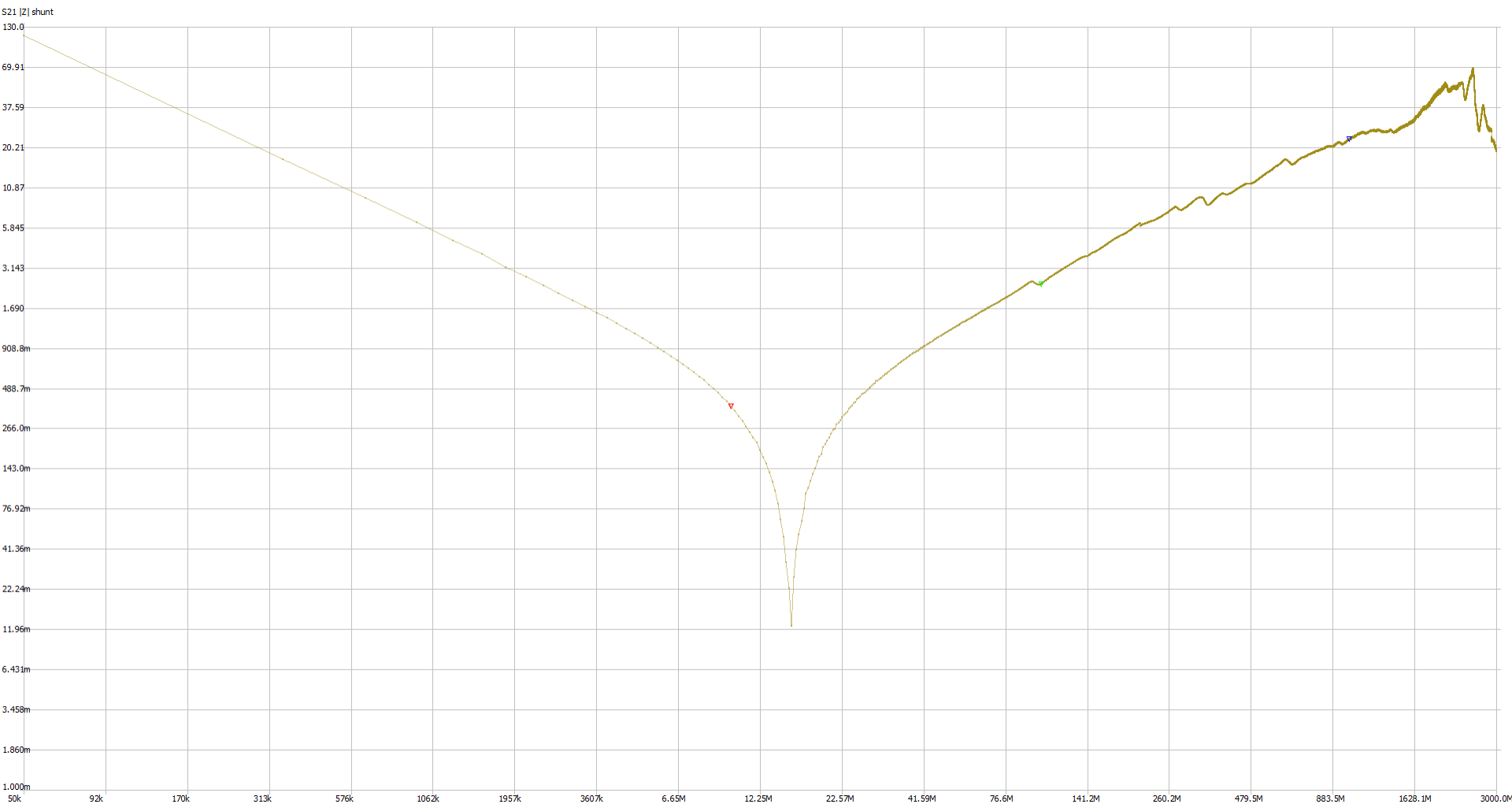
gdy jest włączone szeregowo to dla DC – $Z = \min$, a dla AC – $Z = \text{obwód RLC}$

gdy jest włączone równolegle to dla DC – $Z = \max$, a dla AC – $Z = \text{obwód RLC}$

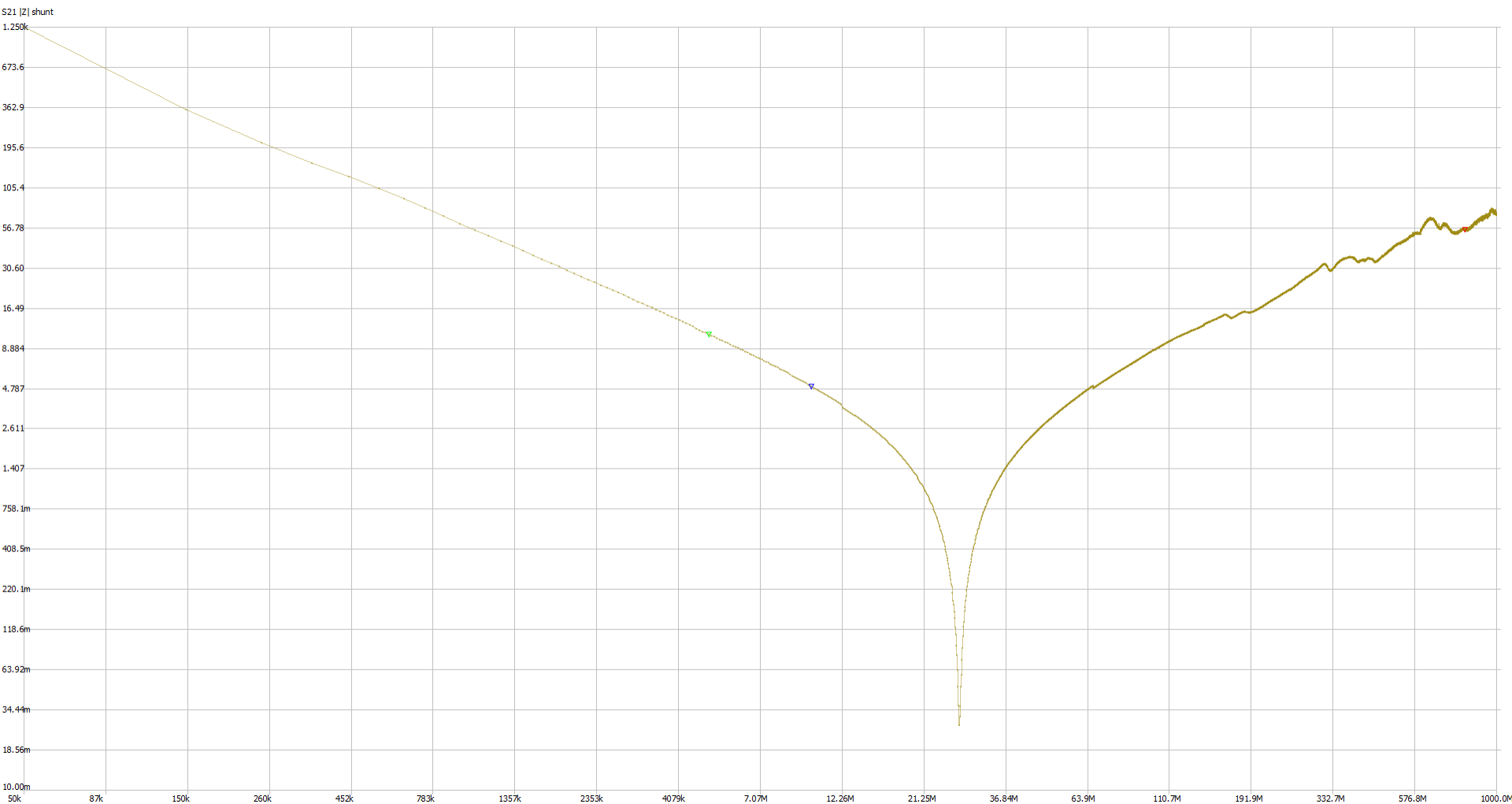
Impedancja kondensatora THT 100nF przy długości wyprowadzeń 3cm oraz 3mm



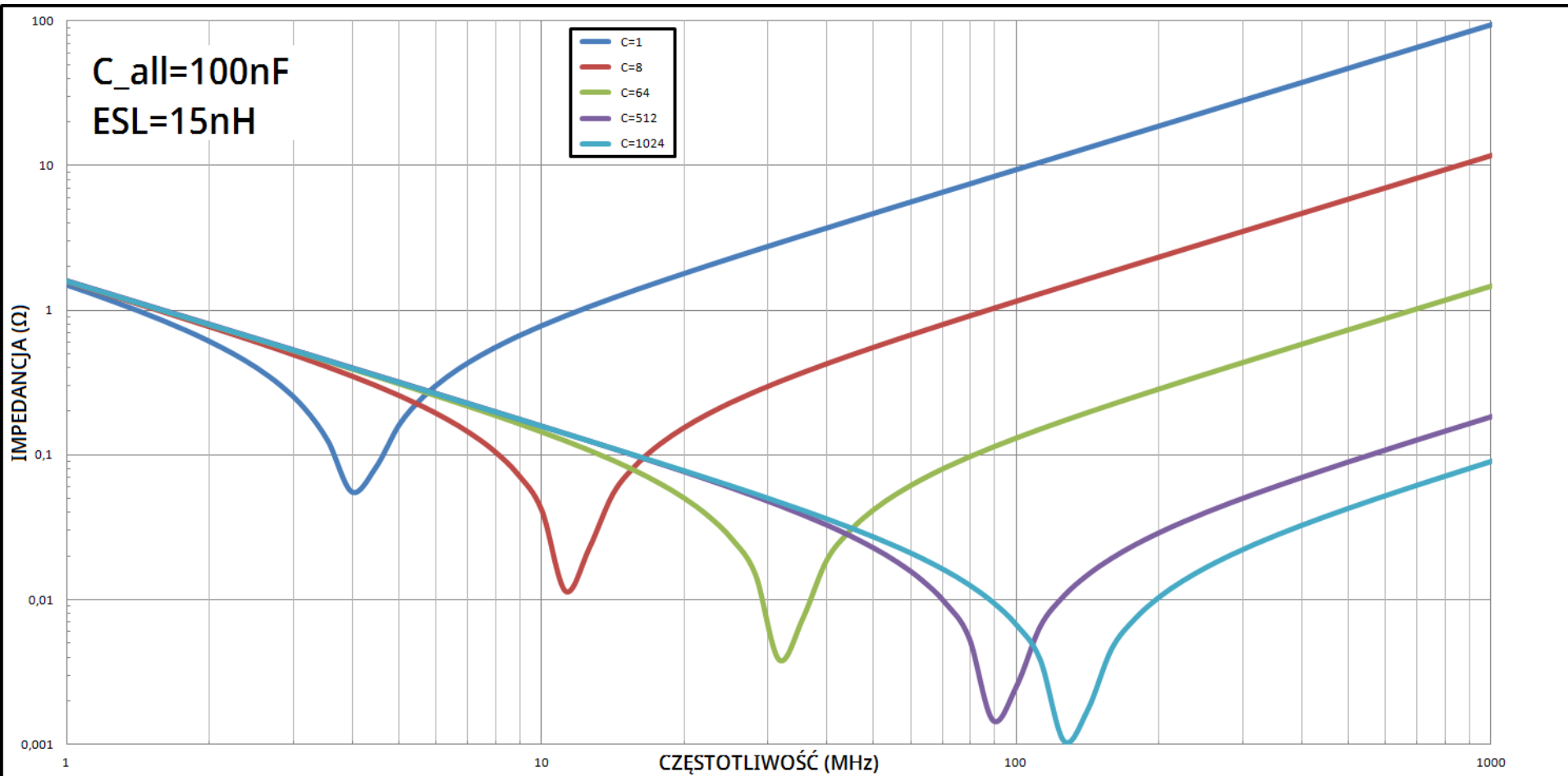
Pojemność międzypłaszczyznowa płyty PCB 25cm×25cm (26nF)



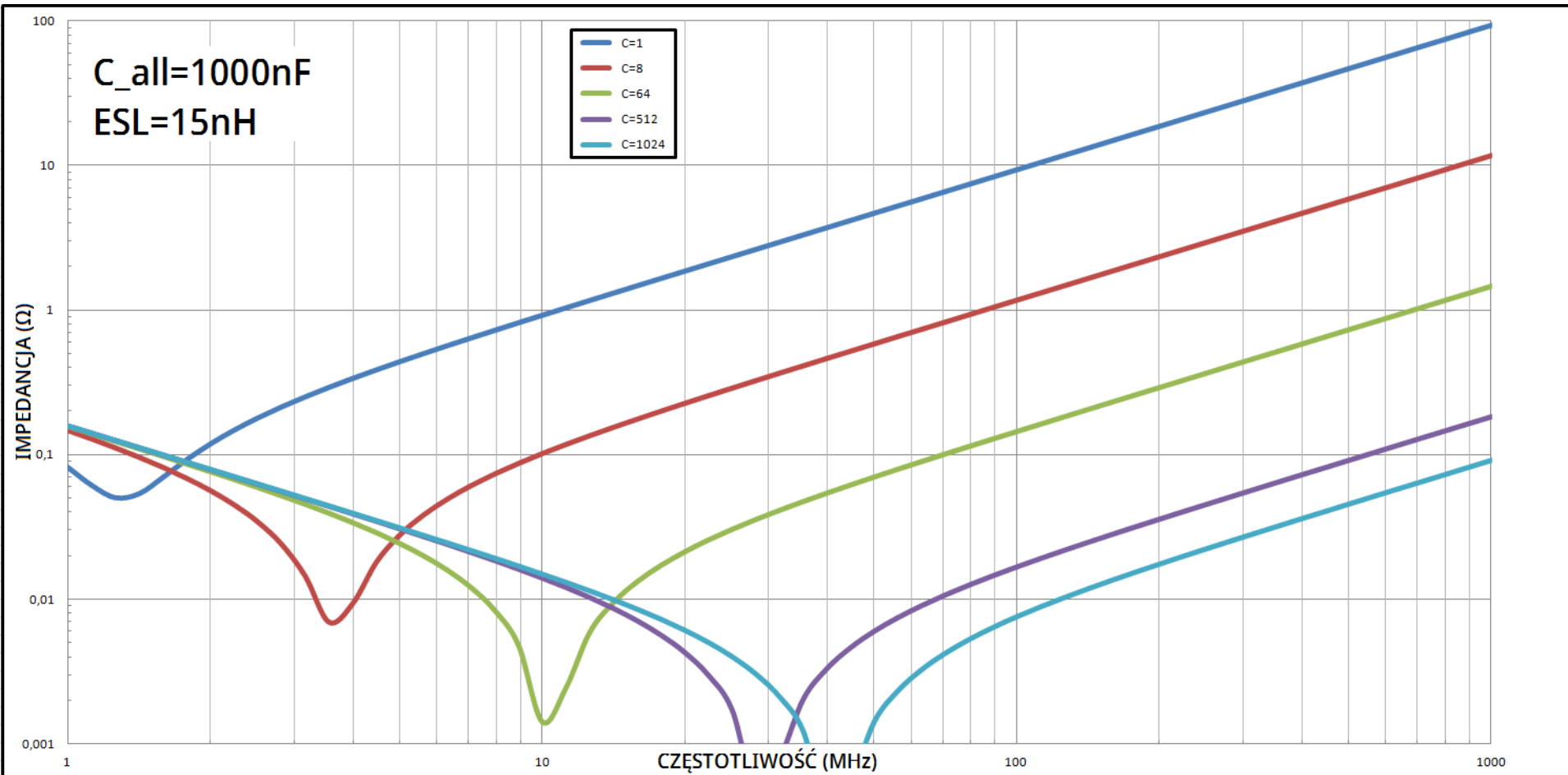
Pojemność międzypłaszczyznowa płyty PCB 10cm×10cm (2,7nF)



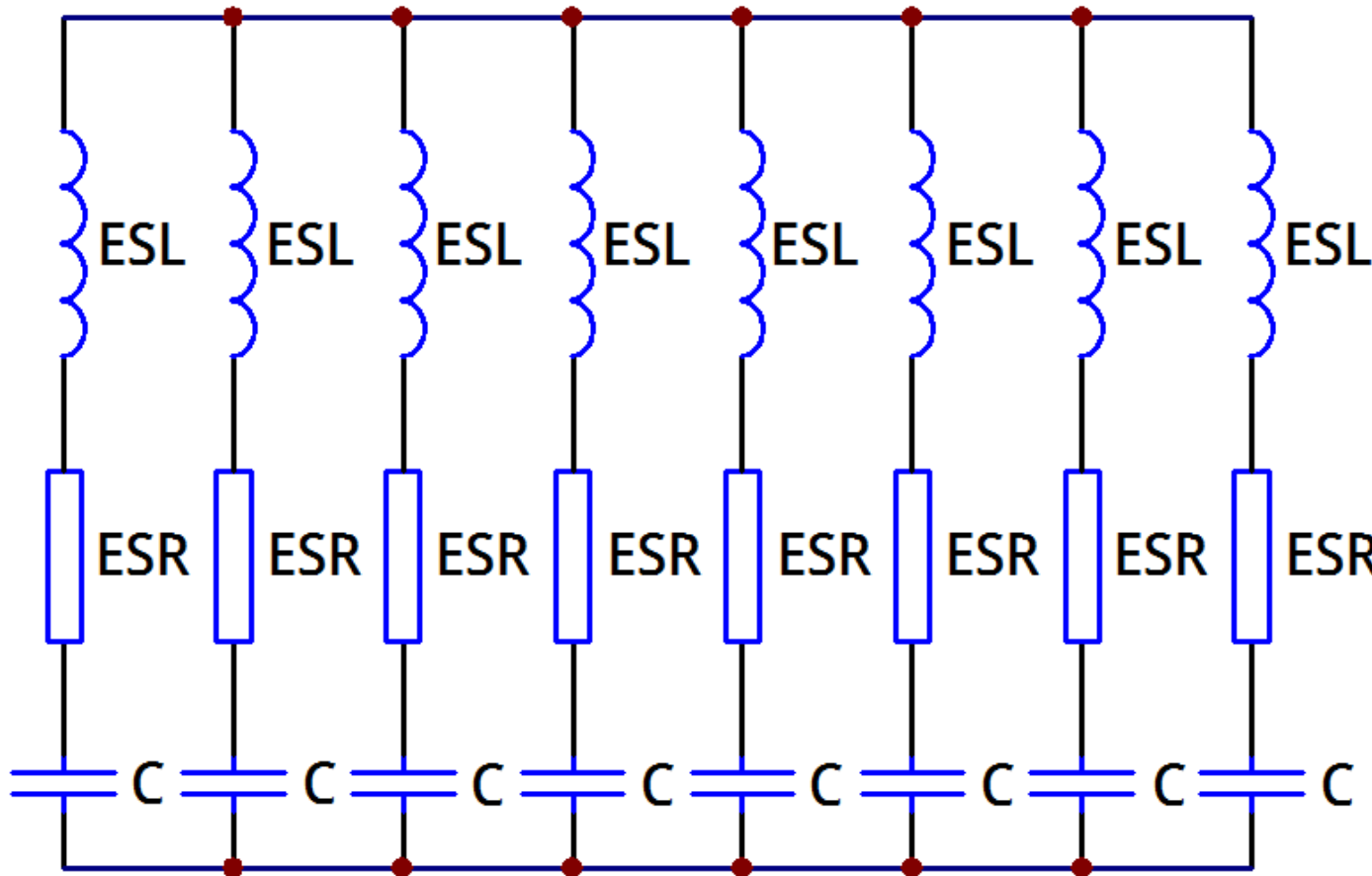
Impedancja sieci kondensatorów połączonych równolegle (sumarycznie 100nF)



Impedancja sieci kondensatorów połączonych równolegle (sumarycznie 1uF)



