

Problemy asymetrii napięciowej baterii kondensatorów wielkoczęstotliwościowych stosowanych przy grzaniu indukcyjnym

Streszczenie. W pracy przedstawiono powstawanie asymetrii napięciowej baterii kondensatorów wysokoczęstotliwościowych stosowanych przy grzaniu indukcyjnym. Na podstawie symulacji i pomiarów napięć na kondensatorach rzeczywistych banków kondensatorów wykazano, że dla takich systemów jednorodne napięcia na wszystkich elementach uzyskiwane są tylko dla konkretnych rozwiązań projektowych. Po zamodelowaniu baterii, na podstawie obliczeń symulacyjnych pokazano do czego taki stan prowadzi.

Abstract. The work presents the formation of voltage asymmetry of high frequency capacitor banks used in induction heating. Based on simulations and measurements voltages on real capacitors of capacitor's banks, it has been shown that for such systems, uniform voltages on all components are obtained only for specific design solutions. After the modeling of the battery, based on the simulation calculations, this is what the state shows. (**Problems of voltage asymmetry of high frequency capacitor banks used for induction heating**).

Słowa kluczowe: grzanie indukcyjne, kondensatory wysokoczęstotliwościowe, bateria kondensatorów, zapobieganie problemom asymetrii napięć.

Keywords: Induction heating, high frequency capacitors, capacitor banks, prevention of asymmetric voltage problems.

Wstęp

Kondensator jest jednym z najwcześniej wymyślonych i wykonanych przez człowieka elementów obwodów elektrycznych. W styczniu 1746 roku matematyk, filozof, lekarz i astrolog Pieter van Musschenbroek (ur.1692r.;zm.1761r.) i jego asystent laboratoryjny Andreas Cuneus (ur.1712r.;zm.1778r.) w Leyden w Holandii wynaleźli i zbudowali pierwszy kondensator zwany „butelką lejdejską” („Leyden jar”) [1]. Była to folia metalowa przedzielona dielektrykiem umieszczona w słoiku szklanym przypominającym kształtem butelkę. Odpowiednio połączone butelki lejdejskie tworzyły „baterie”, których elementy mogły być połączone szeregowo albo równolegle. Butelkę lub ich baterię można było napęczyć ładunkiem elektrostatycznym za pomocą maszyny elektrostatycznej z obracaną kulą odlaną z siarki, wynalezioną w 1662 roku przez niemieckiego fizyka i budowniczego Otto von Guericke (ur.1602r.;zm.1686r.). Doświadczenia z udziałem baterii butelek lejdejskich były niebezpieczne dla życia osób je wykonujących. Niemiecki prawnik, uczonec Ewald Jürgen Georg von Kleist (ur.1700r.;zm.1748r.), w latach 1722 - 1747 dziekan katedry w Kamieniu Pomorskim, był drugim niezależnym wynalazcą butelki lejdejskiej, którą zbudował już w listopadzie 1745 roku, jednak wynalazek przypisany został do Leyden miasta pierwszego z wymienionych wynalazców. Jeszcze na przełomie XVIII i XIX wieku butelki lejdejskie stosowane były przez fizyków do prowadzenia badań.

Na ziemiach polskich pierwsze kondensatory zastosowane były w telekomunikacji kolejowej, podczas budowy linii telegrafów kolejowych na Drodze Żelaznej Warszawsko-Wiedeńskiej przez firmę „Siemens & Halske” z Berlina w 1852 roku [2]. Prąd powstający w linii telegrafu w czasie wyładowania atmosferycznego był prądem chwilowym szybkozmiennym, zmieniającym swój kierunek i zwrot. Napięcie elektryczne wyładowania było znaczne i dochodziło do miliona woltów. Natomiast prąd telegraficzny jest prądem stałym przerywanym, to znaczy płynącym z przerwami lecz stale w jednym kierunku. Galwaniczne źródła prądu telegraficznego posiadały niewielkie napięcie. W celu zabezpieczenia linii przed uszkodzeniem należało wyindukowany prąd atmosferyczny w linii skierować wprost do ziemi w taki sposób aby nie został uszkodzony cenny aparat telegraficzny. Prąd elektryczny zwykle przepływa

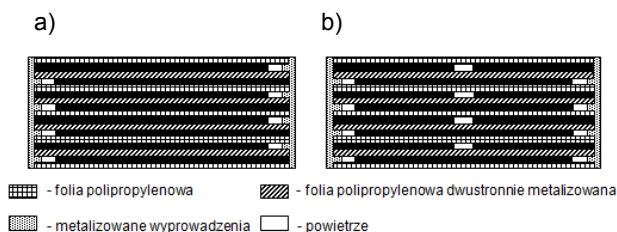
drogą najmniejszego oporu. Prąd telegraficzny przepływał przez uzwojenia elektromagnesu i cewek, które stanowiły dla niego niewielki opór (rezystancję). Dla prądu wielkoczęstotliwościowego powstającego w linii w wyniku wyładowania atmosferycznego, uzwojenie elektromagnesu i cewka stanowiły wielką wartość oporu indukcyjnego (dużą reaktancję indukcyjną). Dlatego do odprowadzenia tego prądu do ziemi, zastosowano kondensator, który dla prądu wysokiej częstotliwości stanowił niewielki opór (małą reaktancję pojemnościową). Kondensator ten miał jedną okładkę połączoną do przewodem linii telegraficznej, drugą uziemioną za pomocą prowadzonego po drewnianym słupie płaskownika (bednarki) o dolnym końcu zakończonym płytą zakopaną w ziemi poniżej głębokości zamarzania gruntu. Jako kondensatory, zawieszane na słupach telegraficznych stosowano dwie metalowe prostokątne płytki przedzielone warstwą jedwabiu, prostokątne płyty węglowe przedzielone dziurkowanymi cienkimi płytkami wykonanymi z miki lub dwie metalowe płytki oddzielone cienką warstwą powietrza, które na stronach wewnętrznych posiadają warstwę nacięć o ostrych brzegach [3]. Działanie odgromnika było proste. Prąd wyładowania atmosferycznego szukając drogi przejścia trafiał na kondensator stawiający mały opór, przepływał przez niego i po bednarce przytwierdzonej do słupa spływał do ziemi. Ze względu na budowę kondensatorów tego typu stosowanych w połowie dziewiętnastego wieku na telegrafii kolejowej, przyjęto jego schemat graficzny w postaci dwóch równoległych kresek odzwierciedlających okładki (płytki) oraz umieszczonych po bokach tych kresek, symbolicznych doprowadzeń (rys. 3 a).

Współczesne kondensatory w układach wielkiej częstotliwości

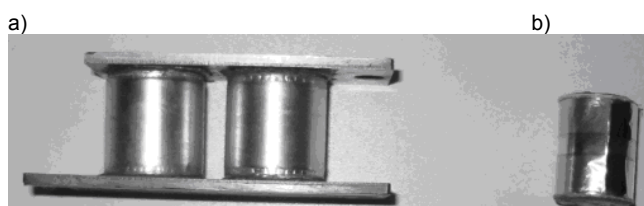
W energoelektrycznych układach wielkoczęstotliwościowych stosowanych do grzania indukcyjnego, wykorzystane są przede wszystkim kondensatory niepolaryzowalne (to znaczy że biegunowość podłączenia nie odgrywa roli) takie jak: mikowe, tworzywowe i ceramiczne. Od kondensatorów budujących takie układy energoelektryczne najczęściej oczekuje się: niskich strat w obszarze przenoszonych częstotliwości przez cały okres pracy, dużej liniowości charakterystyki (izolatory używane do budowy takich kondensatorów nie mogą być nieliniowe)

oraz wysokiej stabilności termicznej. W przypadku kondensatorów używanych we współczesnych obwodach wielkiej częstotliwości istotne są również: jego wielkość (gabaryty) i kształty oraz generowane przez niego straty energii elektrycznej na promieniowanie.