Zależności w łączeni równoległym identycznych sieci RLC

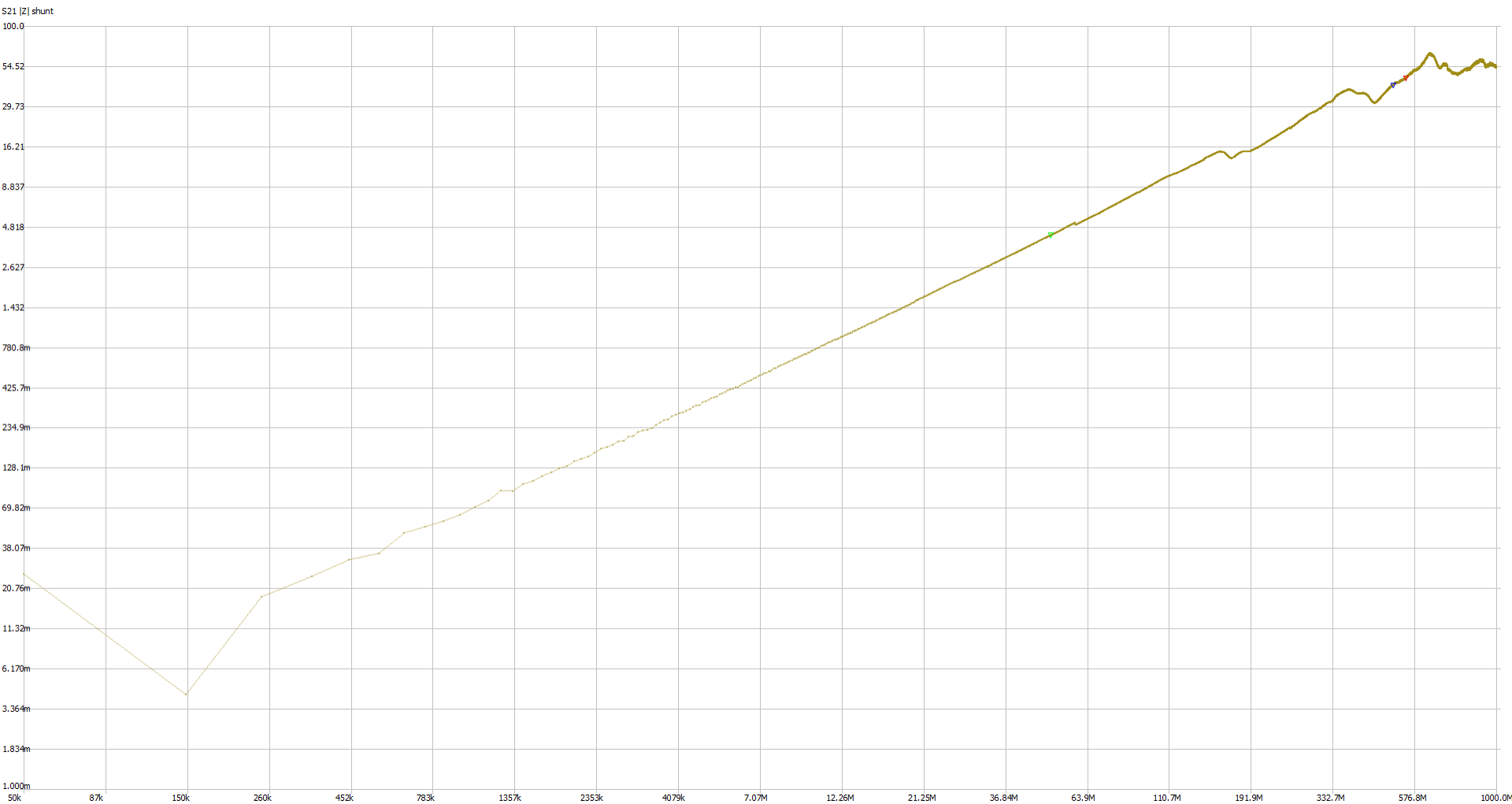


$$ESL_{ALL} = \frac{ESL}{n}$$

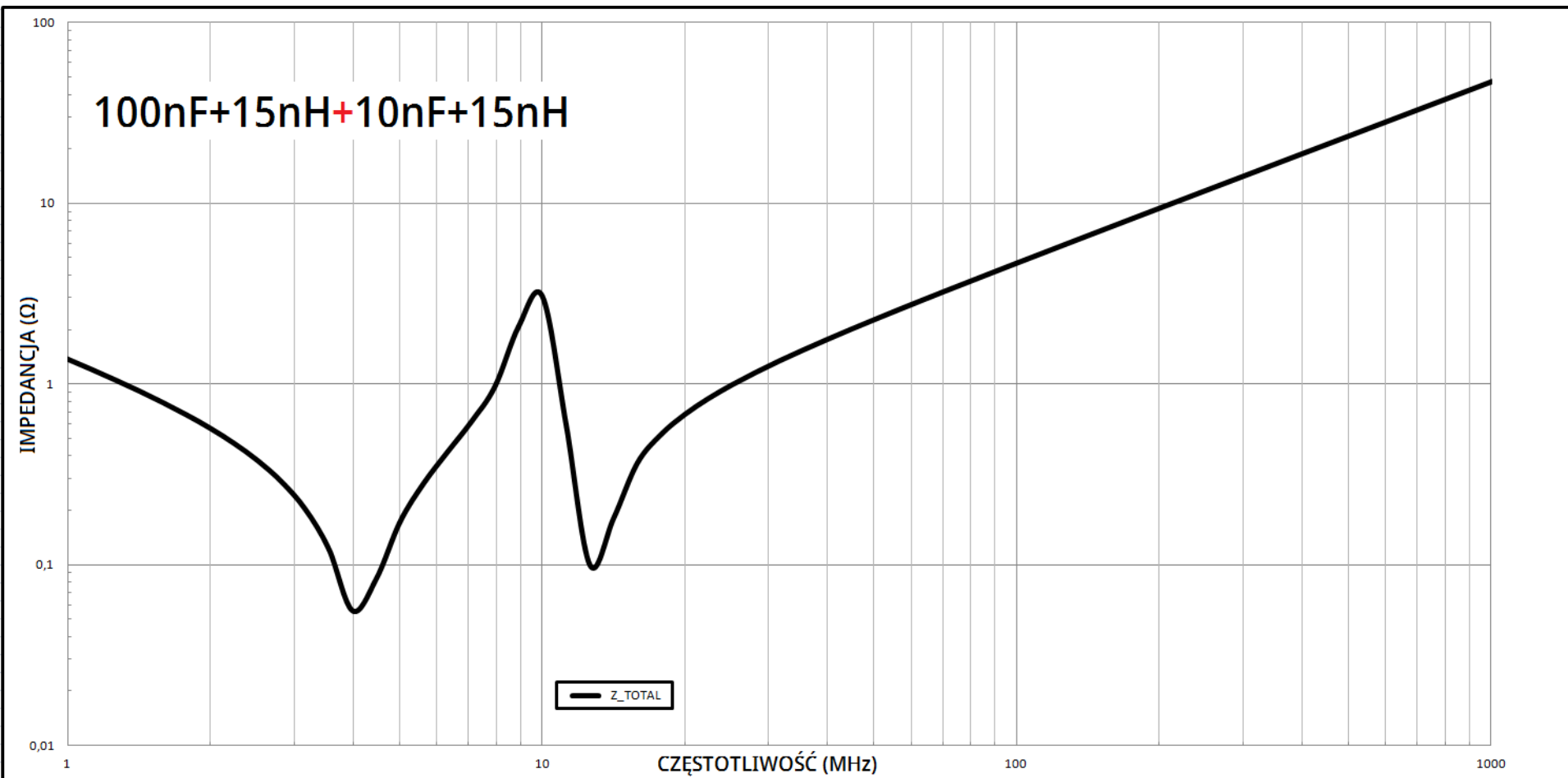
$$ESR_{ALL} = \frac{ESR}{n}$$

$$C_{ALL} = nC$$

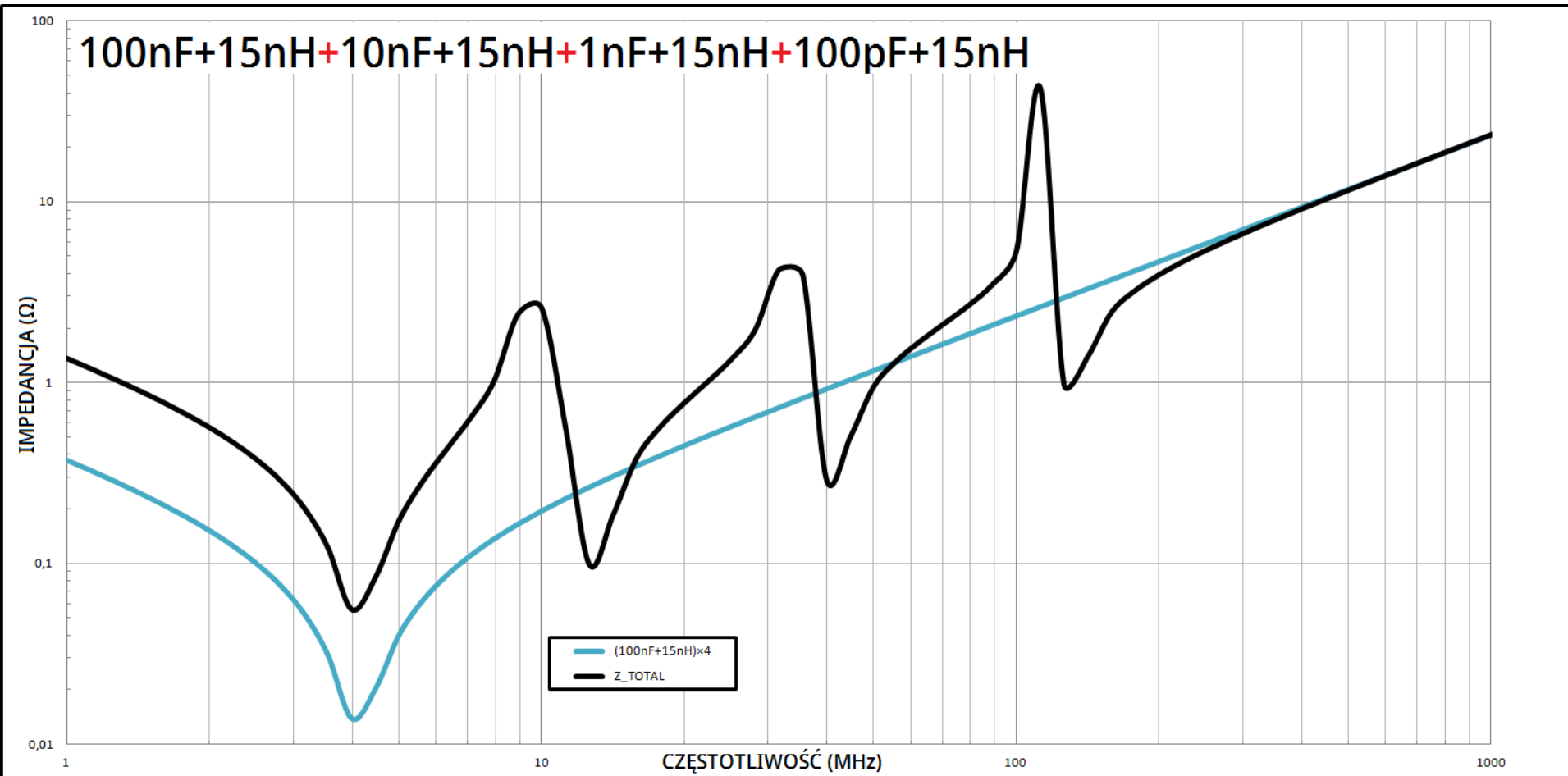
Impedancja trzech połączonych równolegle kondensatorów SMD 0603 47uF+PM 2,7nF



Impedancja dwóch równolegle połączonych kondensatorów o różnych wartościach

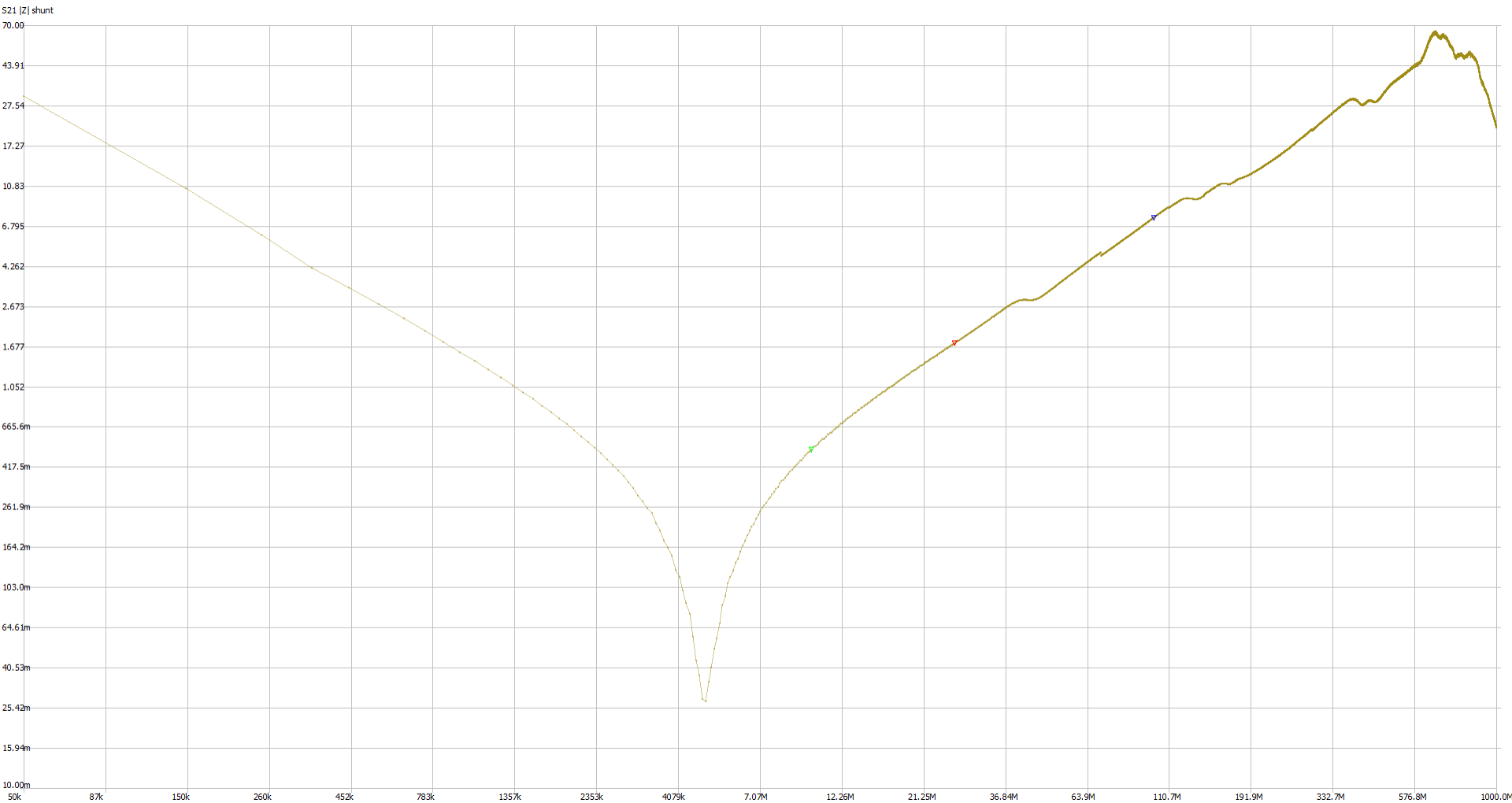


Impedancja kilku równolegle połączonych kondensatorów o różnych wartościach

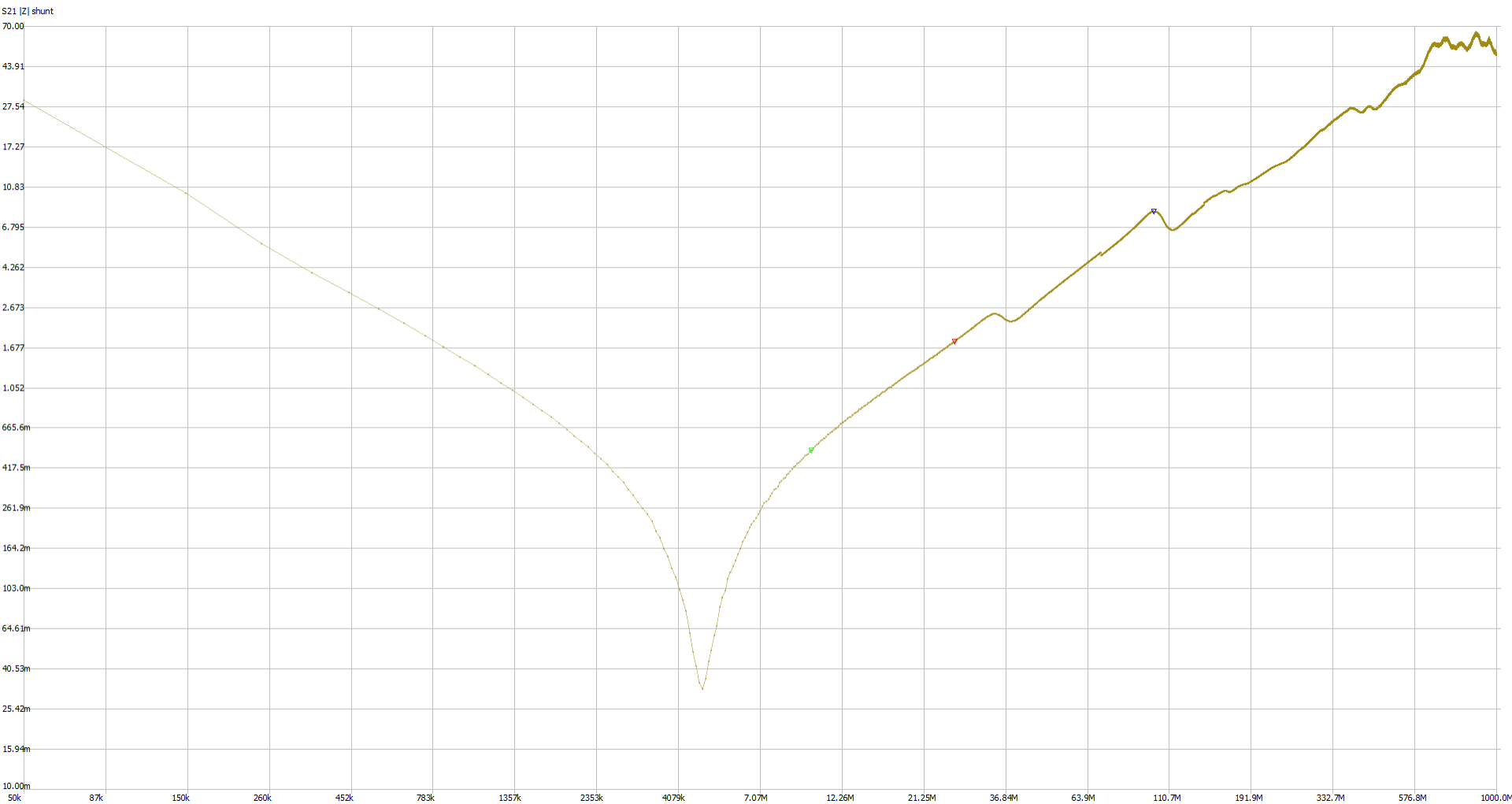


Impedancja kondensatorów:

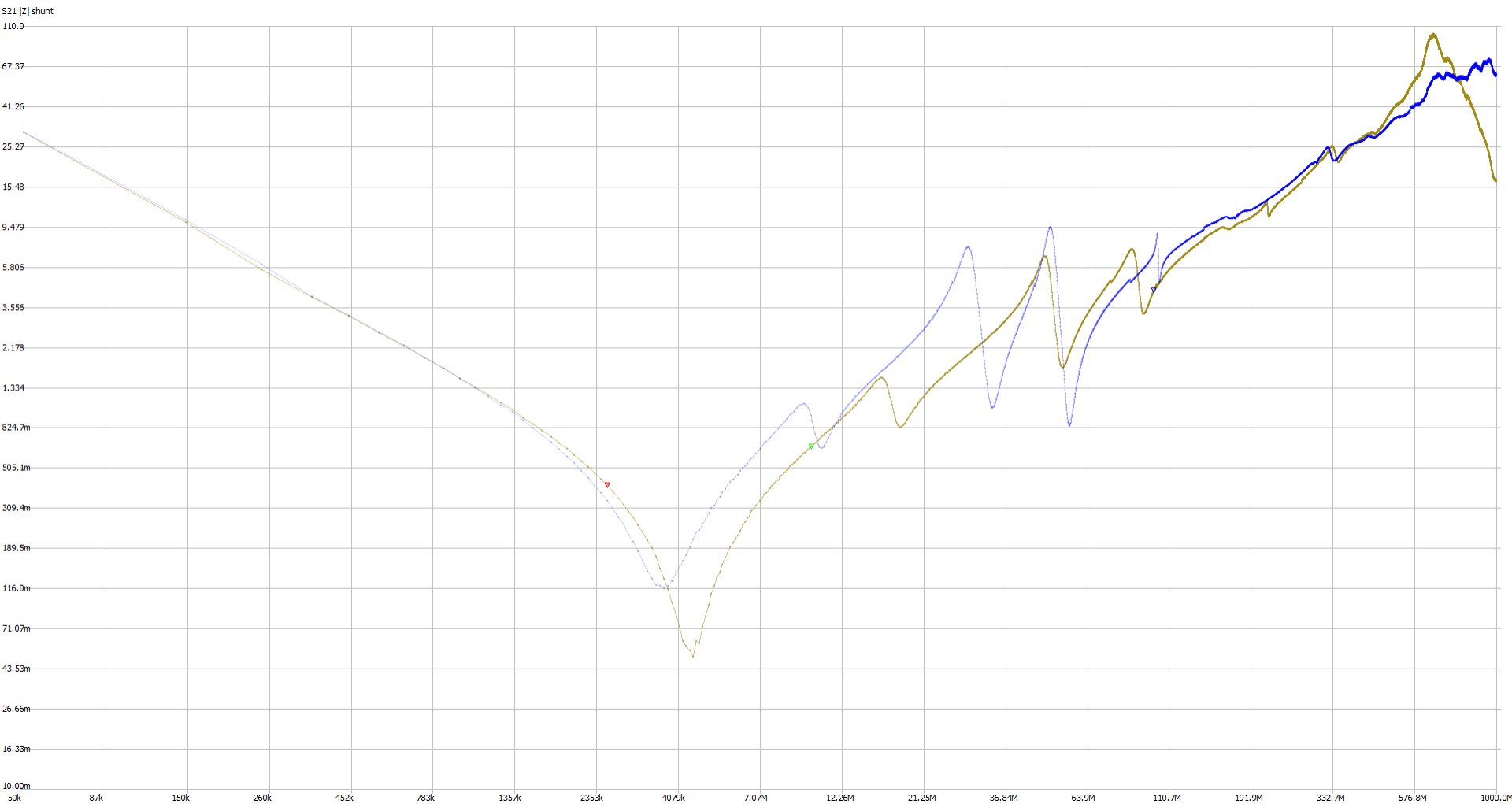
SMD 1nF_0805+10nF_0805+100nF_0603 oraz PM 2,7nF



Impedancja kondensatorów rozproszonych po całej PCB: SMD 1nF_0805+10nF_0805+100nF_0603 oraz PM 2,7nF

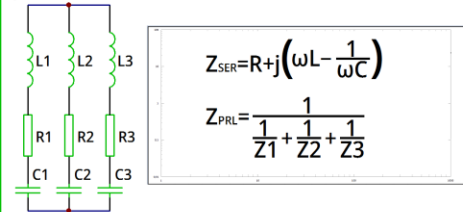


Impedancja kondensatorów THT rozproszonych po całej PCB, długie vs krótkie wyprowadzenia: 10pF+100pF+1nF+10nF+100nF oraz PM 2,7nF

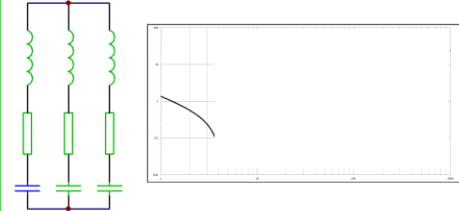


Aktywność w dziedzinie częstotliwości, składowych (ESR, ESL, C) w trzech sieciach RLC połączonych równolegle

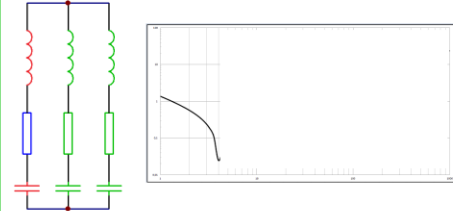
1) L1,L2,L3=15nH R1,R2,R3=0,01Ω C1=100nF,C2=10nF,C3=1nF



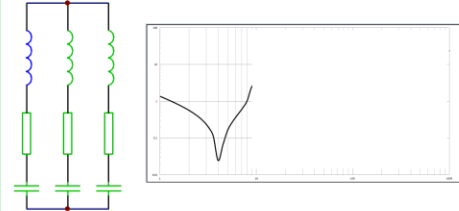
2)



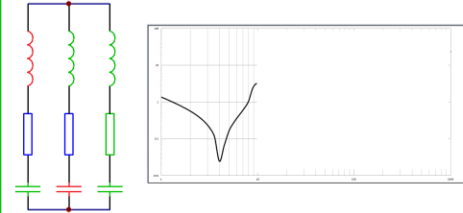
3)



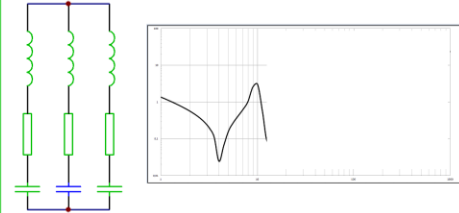
4)



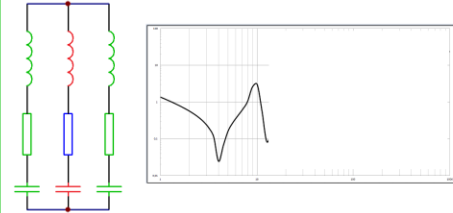
5)



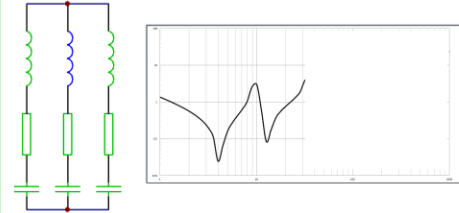
6)



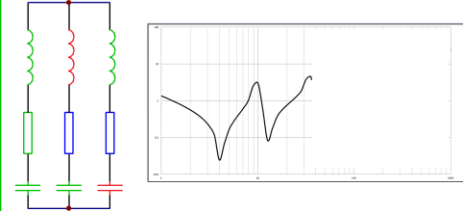
7)



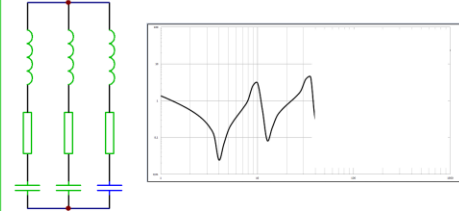
8)



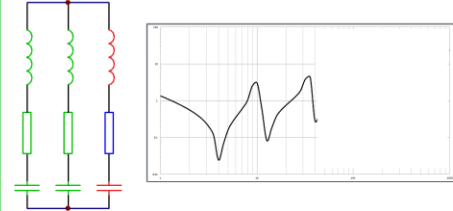
9)



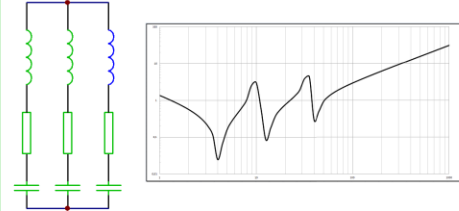
10)



11)

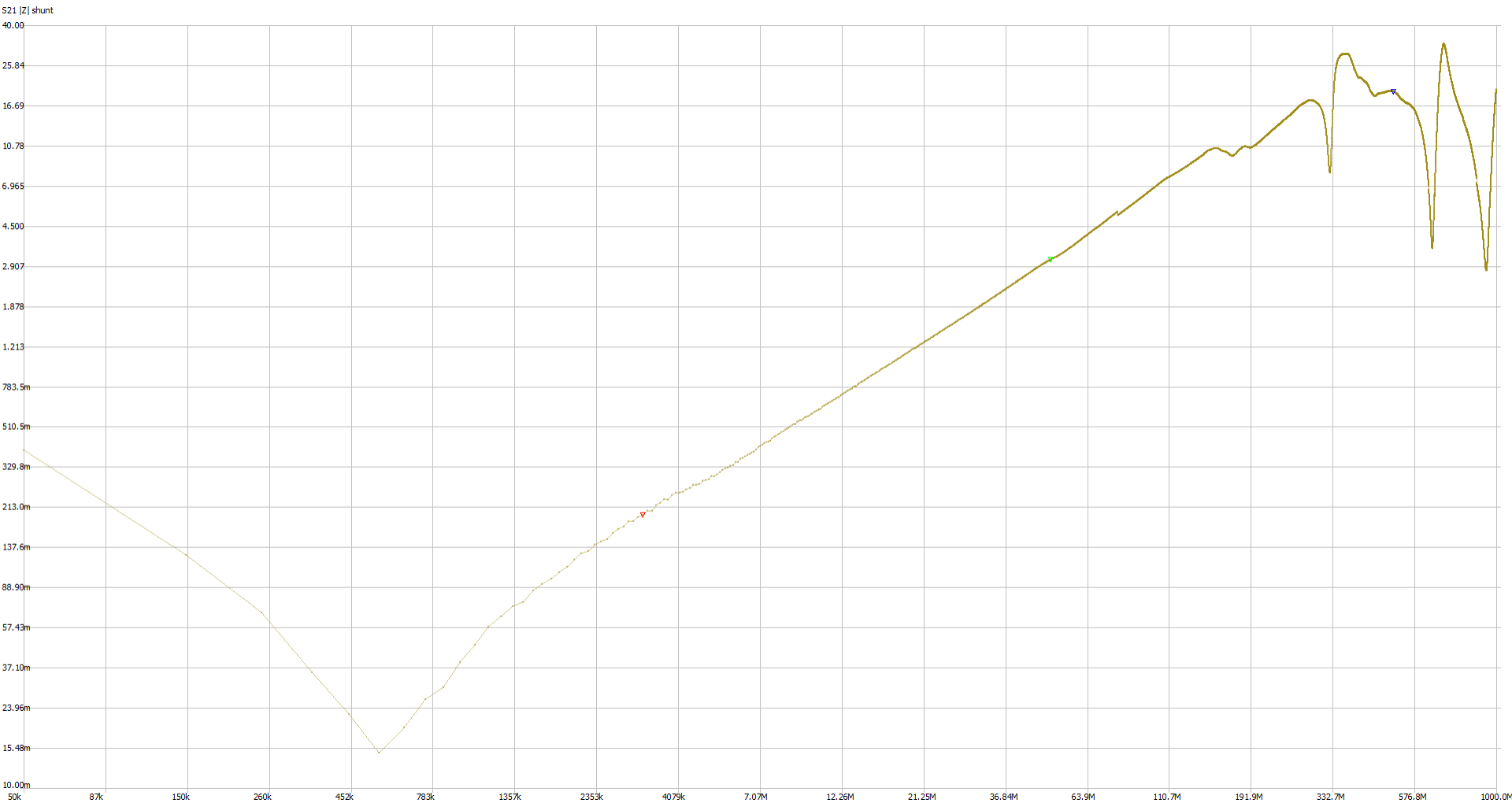


12)

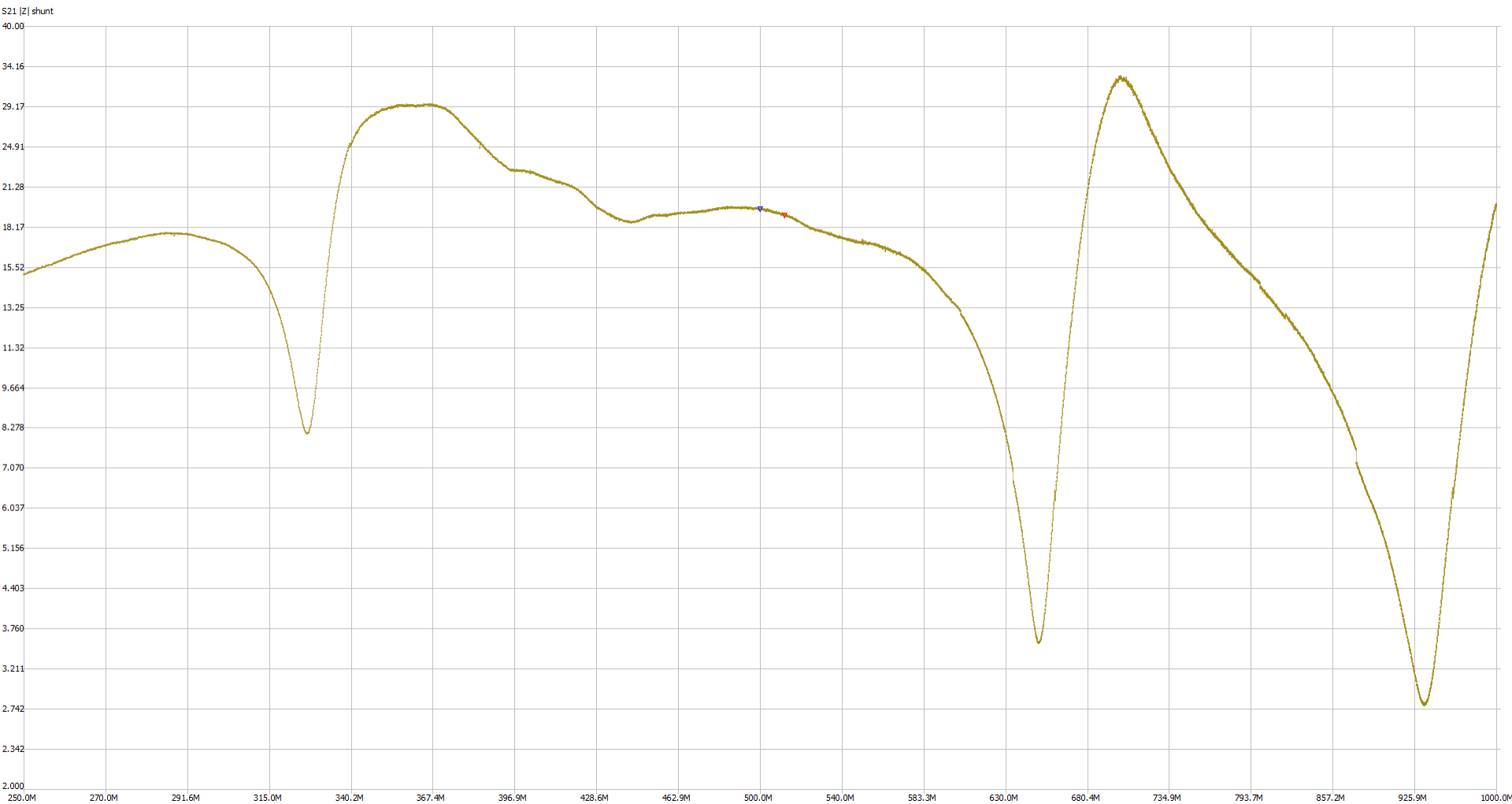


Impedancja kondensatorów:

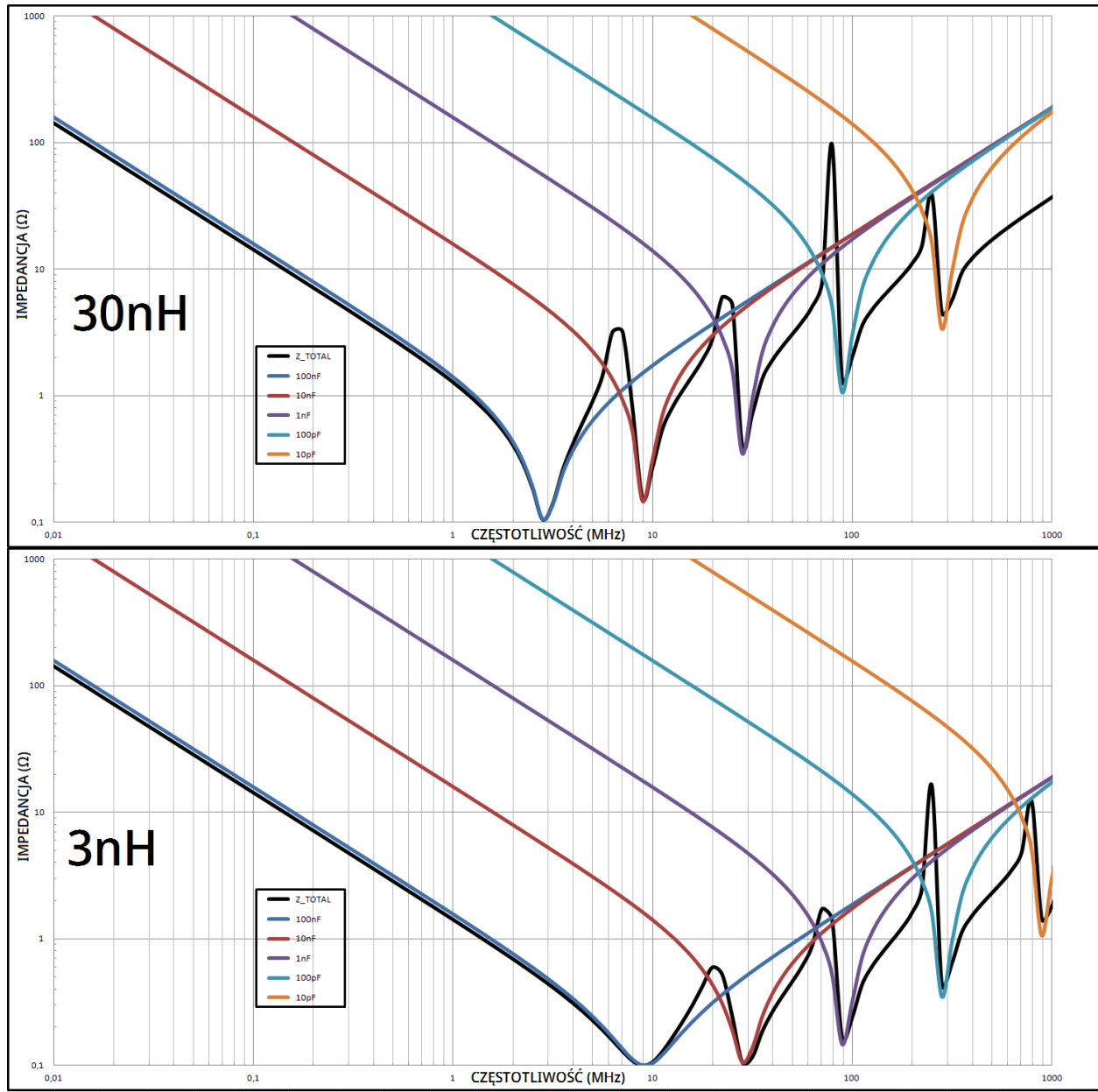
10uF_0603+1uF_0603+10nF_0805+100nF_THT oraz PM 2,7nF
widoczny rezonans płaszczyzn zasilających