Kondensatory mikowe są stosunkowo drogie, produkowane są w zakresie pojemności od 1 pF do 0,1 μ F, obecnie, ze względu na swoje duże wymiary, rzadko stosowane w energoelektronicznych przemysłowych układach wielkoczęstotliwościowych. Mika ma znakomite właściwości dielektryczne, jest niepalna oraz odporna: na zmiany temperatury, czynniki chemiczne oraz starzenie się, a kondensatory posiadają niewielką wartość tangensa kąta stratności. Dzięki swoim zaletom elektrycznym, mimo stosunkowo dużych wymiarów, kondensatory mikowe są współcześnie dalej stosowane w wielkoczęstotliwościowym sprzęcie militarnym. W przypadku układów przemysłowych, w których istotne znaczenie ma miniaturyzacja urządzeń zamiast kondensatorów mikowych stosuje się kondensatory tworzywowe. Kondensatory tworzywowe posiadają foliowy dielektryk wykonany z tworzywa sztucznego najczęściej z polipropylenu, poliestru albo polistyrenu, rzadziej poliwęglanu lub teflonu. Elektrody w kondensatorach foliowych wykonuje się z cienkich folii aluminiowych albo cynowych a dla kondensatorów metalizowanych z cienkiej warstwy aluminium powstałej w wyniku naporowania próżniowego jedno lub dwustronnie na folię dielektryczną. Zaletą metalizacji jest to, że przy przebiciu elektrycznym, naporowany metal wyparowuje wokół miejsca przebicia i w ten sposób nie dochodzi do ewentualnego zwarcia. Powstała w wyniku procesu produkcyjnego taśma jest: w kondensatorach zwijkowych - zwijana a w kondensatorach wielowarstwowych – układana systematycznie w warstwy. Istnieje wiele różnych technik wykonywania kondensatorów, na rys. 1 pokazano przekroje wybranych z nich.



Rys. 1. Schematyczne przekroje wybranych typów zwijkowych kondensatorów a) z folią dwustronnie metalizowaną, b) z folią dwustronnie metalizowaną przy szeregowym połączeniu pojemności (przerwy w metalizacji na pionowej osi kondensatora)



Rys. 2. Fotografie rzeczywistych kondensatorów bez obudowy z folią dwustronnie metalizowaną: a) dwa kondensatory o pojemności 0,56 μ F i napięciu 1000 V każdy, firmy Mitra, Kutno, przyłutowane do płytek miedzianych, b) kondensator o pojemności 100 nF i napięciu 1600 V firmy ICEL, Włochy, z szeregowym połączeniem pojemności

We wcześniejszych konstrukcjach kondensatorów z folią dielektryczną wykonaną z tworzywa sztucznego doprowadzenia były wykonane przewodem dołączonym do jednego z końców folii metalizowanej lub metalowej. Obecnie w tego typu kondensatorach na boki zwiniętych rulonów z folii metalowej, metodą metalizacji natryskowej nanosi się kontakty metalowe (rys. 1). Powoduje to, że wyprowadzenia takie mają znacznie mniejsze rezystancje i

indukcyjności doprowadzeń. Środkowa (wewnętrzna) część kondensatora jest najbardziej awaryjna a uszkodzenia spowodowane są zwykle oddziaływaniami termicznymi. Aby wyeliminować skutki tych oddziaływań stosuje się specjalne rozwiązania konstrukcyjne kondensatorów. Na rysunkach 1 b i 2 b pokazano rozwiązanie techniczne kondensatora, w którym zwoje są tak nawinięte że dwa uzwojenia połączone są szeregowo. Szczelina, czyli obszar bez folii metalowej, pozwala na dobrą wymianę ciepła z otoczeniem, co zapewnia przedłużoną żywotność kondensatora w wysokoczęstotliwościowym środowisku pracy.