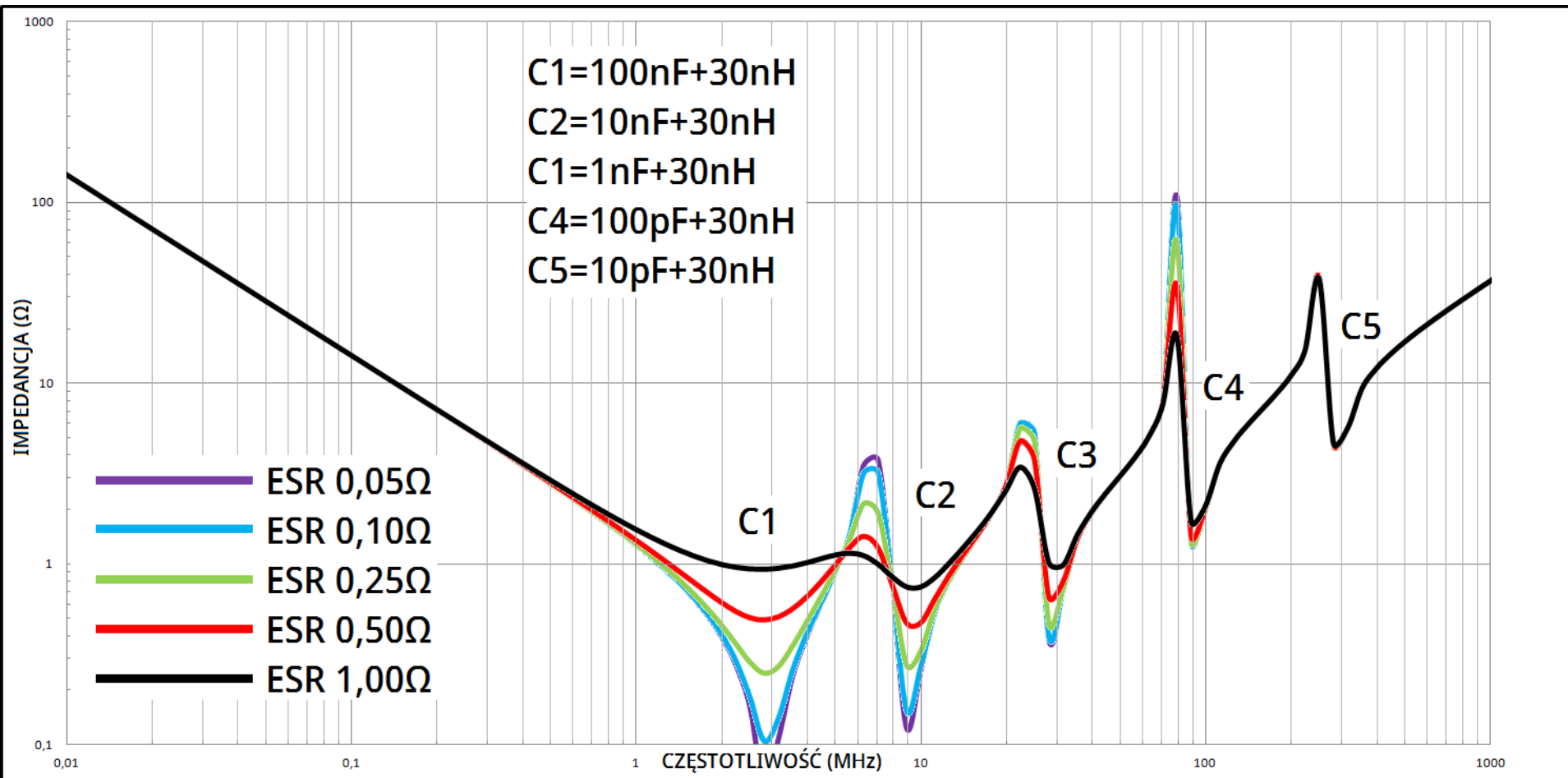
Rezonans płaszczyzn zasilania w powiększeniu



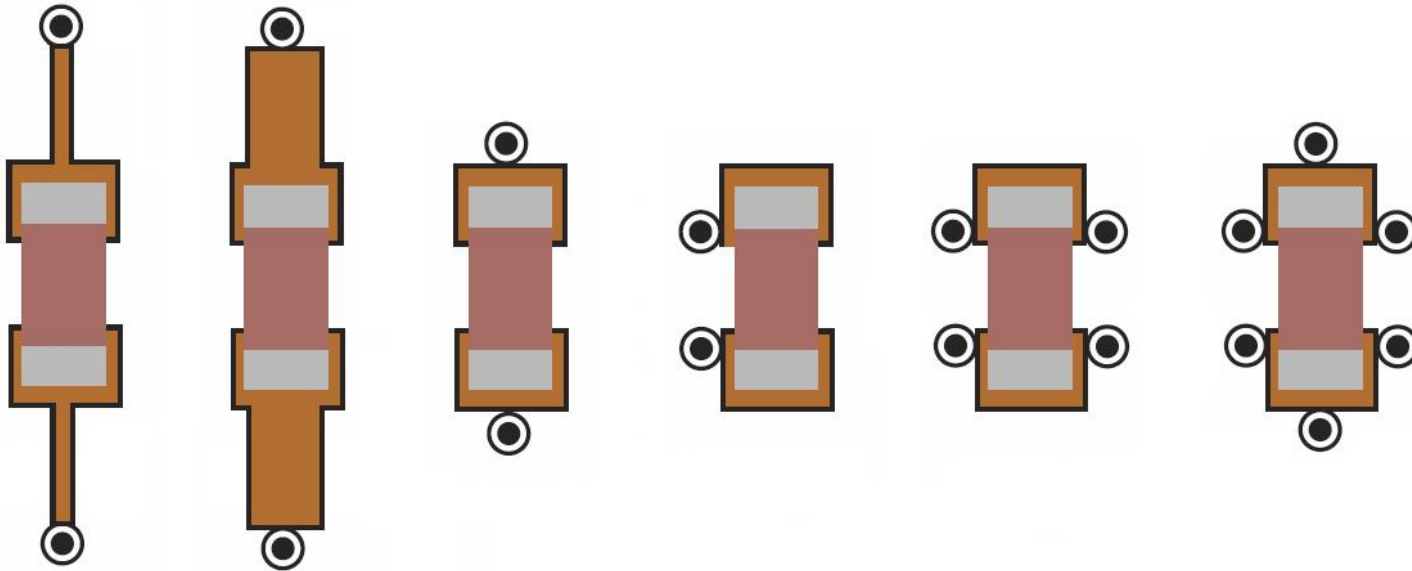
Impedancja kilku równolegle połączonych kondensatorów o różnych wartościach z różnymi wartościami ESL



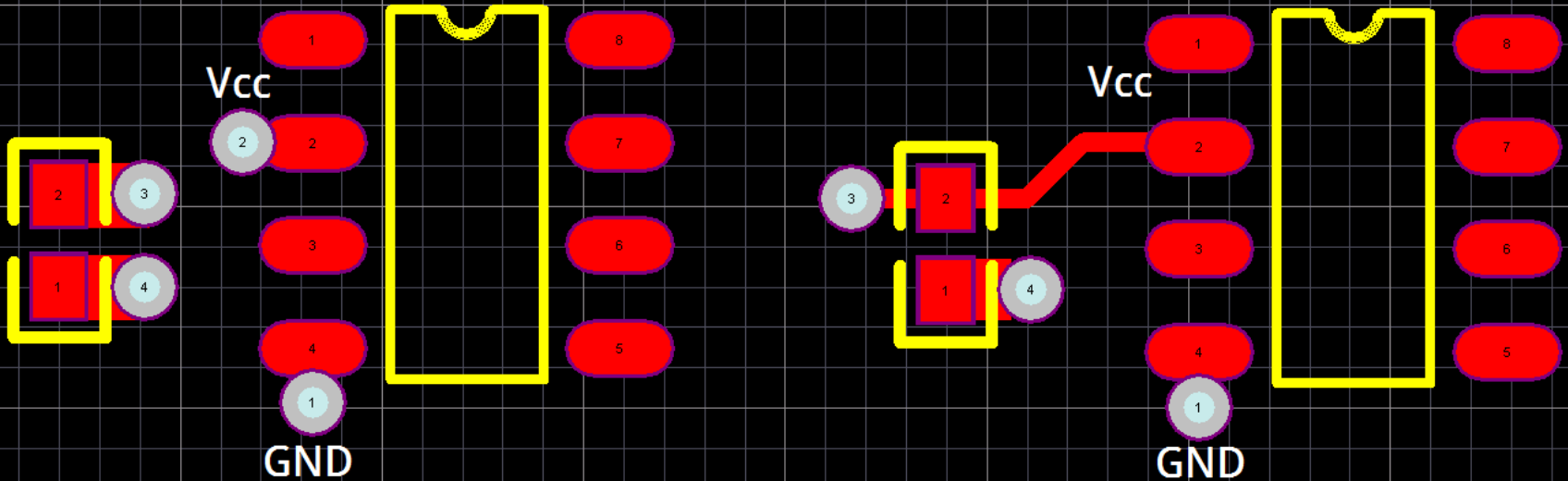
Impedancja kilku równolegle połączonych kondensatorów o różnych wartościach z różnymi wartościami ESR



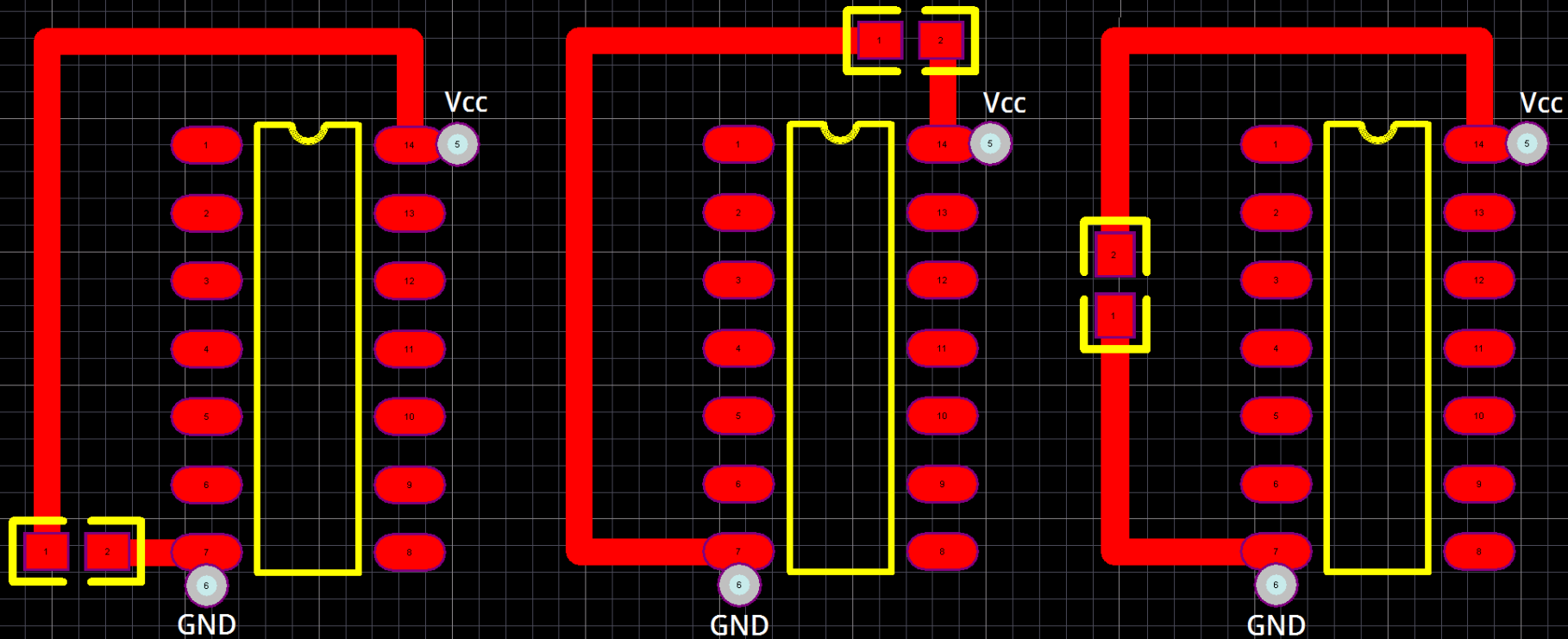
Minimalizacja indukcyjności pętli dzięki odpowiedniemu
montażowi kondensatora odsprężającego.



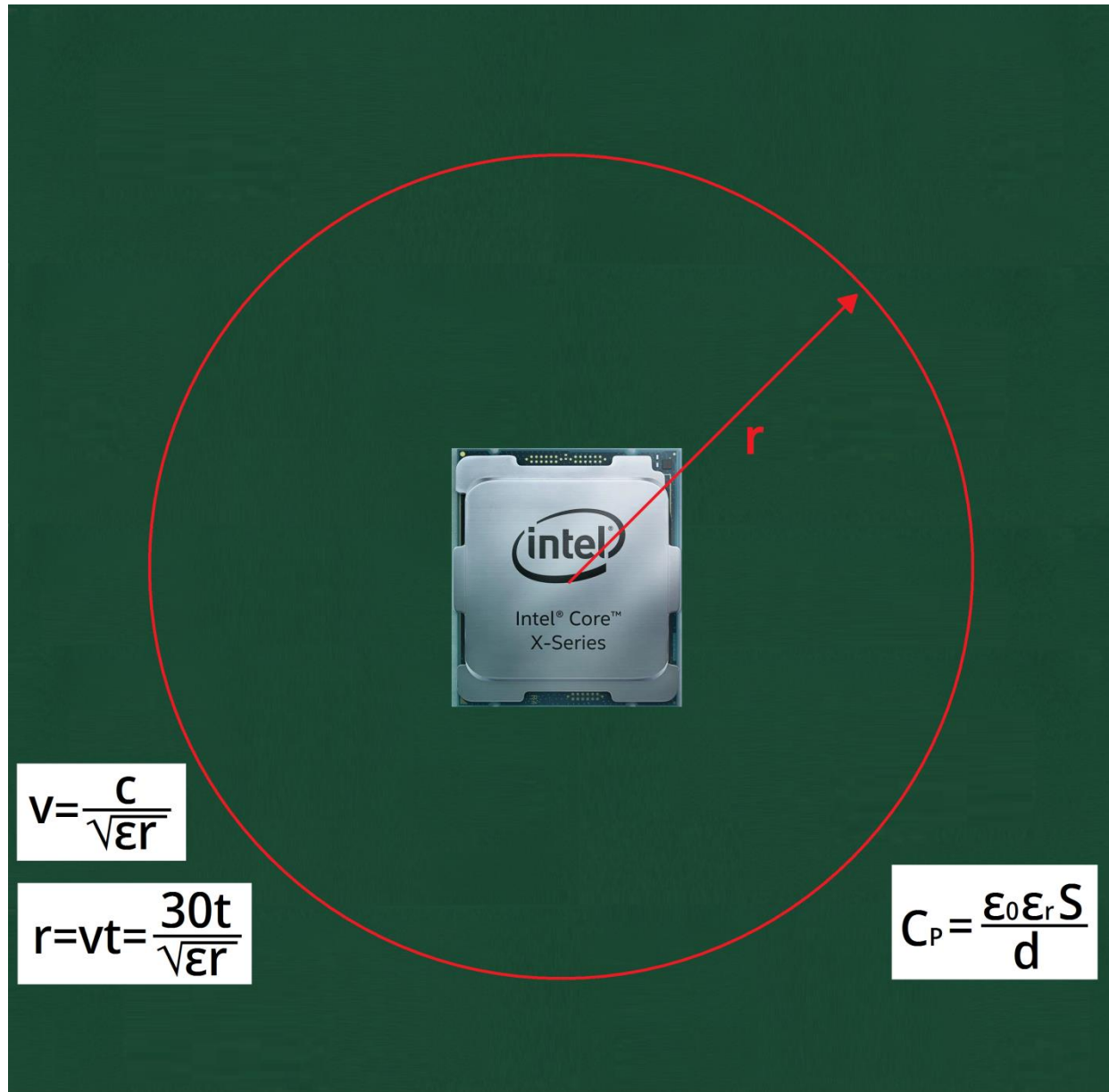
Dwa rodzaje podłączenia kondensatora odsprężającego do cyfrowego układu scalonego, który sposób lepszy?



Przy tej niepolecanej, sztucznie wydłużonej pętli,
sposób umieszczenia kondensatora
odsprężającego nie ma żadnego znaczenia

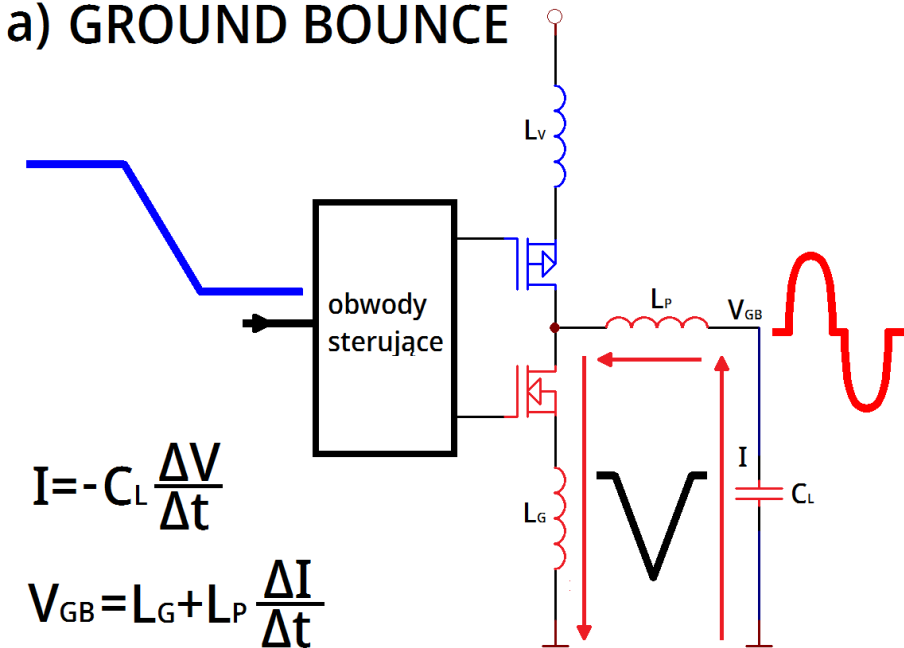


Efektywność pojemności międzypłaszczyznowej w zależności od prędkości propagacji energii EM w dielektryku

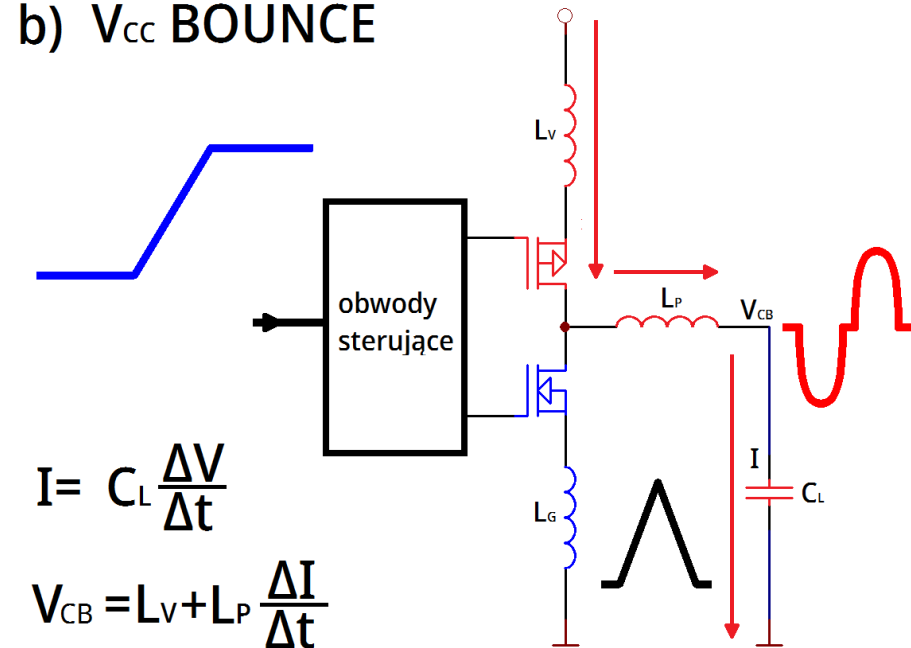


Zjawisko odbicia od płaszczyzn zasilających przy jednoczesnej zmianie w szybkim układzie cyfrowym dużej ilości wyjść na stan przeciwny

a) GROUND BOUNCE

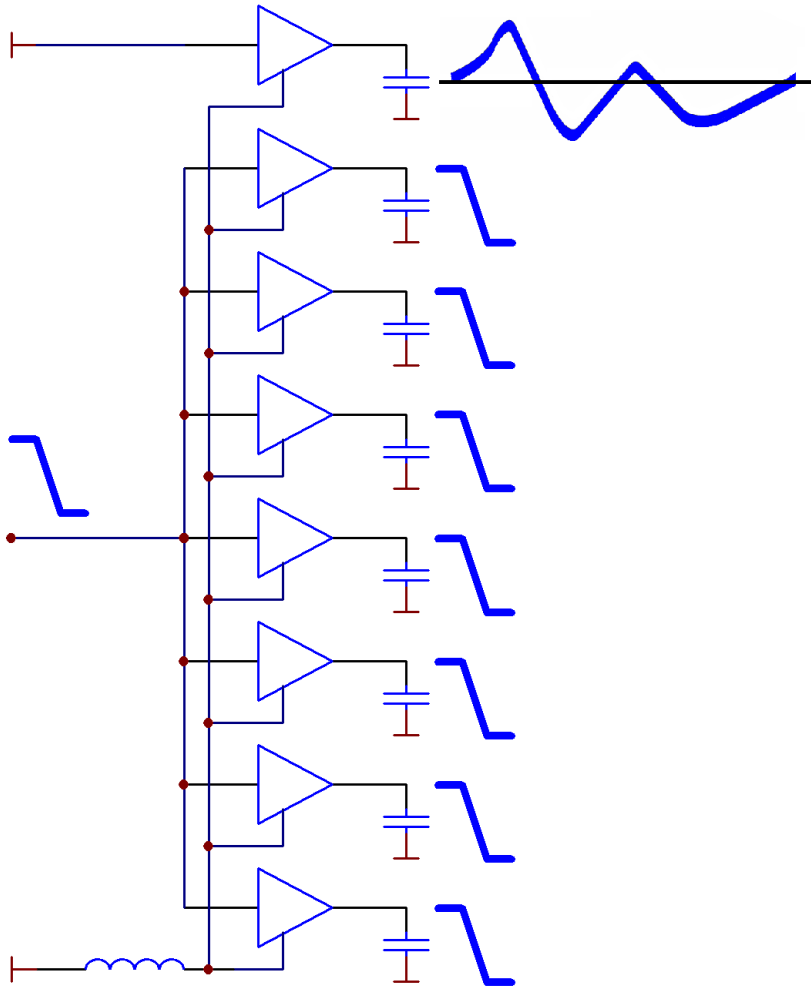


b) V_{CC} BOUNCE

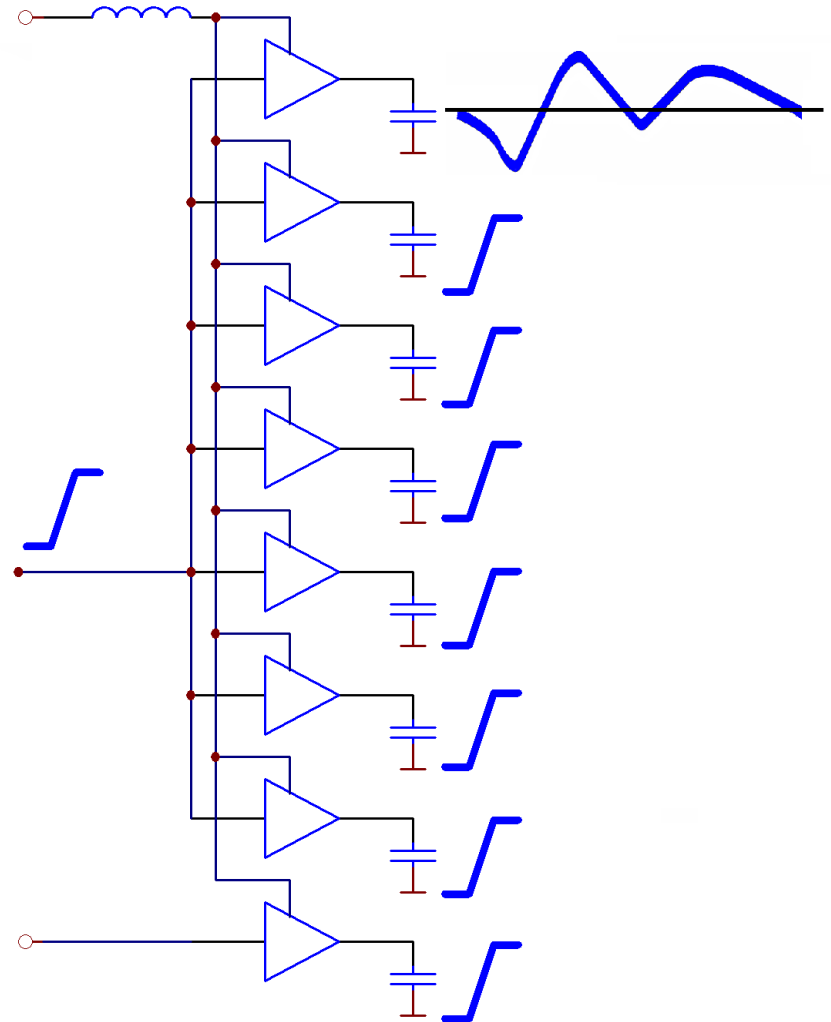


Schemat testowego układu do badania odbić od płaszczyzn zasilających

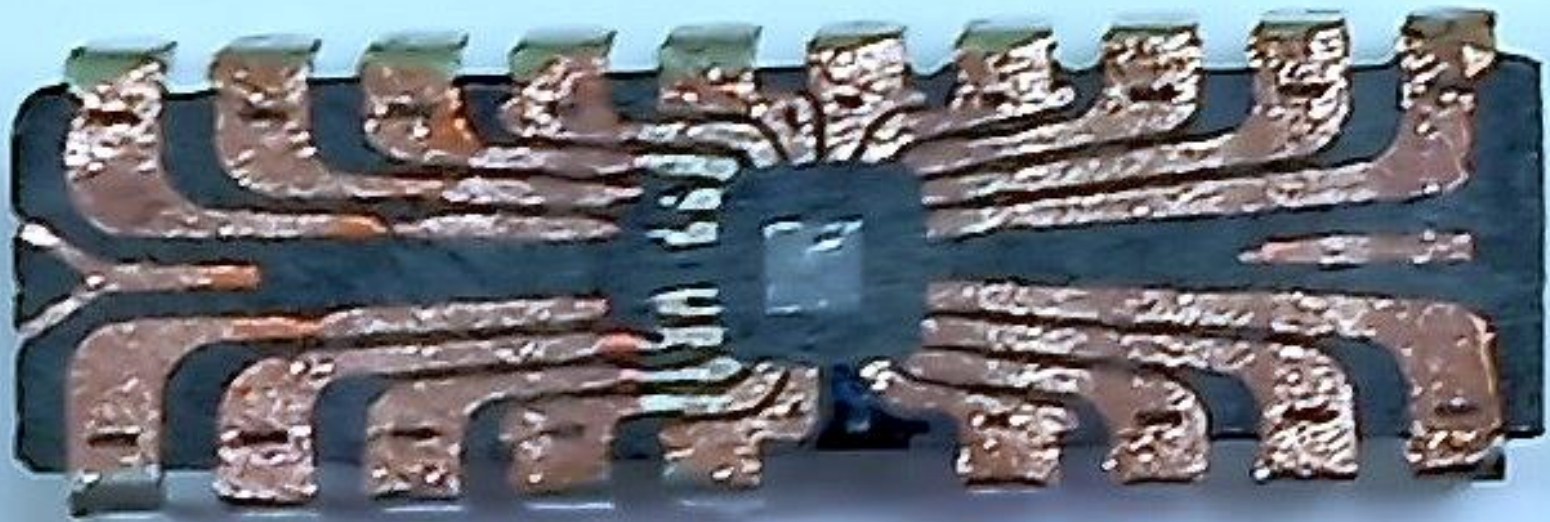
a) GROUND BOUNCE



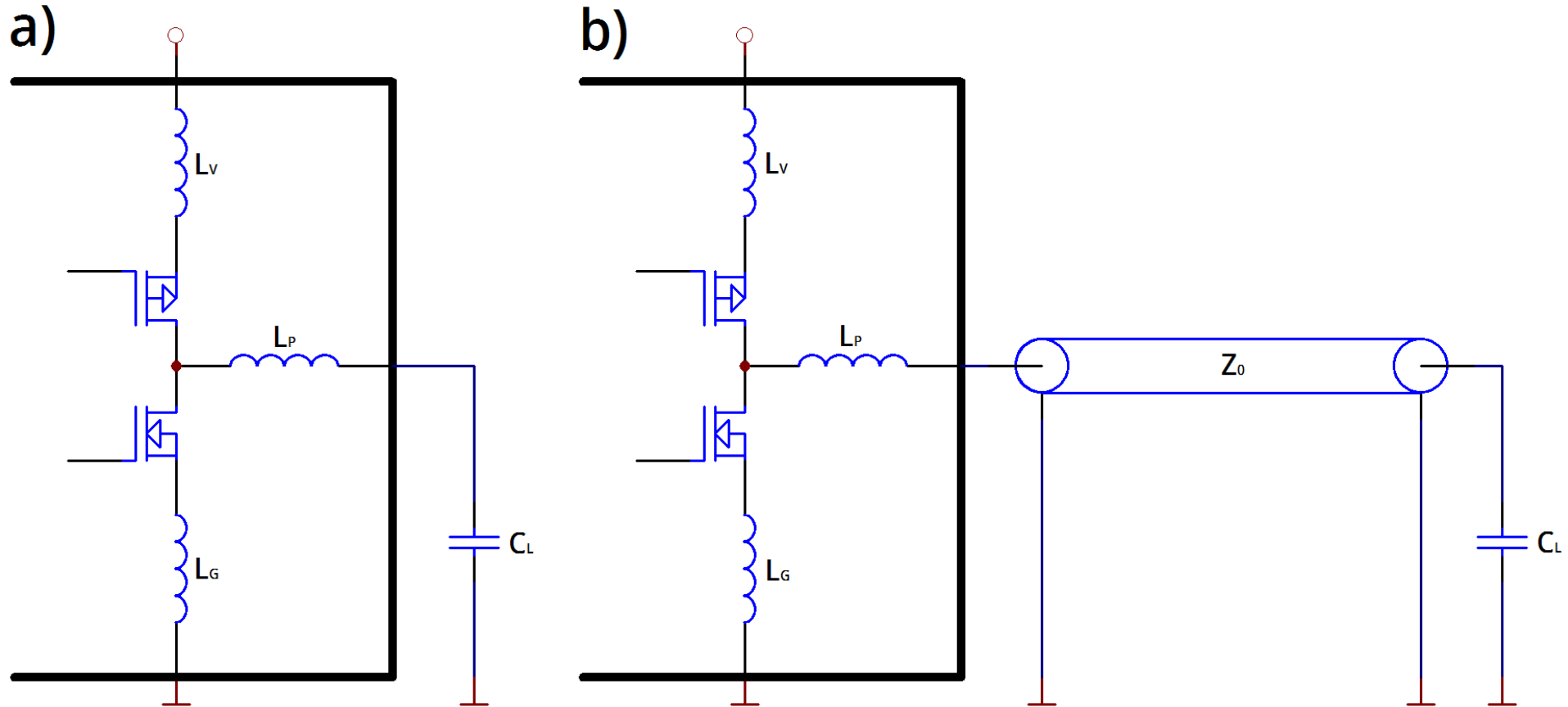
b) V_{CC} BOUNCE



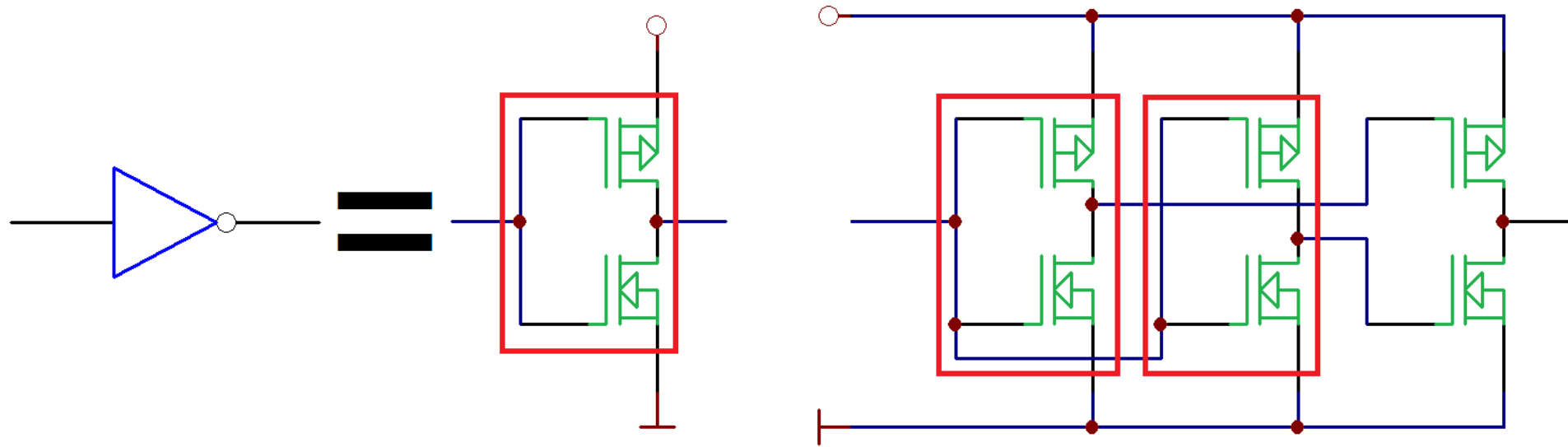
Głównym powodem odbić od płaszczyzn zasilających jest zawsze zbyt duża indukcyjność pętli prądowych



Intensywność odbić od płaszczyzn zasilających, ściśle zależy od rodzaju obciążenia wyjść

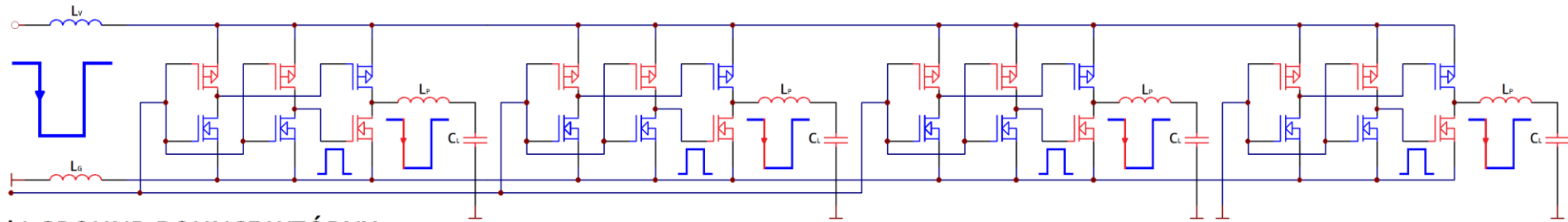


Uproszczona budowa inwertera CMOS

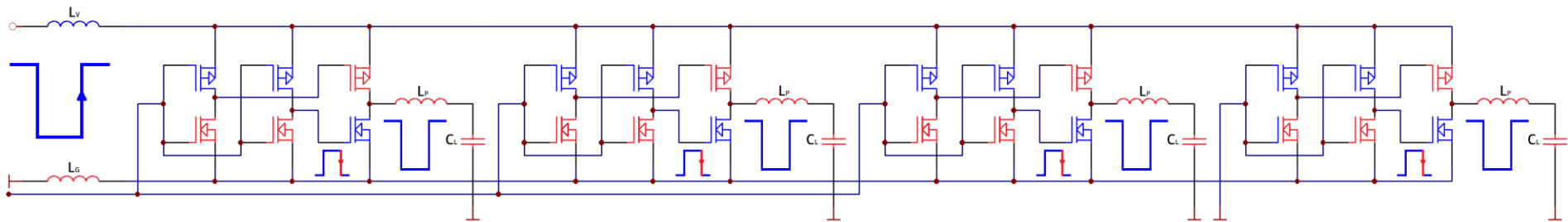


Bardziej szczegółowa analiza GROUNDBOUNCE na przykładzie wielokrotnego bufora CMOS