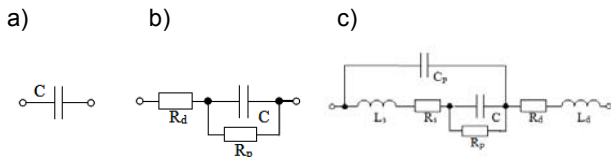
Powstały kondensator obudowany jest zwykle tworzywem sztucznym (w postaci taśmy lub kubka). Kondensatory foliowe wykonuje się również z dielektrykiem uwarstwowionym (podwójnym) złożonym z folii i bibułki kondensatorowej (kondensatory foliowo-papierowe). Czasem taki kondensator umieszcza się w aluminiowej lub stalowej obudowie którą uszczelnia się żywicą fenolową lub epoksydową. Do zasadniczych grup obecnie często stosowanych kondensatorów tworzywowych należą: kondensatory polistyrenowe, poliestrowe i polipropylenowe. Do budowy różnych układów energoelektronicznych wielkoczęstotliwościowych z grupy kondensatorów tworzywowych stosowane są kondensatory polipropylenowe. Wyróżniają się one dużą stabilnością pojemności, dużą rezystancją izolacji, małym tangensem kąta stratności, małym stałym ujemnym temperaturowym współczynnikiem pojemności oraz możliwością uzyskania wąskich tolerancji produkcyjnych pojemności. Mają dość niską dopuszczalną maksymalną temperaturę pracy, wynoszącą +70 °C. Polipropylen udaje się przerabiać na folie a sama folia musi być poddana wstępnej obróbce, aby można ją było metalizować. Kondensatory polipropylenowe u wielu producentów noszą oznaczenie: z elektrodami z folii metalowej – KP, z elektrodami metalizowanymi - MKP. Kondensatory polipropylenowe w porównaniu z kondensatorami poliestrowymi i polistyrenowymi, są bardziej stabilne, mają mniejszą stratność i zbliżony zakres maksymalnej temperatury pracy.

Kondensatory ceramiczne w energoelektronicznych układach wielkoczęstotliwościowych są rzadko stosowane.

Odwzorowanie kondensatora wysokoczęstotliwościowego

W niniejszej pracy skupiono się na zamodelowaniu i praktycznych pomiarach napięć na rzeczywistych elementach składowych baterii kondensatorów pracujących w układach energoelektronicznych wielkiej częstotliwości [4]. Wykazano, że dla takich układów jednakowe (takie same) napięcia na wszystkich elementach otrzymuje się tylko dla specyficznych rozwiązań konstrukcyjnych.

Kondensator w postaci czystej pojemności C jest na schematach przedstawiany tak jak 160 lat temu w postaci pokazanej na rys. 3a. Mimo coraz lepszych parametrów produkowanych współcześnie kondensatorów stosowanych w układach elektronicznych i energoelektronicznych, przyjmowanie takiego schematu do projektowania układów o wyższych częstotliwościach pracy, znacząco obniża rzeczywiste odwzorowanie jego funkcji [5] i wprowadza błędy do rozpatrywanego obwodu. Błędy tego typu mają szczególne znaczenie przy projektowaniu wielowarstwowych obwodów drukowanych. Dlatego stosowane współcześnie elektryczne schematy zastępcze kondensatorów mają różny stopień złożoności, od najprostszego, szeregowego lub równoległego połączenia rezystancji i pojemności (rys. 3b), aż po bardzo rozbudowane schematy składające się z kilku lub nawet kilkunastu elementów o parametrach stałych lub zależnych od częstotliwości jego pracy.



Rys. 3. a) Schematyczne oznaczenie idealnego kondensatora, b) Schemat zastępczy rzeczywistego kondensatora stosowany dla prądu stałego, c) Schemat zastępczy kondensatora dla wielkiej częstotliwości przyjęty do rozważań w dalszej części pracy [4]

Do najlepiej odwzorowujących stan faktyczny, choć rzadziej spotykanych, należą modele uwzględniające indukcyjności (reaktancje indukcyjne) których wraz ze wzrostem częstotliwości powodują zmniejszanie się wartości częstotliwości rezonansowych i wpływają w sposób znaczący na rzeczywistą wartość impedancji.