a) GROUND BOUNCE PIERWOTNY

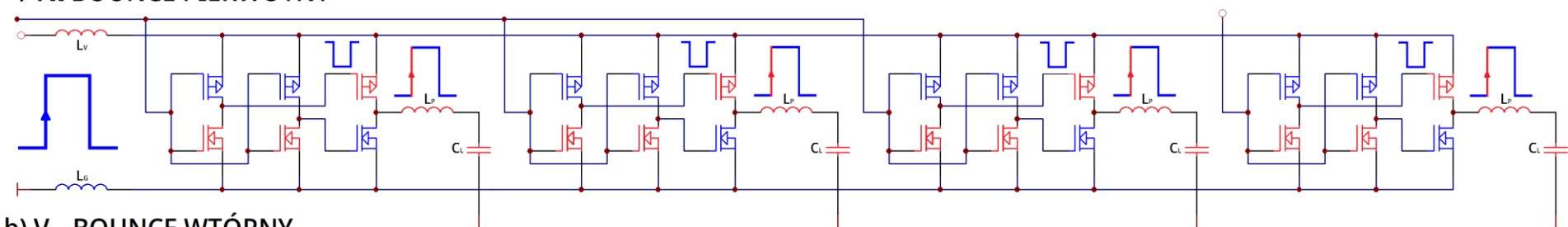


b) GROUND BOUNCE WTÓRNY

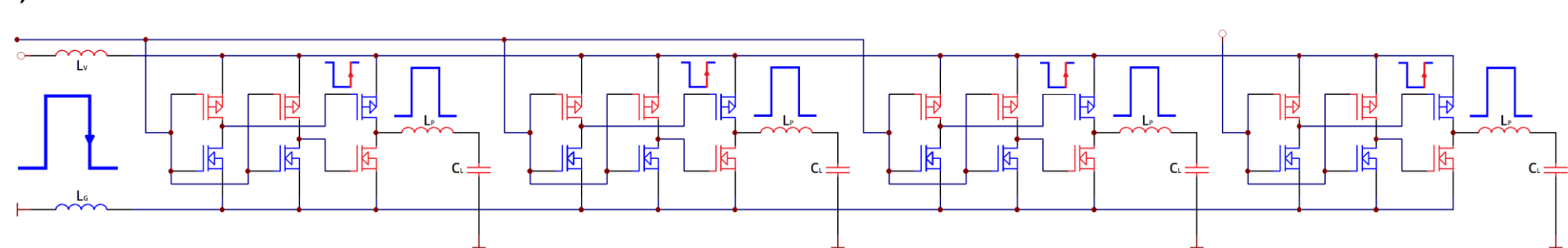


Bardziej szczegółowa analiza VccBOUNCE na przykładzie wielokrotnego bufora CMOS

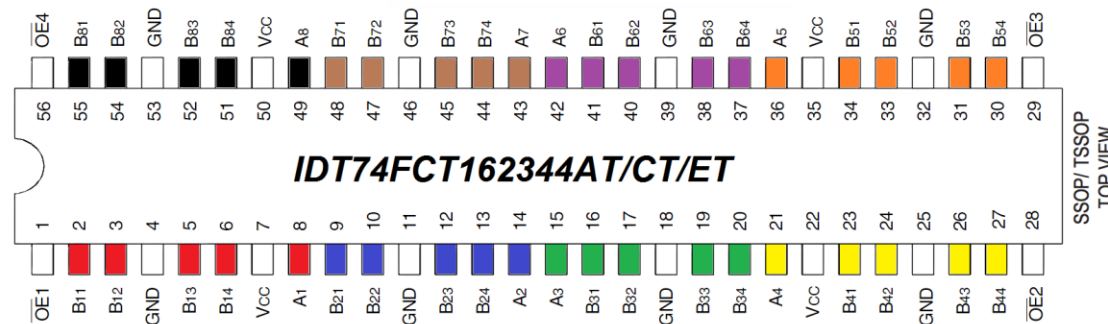
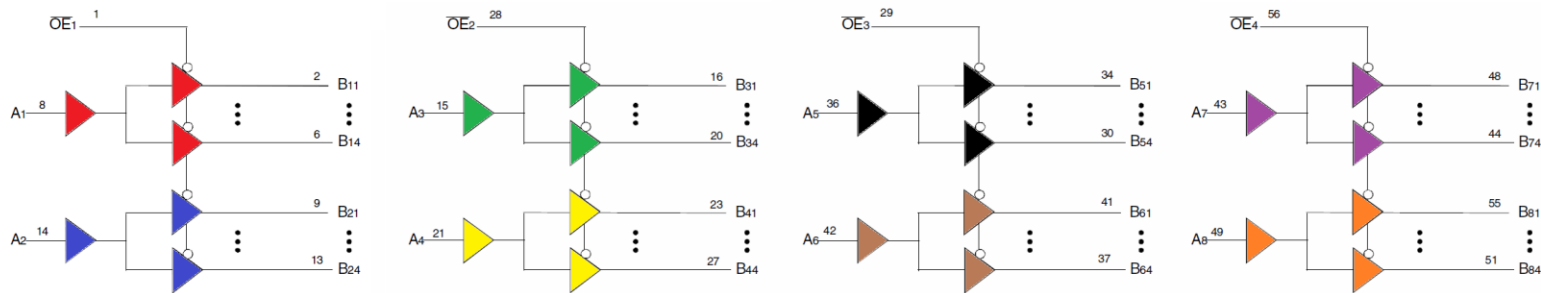
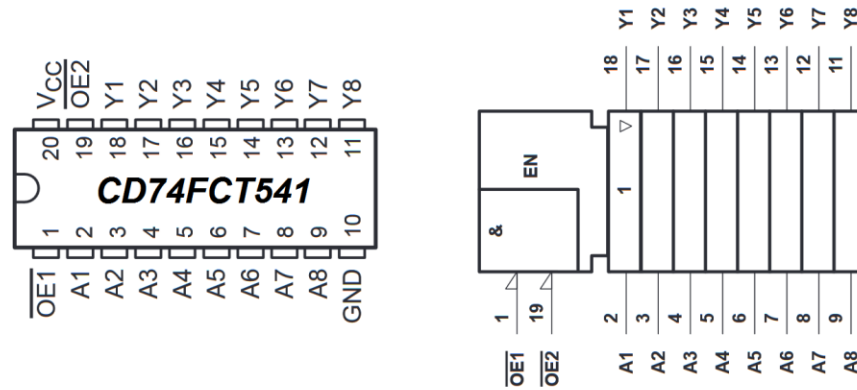
a) V_{CC} BOUNCE PIERWOTNY



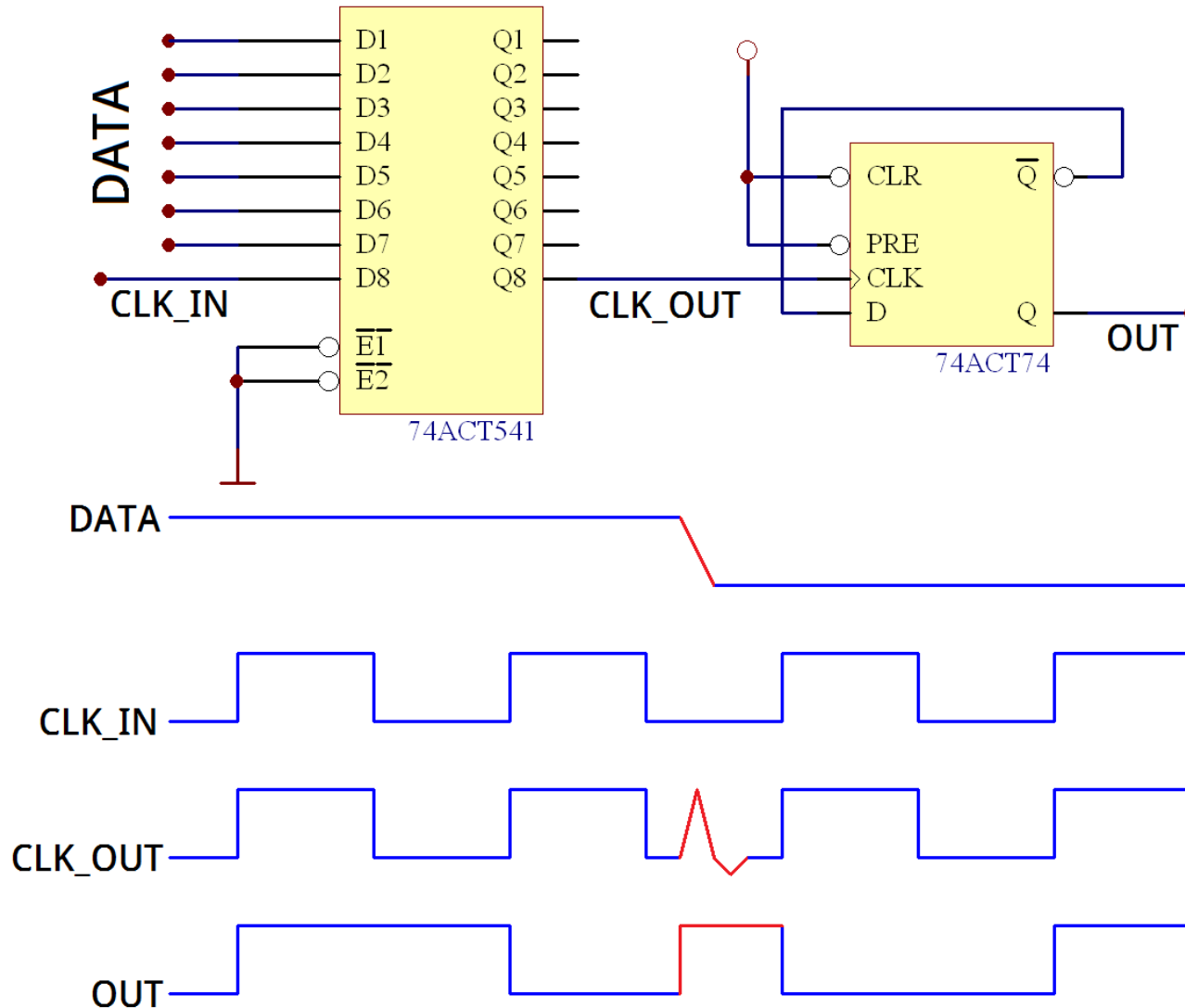
b) V_{CC} BOUNCE WTÓRNY



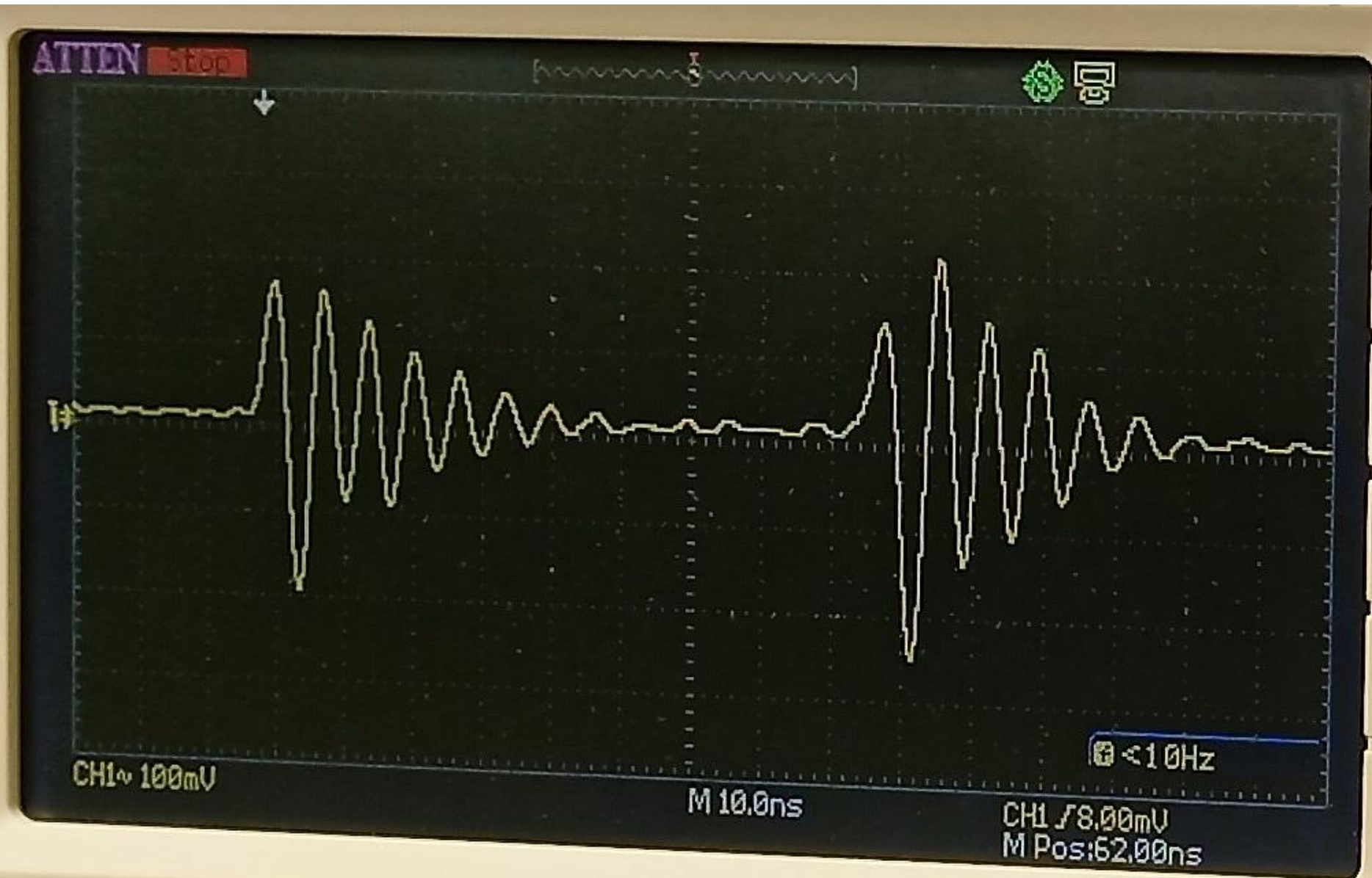
Minimalizacja efektu odbić od płaszczyzn zasilających,
dzięki powieleniu pinów Vcc i GND oraz odpowiednim
rozmieszczeniu wejść i wyjść



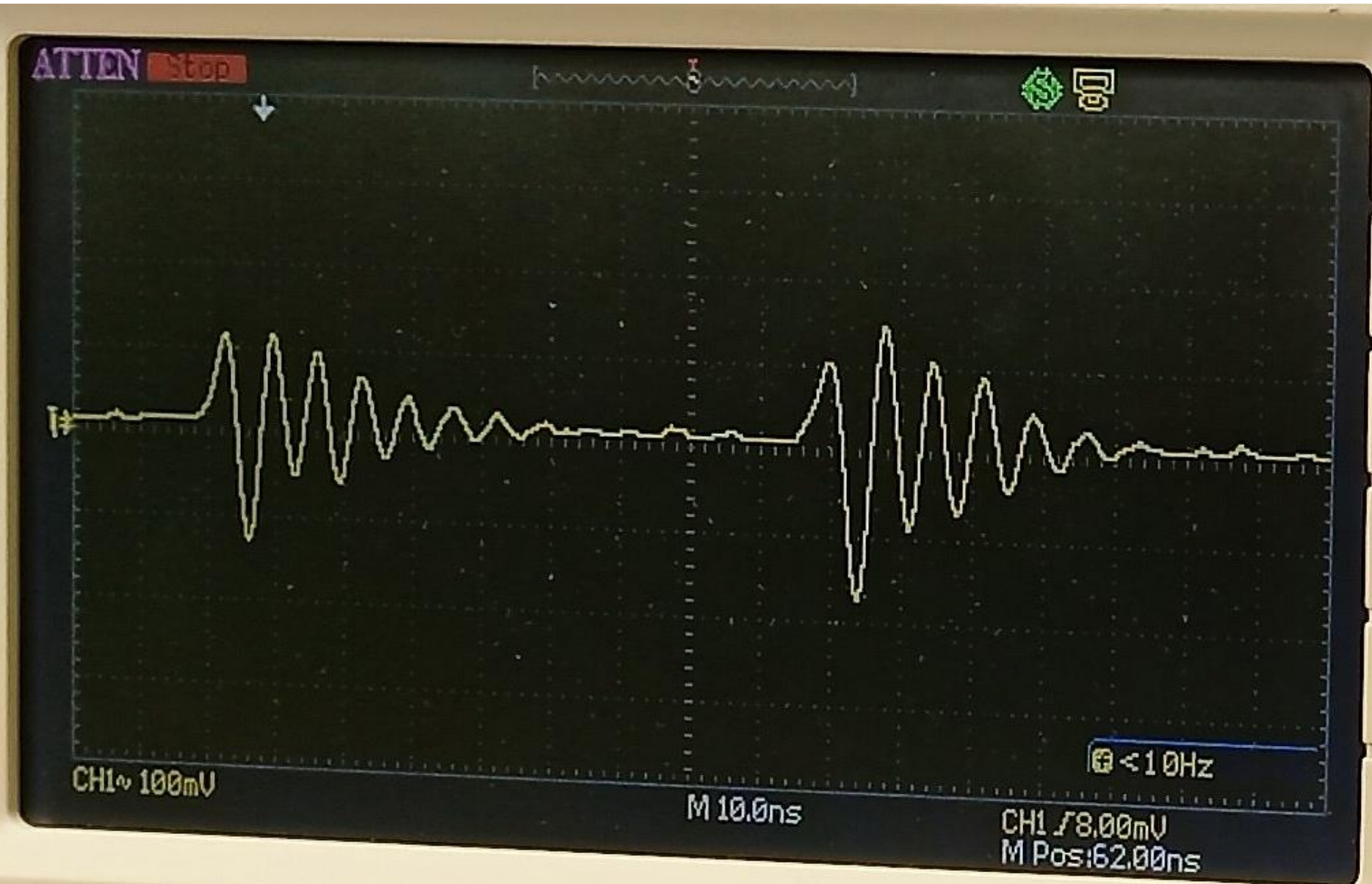
Negatywny efekt zbyt nadmiernych odbić od płaszczyzn zasilających



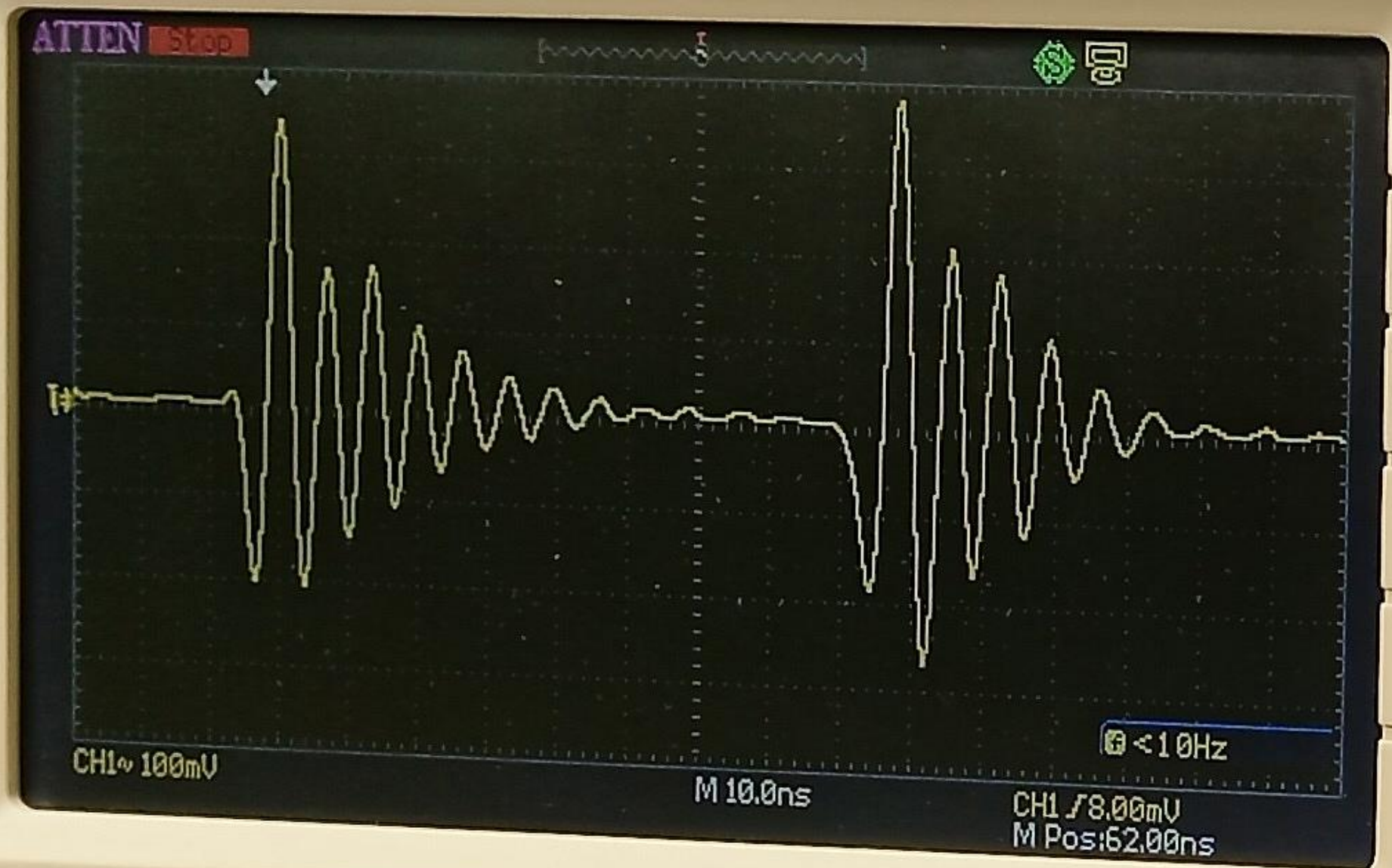
GROUND BOUNCE – ciche wejście = L i najdalej oddalone od pinu GND, obciążenie – pojemność skupiona



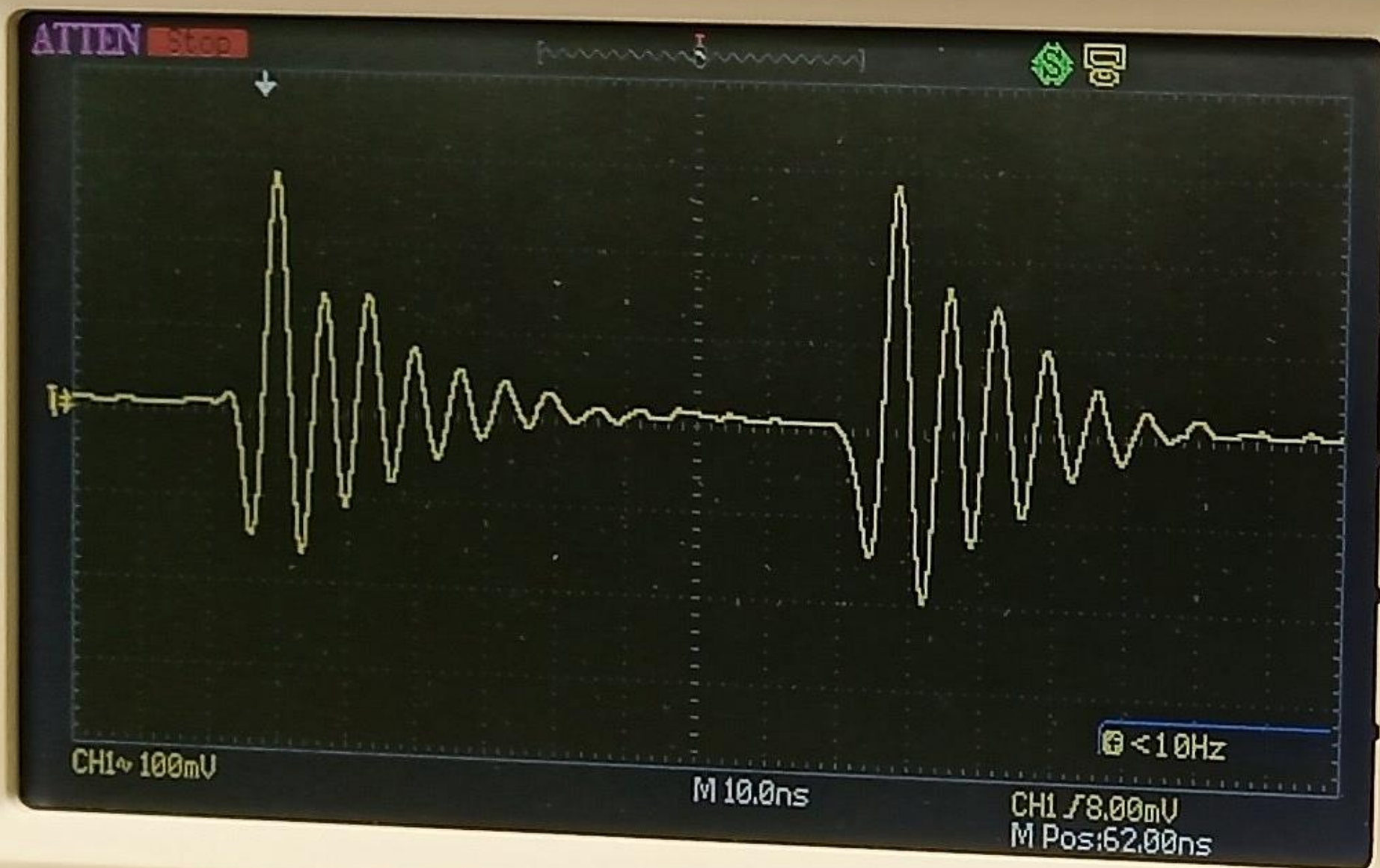
GROUND BOUNCE – ciche wejście = L i najbliższej pinu GND,
obciążenie – pojemność skupiona



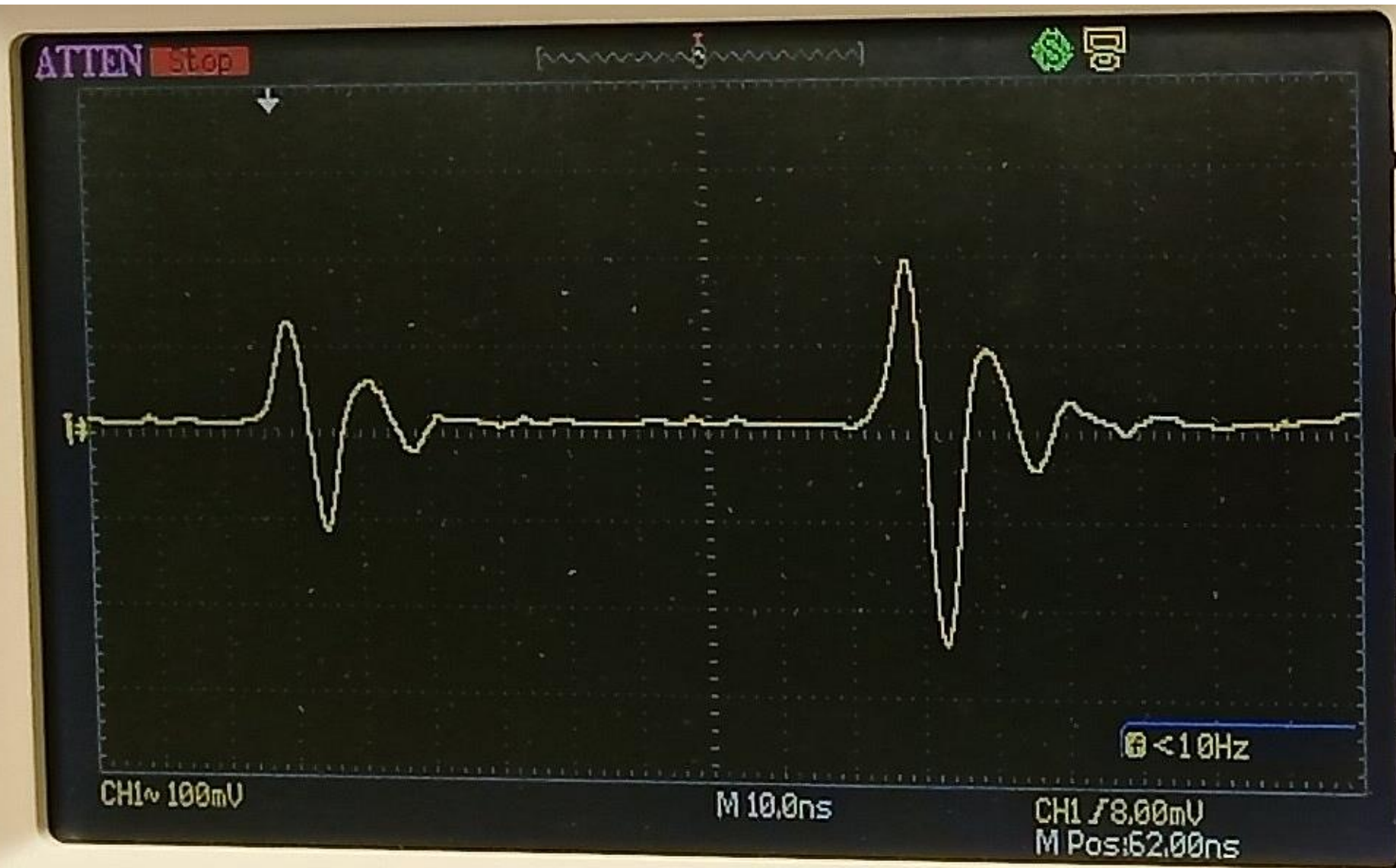
VccBOUNCE – ciche wejście = H i najdalej oddalone od pinu Vcc, obciążenie – pojemność skupiona



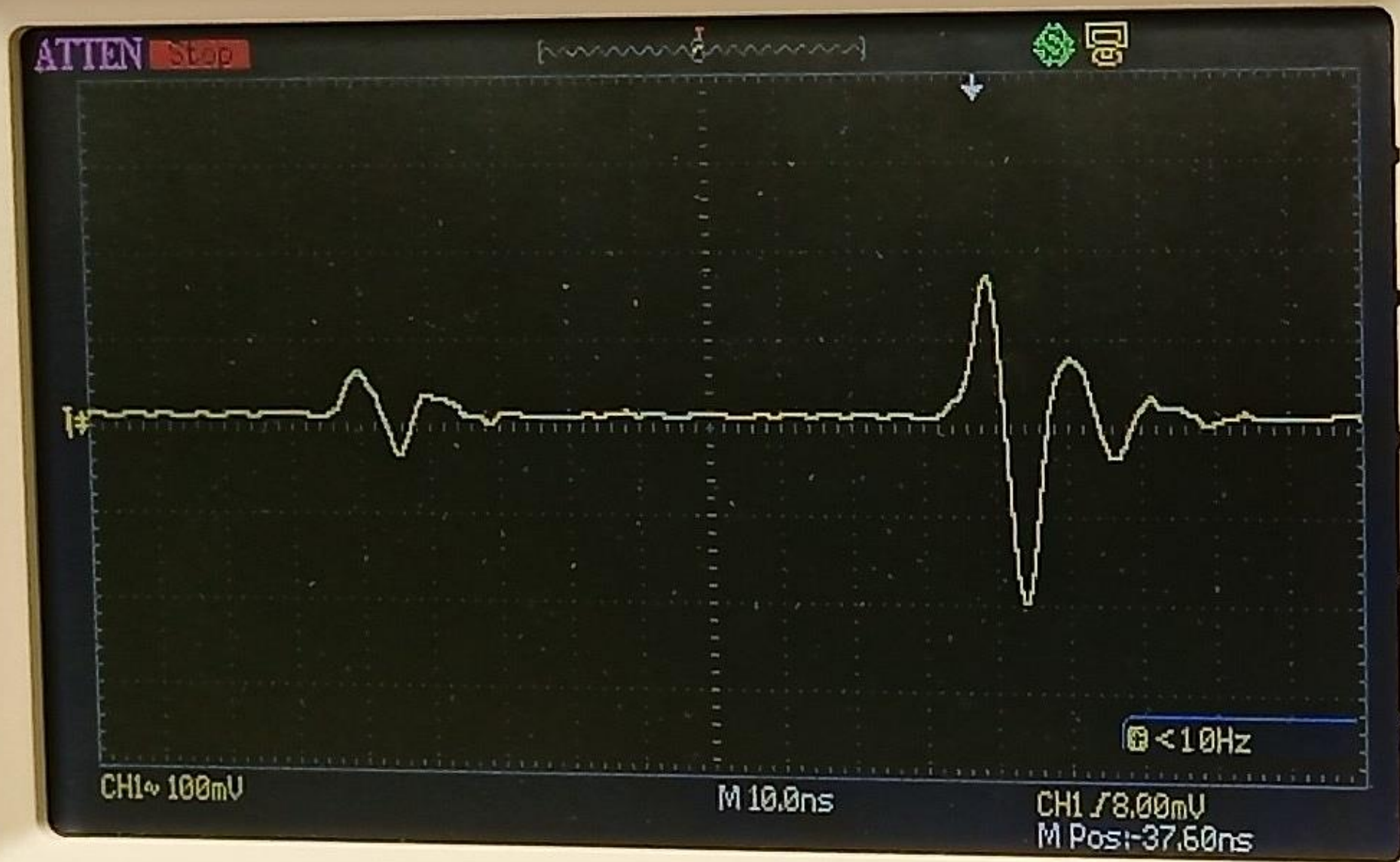
VccBOUNCE – ciche wejście = H i najbliżej pinu Vcc,
obciążenie – pojemność skupiona



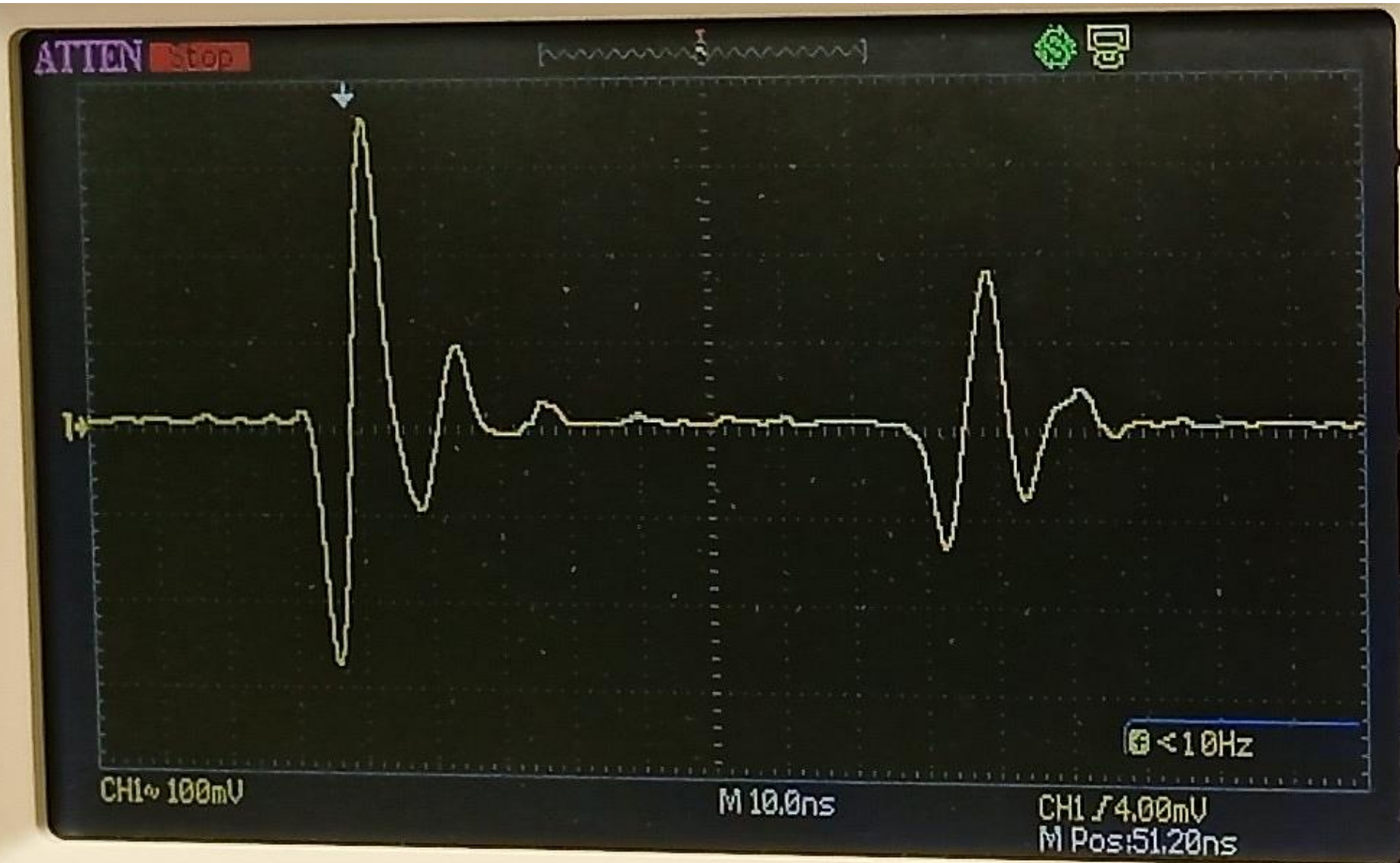
GROUND BOUNCE – ciche wejście = L i najdalej oddalone od pinu GND, obciążenie – linia transmisyjna z szer. termin.



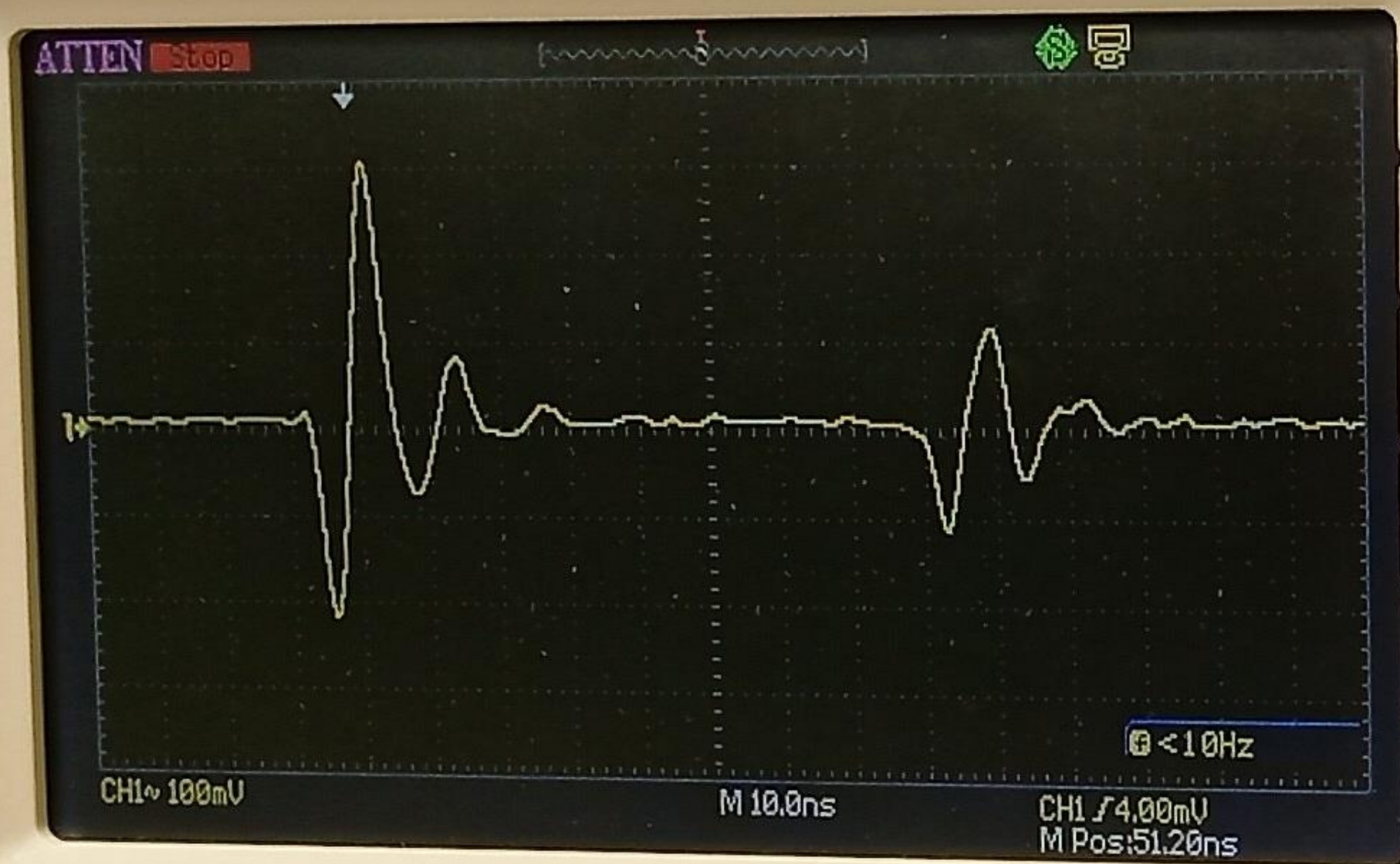
GROUND BOUNCE – ciche wejście = L i najbliżej pinu GND,
obciążenie – linia transmisyjna z szer. termin.