W dalszej części tej pracy, dla układów wielkoczęstotliwościowych zastosowany zostanie schemat zastępczy kondensatora zasugerowany w pracy [4], pokazany na rysunku 3 c. Na schemacie tym występują: indukcyjność L_s związana z budową kondensatora, rezystancja zastępcza R_s oraz rezystancja strat dielektrycznych R_p , równoległa do pojemności pasożytniczej C_p a także przede wszystkim właściwa pojemność C [4]. Dodatkowo występują rezystancja R_d oraz indukcyjność L_d doprowadzeń.

Indukcyjność L_d uwarunkowana jest doprowadzeniami drutowymi do rzeczywistej pojemności, przyjmuje się, że wynosi ona około 12,6 nH/cm długości, rezystancja doprowadzeń R_d jest mała i zwykle jest w obliczeniach pomijana. Jak podkreślono to wcześniej wartość indukcyjności L_s uzależniona jest od budowy kondensatora a wartości jej zwykle wynoszą od kilku do kilkudziesięciu nanohenrów. Rezystancja zastępcza R_s zależy od właściwości materiałów użytych do produkcji kondensatora oraz jego budowy. W skład jej wchodzi również rezystancje przejścia. Zwykle wynosi ona około 0,1 Ω . Rezystancja R_p jest rezystancją powodującą prąd upływu kondensatora i uzależniona jest od konduktywności dielektryka oraz rezystancji izolacji i waha się w granicach od 10^3 do 10^6 M Ω [4] i ma znaczenie jedynie przy zastosowaniach niskoczęstotliwościowych kondensatorów to jest poniżej 1 kHz. Pojemność pasożytnicza równoległa C_s powstaje na skutek obecności doprowadzeń oraz płytek stykowych i wynosi od 0,1 pF do kilkuset pikofaradów. W zakresie częstotliwości do 1 MHz w schemacie zastępczym (rys. 3 c) rezystancję R_p , pojemność C_p oraz indukcyjności L_s , L_d w zasadzie można pominąć [4].

W odniesieniu do kondensatorów bierze się pod uwagę trzy podstawowe, znaczące wielkości pasożytnicze:

- prądy upływu (*leakage*), wynikające przeważnie z nieidealności izolacji (rzeczywistego dielektryka), przyczyniającej się do przepływu ładunku elektrycznego pomiędzy okładzinami kondensatora,
- rezystancje pasożytnicze powiązane w największym stopniu z rezystancją przewodów, elektrod i strat mocy występujących w dielektryku,
- indukcyjności pasożytnicze.

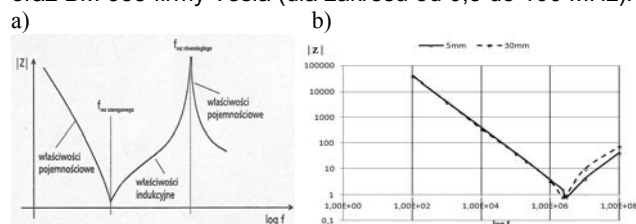
Należy również dodać, że rezystancje R_p , R_s oraz R_d uważane są za główne wielkości pasożytnicze powodujące niepotrzebne straty mocy, przeważnie w postaci wydzielania się ciepła Joule'a a co zatem idzie samonagrzewanie się kondensatorów.

Przy pominięciu rezystancji R_p oraz rezystancji i indukcyjności doprowadzeń R_d oraz L_d otrzymuje się impedancję Z schematu zastępczego kondensatora pokazanej na rys. 3 c, w postaci zależności [4]:

$$Z = \frac{1}{j2\pi f C_p + \frac{1}{R_s + j2\pi f L_s + \frac{1}{j2\pi f C_s}}}$$

Impedancja ta jest funkcją częstotliwości f wyrażaną w *hercach*. Z części mianownika powyższej zależności można wyprowadzić warunki dla rezonansu szeregowego i równoległego, choć łatwiej je wykazać, po przyjęciu pewnych uproszczeń i pominięciu indukcyjności L_d , na podstawie rys. 3 c. Rezonans szeregowy (o mniejszej częstotliwości) wystąpi przy szeregowym połączeniu C i L_s , natomiast rezonans równoległy (o większej częstotliwości) wystąpi przy równoległym połączeniu L_s i C_p .