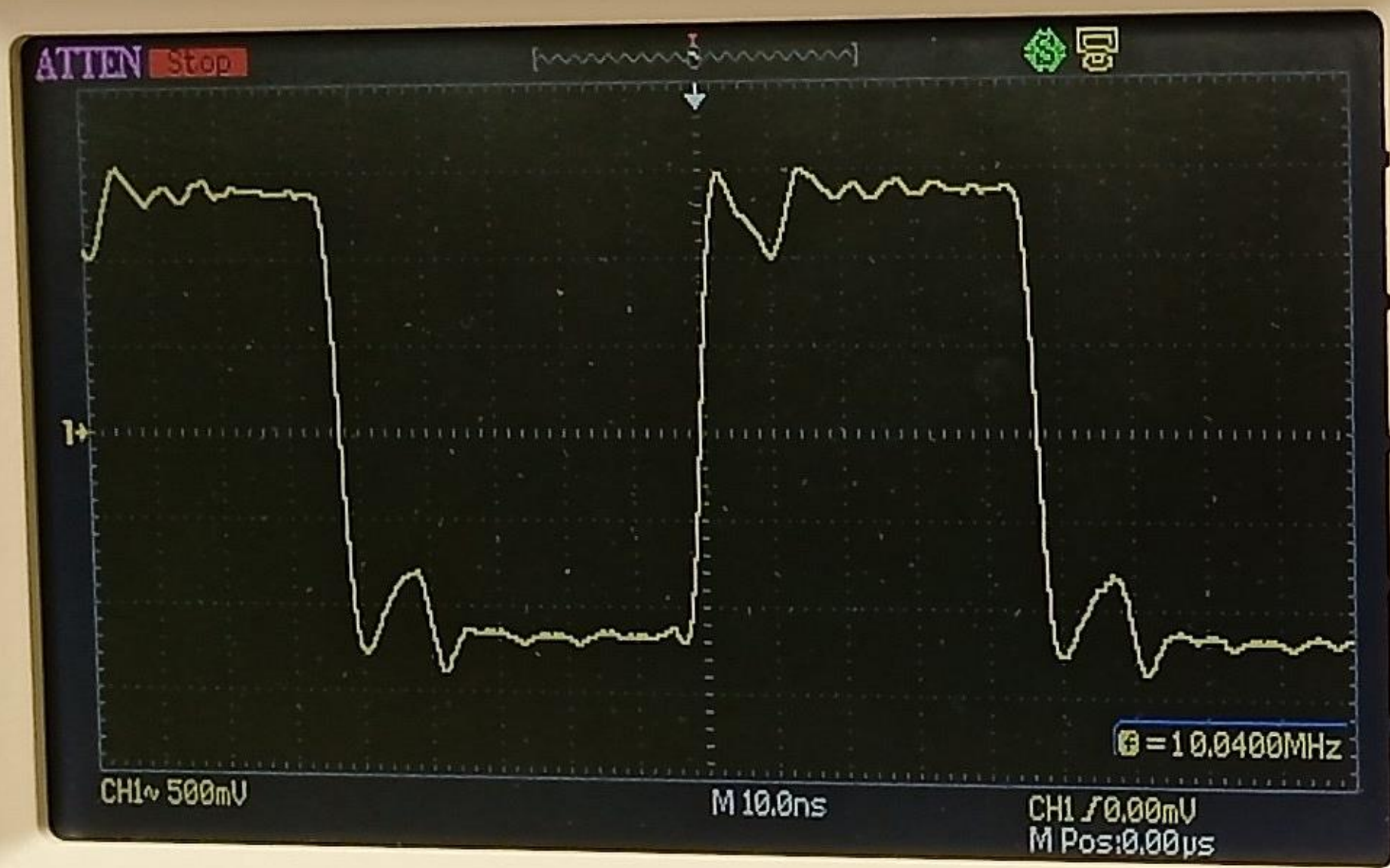
VccBOUNCE – ciche wejście = H i najdalej oddalone od pinu Vcc, obciążenie – linia transmisyjna z szer. termin.



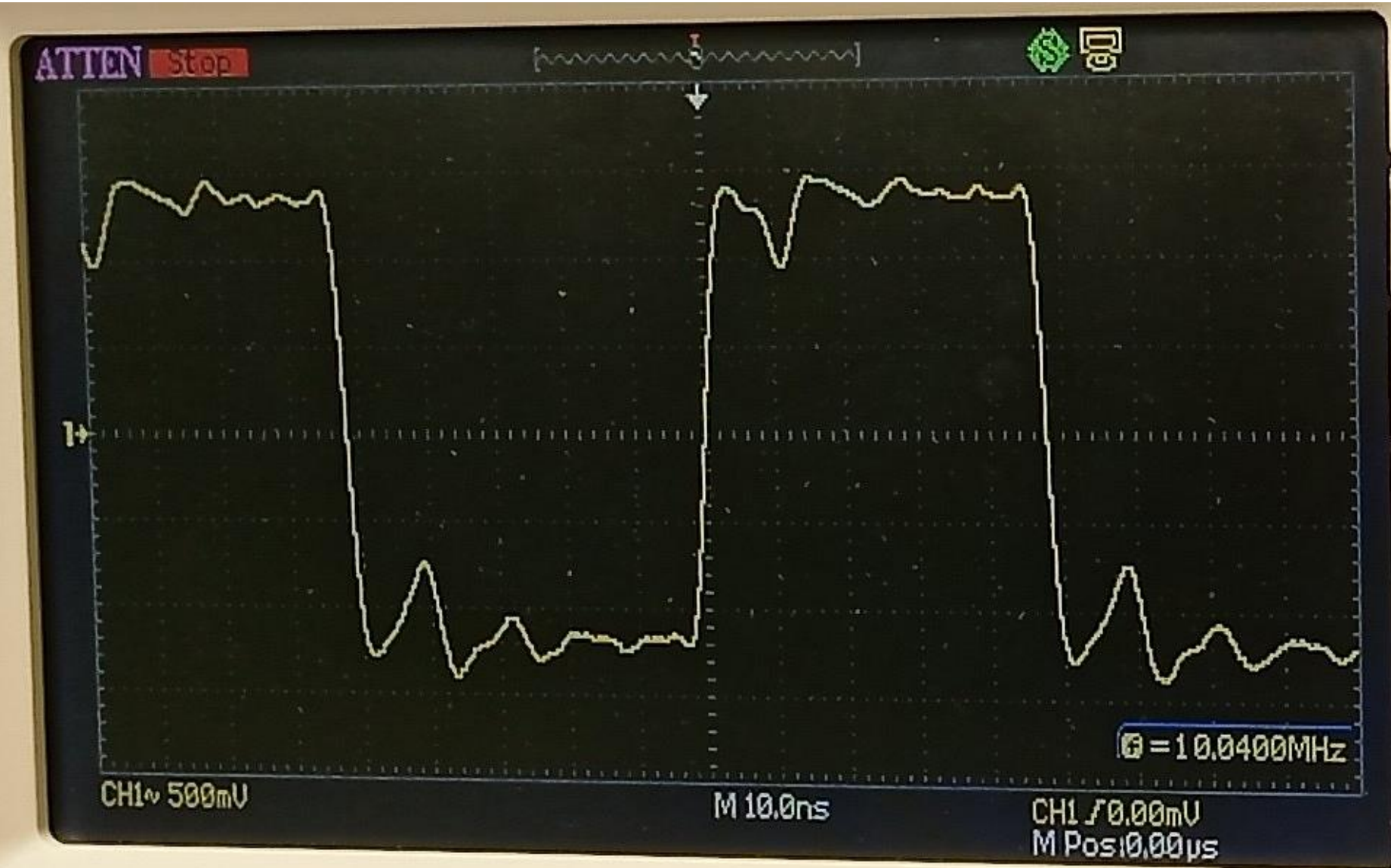
VccBOUNCE – ciche wejście = H i najbliżej pinu Vcc,
obciążenie – linia transmisyjna z szer. termin.



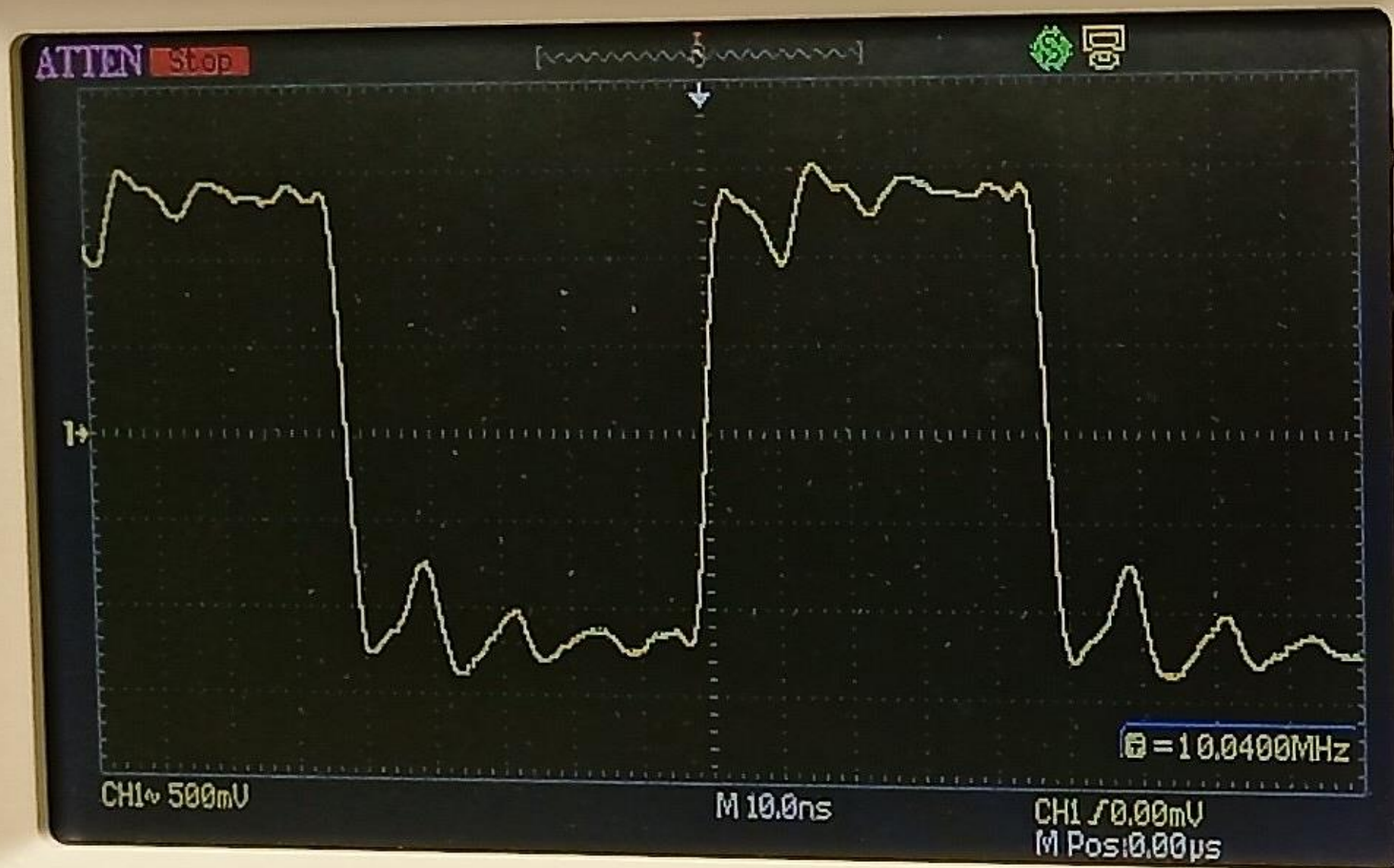
Przebieg z generatora 10MHz na wyjściu bufora 74ACT541_THT (bez podstawki) najdalej od pinu GND. Pozostałe 7 pinów wejściowych przyłączonych do masy. Odsprężanie: 3×47uF_0603



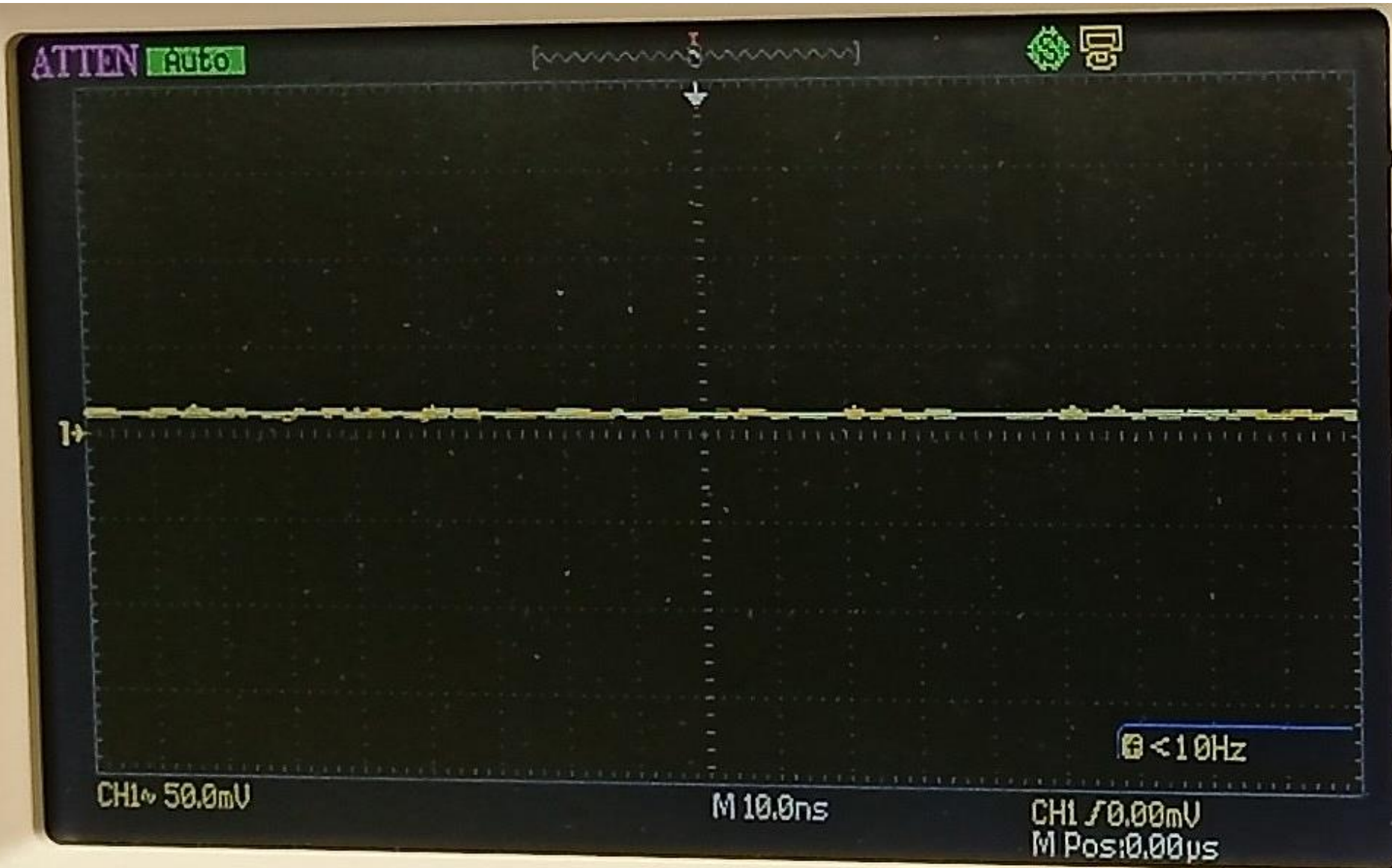
Przebieg z generatora 10MHz na wyjściu bufora 74ACT541_THT (z podstawką) najdalej od pinu GND. Pozostałe 7 pinów wejściowych przyłączonych do masy. Odsprzęganie: $2 \times 22\mu\text{F}_{0603} + 100\text{nF}_{\text{THT}}$



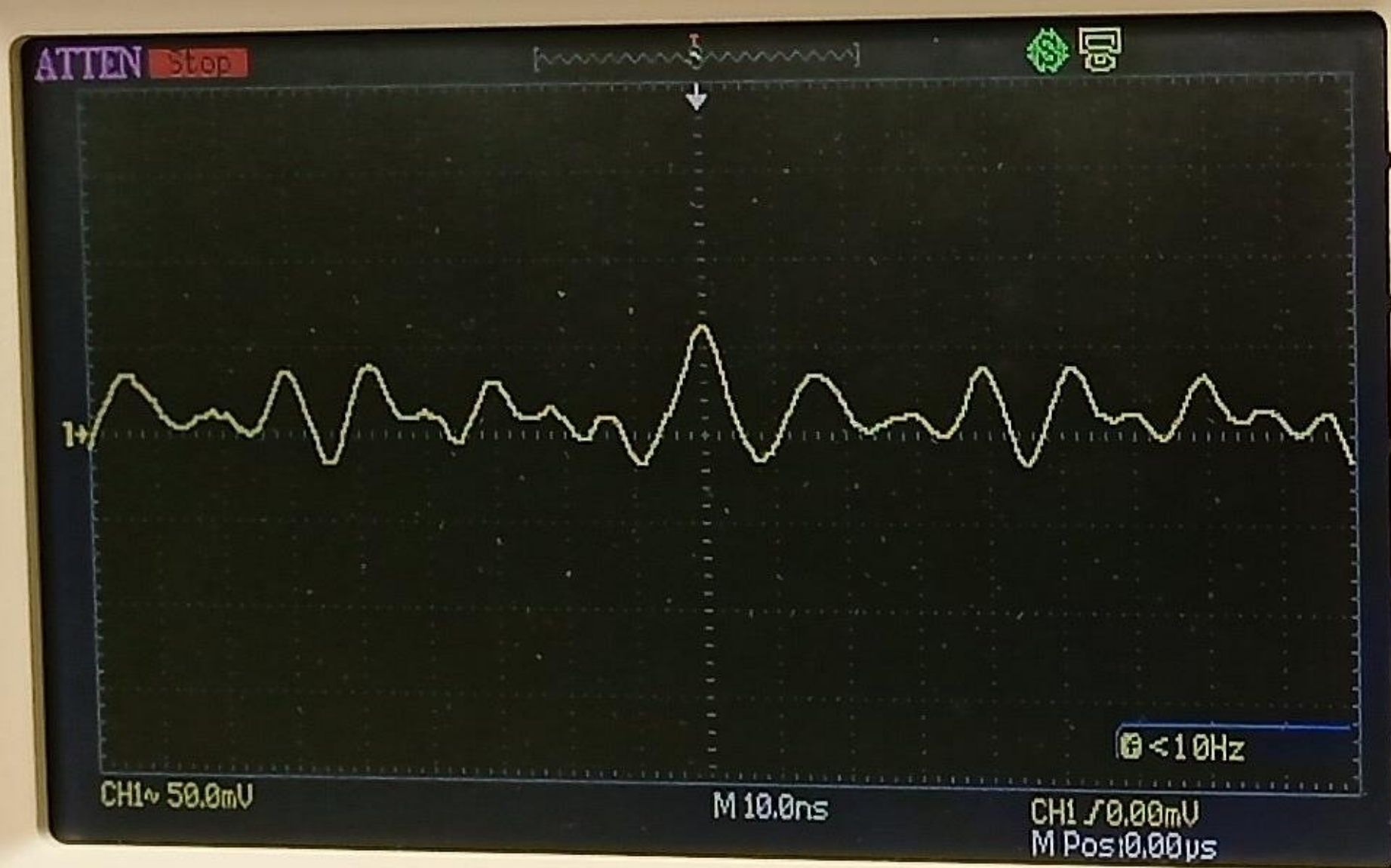
Przebieg z generatora 10MHz na wyjściu bufora 74ACT541_THT (z podstawką) najdalej od pinu GND. Pozostałe 7 pinów wejściowych przyłączonych do masy. Odsprężanie: 100nF_THT w głównej gałęzi



Badanie pinów zasilających najdalszego układu 74ACT14 przy aktywnym generatorze 10MHz podłączonym do wejść innych układów.
Odsprężanie 74ACT14: 2×22uF_0603+100nF_THT



Badanie pinów zasilających najdalszego układu 74ACT14 przy aktywnym generatorze 10MHz podłączonym do wejść innych układów.
Odsprężanie 74ACT14: brak (tylko główna gałąź 100nF_THT)



WIEDZA+WYOBRAŹNIA=

FANTAZJA

**Dziękuje za uwagę
Rafał Wiśniewski**