Przebieg i charakter impedancji najłatwiej przedstawić na wykresie modułu impedancji $|Z|$ w funkcji logarytmu częstotliwości $\log f$ (rys.4 a). Charakterystykę przedstawioną na rys. 4 b wykonano na podstawie pomiarów rzeczywistego kondensatora z wykorzystaniem mostków: MC 4090 firmy Motech (dla zakresu do 200 kHz) oraz BM 538 firmy Tesla (dla zakresu od 0,5 do 100 MHz).

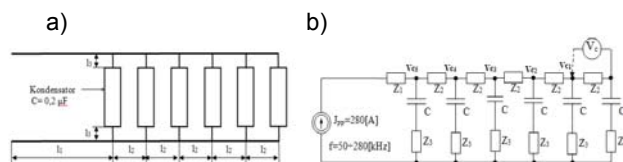


Rys. 4 a) Orientacyjna charakterystyka częstotliwościowa impedancji rzeczywistego kondensatora [4], b) Charakterystyka impedancji kondensatora rzeczywistego 47 nF typu KFMP firmy Miflex, Kutno w zakresie częstotliwości do 100 MHz dla dwóch różnych długości wyprowadzeń: 5 mm (częstotliwość rezonansu szeregowego wynosi 2,85 MHz) i 30 mm (częstotliwość rezonansu szeregowego wyniosła 2,24 MHz)

Symulacja komputerowa układu kaskadowo połączonych kondensatorów

Weźmy pod uwagę obwód elektryczny, złożony z N kondensatorów połączonych równoległe i zasilanych napięciem przemiennym U , który swoją konfiguracją trochę przypominający układy drabinkowe. Każdy kondensator w takim układzie ma taką samą pojemność przedstawioną w postaci reaktancji X_C a doprowadzenia napięcia do kondensatora są realizowane za pomocą odcinków drutu o rezystancji R_d i reaktancji indukcyjnej X_d . Przyjęto, że doprowadzenia energii do zacisków każdego kondensatora realizowane są za pomocą odcinków drutów o wartości rezystancji R_{Cd} oraz indukcyjności L_{Cd} reprezentowanej przez reaktancję indukcyjną X_{Cd} .

Przeprowadzono symulację numeryczną dla baterii 6 kondensatorów połączonych równoległe o znanych wymiarach i parametrach doprowadzeń pokazanych na rys. 5 a. Do obliczeń przyjęto wartości: $l_1=100$ mm, $l_2=12$ mm lub 32 mm, $l_3=5$ mm.



Rys. 5 a) Schemat geometrii układu obliczeniowego dla 6 kondensatorów połączonych równoległe, b) Oznaczenie parametrów układu obliczeniowego, V_{Cn} jest wartością skuteczną napięcia na n -tym elemencie liczoną od końca układu drabinkowego

Przeprowadzając symulację komputerową dla kilku różnych częstotliwości f kHz można określić spadki napięć w odniesieniu do ostatniego (znajdującego się po prawej stronie) kondensatora w baterii.

Na podstawie wymiarów geometrycznych obwodu przyjęto wielkości do obliczeń symulacyjnych: $I_{pp}=280$ A; $R_d=0,2$ Ω ; $R_{Cd}=0,01$ Ω ; $L_d=0,256$ μ H; $L_{Cd}=12,6$ nH; $C=0,2$ μ F. Układ dla którego wykonano obliczenia przedstawiono na rys. 5 b, gdzie: $Z_1=(3\div 8)Z_2$; $Z_2=R_d+j2\pi fL_d$; $Z_3=R_{Cd}+j2\pi fL_{Cd}$.

Obliczenia wykonane zostały metodą prądów oczkowych a otrzymane wyniki analizy obwodu z rys. 5 b (wartości napięcia) przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1 Wyniki analizy obwodu z rys. 5 b

a) Kondensatory obok siebie $l_2=12$ mm ($l_1=100$ mm, $l_3=5$ mm).

f [kHz]	V_{C1} [V]	V_{C2} [V]	V_{C3} [V]	V_{C4} [V]	V_{C5} [V]	I_{pp} [A]
50	0,15	0,45	0,9	1,5	2,3	280
80	0,15	0,45	0,9	1,5	2,3	280
130	0,19	0,58	1,2	2,0	2,9	280
280	0,4	1,1	2,2	3,6	5,4	280

b) Kondensatory w odległości $l_2=32$ mm ($l_1=100$ mm, $l_3=5$ mm).

f [kHz]	V_{C1} [V]	V_{C2} [V]	V_{C3} [V]	V_{C4} [V]	V_{C5} [V]	I_{pp} [A]
50	0,32	0,97	1,9	3,2	4,8	280
80	0,32	0,97	1,9	3,2	4,8	280
130	0,6	1,8	3,6	6,0	8,9	280
280	1,4	4,2	8,3	13,7	20,1	280

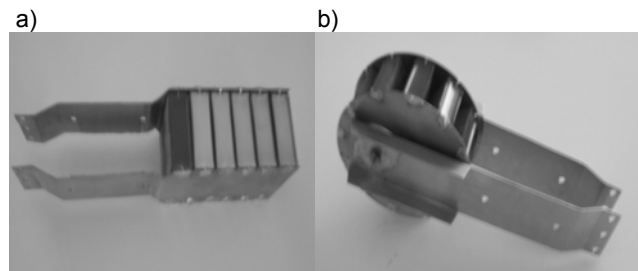
Przy tym samym prądzie źródłowym (zasilającym) I_{pp} wraz ze wzrostem częstotliwości f kHz wartość napięcia V_{Cn} wzrasta na każdym n -tym elemencie. Stosunek napięć V_{C5}/V_{C1} dla układu z Tabeli 1a, wraz z kolejnym wzrostem wartości częstotliwości wynosi odpowiednio: 15,33; 15,33; 15,26; 13,5, natomiast dla Tabeli 1b, wraz z kolejnym wzrostem wartości częstotliwości wartość ta wynosi odpowiednio: 15; 15; 14,83; 14,36. Zmiany tego stosunku są niewielkie, lekko malejące wraz ze wzrostem częstotliwości.

W przypadku zmiennej długości wyprowadzeń l_3 wszystkich kondensatorów, rozpyły prądów się nie zmienia ponieważ reaktancje kolejnych kondensatorów układu drabinkowego zmieniają swoją wartość w jednakowym stopniu i spadki napięć między kondensatorami praktycznie nie ulegają zmianom.

Sposoby rozwiązania problemu asymetrii napięć w baterii kondensatorów wieloczęstotliwościowej

Jak wykazały badania, występujące różnice napięć na elementach baterii kondensatorów wieloczęstotliwościowych, w najprostszy sposób można zniwelować poprzez regulację odległości pomiędzy poszczególnymi kondensatorami. W przypadku umieszczenia kondensatorów w baterii obok siebie między dwoma prostokątnymi paskami metalowymi (rys 6 a) odstępy między kondensatorami powinny być nierówne co pozwoli skompensować oddziaływanie pola elektromagnetycznego prądów w paskach na poszczególne kondensatory. Jak wykazały pomiary optymalnym rozwiązaniem jest umieszczenie kondensatorów między dwoma okrągłymi płytami miedzianymi symetrycznie, to znaczy na tym samym promieniu w równej odległości od siebie prąd doprowadzić centralnie z góry i z dołu do płyt. Jednak takie rozwiązanie jest nie technologiczne gdyż zajmuje zbyt dużo miejsca w obudowie urządzenia. Dlatego też zwykle stosuje się doprowadzenia paskami miedzianymi prowadzonymi wzdłuż powierzchni okrągłych płyt miedzianych powoduje, że duże prądy płynące przez te doprowadzenia niekorzystnie wpływają na pracę kondensatorów elementarnych. Aby skompensować ten niekorzystny wpływ

wykonuje się nie centrycznie doprowadzenia do baterii kondensatorów (rys 6 b).



Rys. 6. Bateria kondensatorów: a) z równoległe umieszczonymi elementami obok siebie, pomiędzy miedzianymi paskami, b) kondensatorami umieszczonych symetrycznie pomiędzy dwoma okrągłymi płytami miedzianymi z ekscentrycznym wyprowadzeniem

Wnioski

Sposób połączeń rzeczywistych kondensatorów w baterii wielokondensatorowej w istotny sposób wpływa, nie tylko na pojemność budowanego układu ale również na rozkład napięć na poszczególnych pojemnościach składowych.

Jak widać z przeprowadzonych analiz, dla częstotliwości do 100 kHz spadki napięć V_{C1} do V_{C5} na baterii kondensatorów nie mają specjalnie istotnego znaczenia, natomiast powyżej 100 kHz spadki napięć V_{C1} do V_{C5} gwałtownie rosną i nie powinno się stosować takiego sposobu konstrukcji baterii, istotne znaczenie ma tu odległość l_2 pomiędzy poszczególnymi kondensatorami. Dąży się do tego aby napięcia te na każdym elementarnym kondensatorze były jednakowe zarówno co do wartości jak i fazy, gdyż w przypadku różnych napięć na połączonych równoległe kondensatorach, przy dużych prądach może nastąpić przekroczenie dopuszczalnej temperatury pracy jednego z kondensatorów składowych i jego destrukcja, co często pociągająca za sobą zniszczenie pozostałych kondensatorów w baterii lub zwarcie w układzie. Uwzględnienie występujących efektów termicznych, efektu zbliżenia przewodników (czyli występowania efektów elektromagnetycznych pomiędzy elementami przewodzącymi kondensatorów blisko usytuowanych w przestrzeni baterii) wymagałoby szerszych badań teoretycznych oraz praktycznych i zostało w tej pracy pominięte.

Autorzy: dr inż. Aleksander Gąsior, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, ul. J.H. Dąbrowskiego 69, 42-200 Częstochowa, E-mail: alekg@el.pcz.czest.pl; dr inż. Zdzisław Posytek, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, ul. J.H. Dąbrowskiego 69, 42-200 Częstochowa E-mail zdzychu@el.pcz.czest.pl; dr hab. inż. Paweł Kielbasa, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, ul. Balicka 116B, 30-149 Kraków, E-mail: Pawel.Kielbasa@ur.krakow.pl.

LITERATURA

- [1] Wróblewski A.K., Historia fizyki, od czasów najdawniejszych do współczesności, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa (2006), 620, (ISBN 83-01-14635-4)
- [2] Gąsior A., Opis budowy i początków działania telegrafów elektromagnetycznych na odcinku częstochowskim Drogi Żelaznej Warszawsko-Wiedeńskiej, *Przegląd Zachodniopomorski* (Szczecin) XXXI (LX), (2016), z. 3, 87-142, (ISSN 0552-4245)
- [3] Koło Redakcyjne oficerów Obozu Szkolnego Wojsk Łączności, Podręcznik teletechniki dla podoficerów łączności, Zegrze (1929), 454
- [4] Lutz M., Nedtwig J., Certyfikat CE w zakresie kompatybilności elektromagnetycznej, Podręcznik praktyczny, Wyd. Alfa-Weka, Warszawa (listopad 1998), strony nienumerowane
- [5] Bierne kondensatory, seria: Elementy elektroniczne, Wyd. A & Z, (1995), 154, (ISSN 1234-1053)