



Aleksander Gańsorski¹, Zdzisław Posyłek¹, Andrzej Roman²

¹*Wydział Elektryczny,*

Politechnika Częstochowska,

aleja Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa

²*Instytut Techniki i Systemów Bezpieczeństwa,*

Akademia im. Jana Długosza,

aleja Armii Krajowej 13/15, 42-200 Częstochowa

**SYMULACJA NUMERYCZNA RZECZYWISTEJ BATERII
KONDENSATOROWEJ PRACUJĄCEJ W UKŁADACH
WIELKIEJ CZĘSTOTLIWOŚCI W ZASTOSOWANIU
DO FALOWNIKÓW.
CZĘŚĆ I. KONDENSATORY DLA BATERII WIELKIEJ
CZĘSTOTLIWOŚCI**

Streszczenie. W części I pracy pokazano rzeczywiste problemy związane z zastosowaniem kondensatorów wielkiej częstotliwości w układach rezonansowych falowników oraz przedstawiono kondensator jako element obwodu. Pokazano historyczne początki budowy pierwszych kondensatorów oraz pierwsze ich zastosowania w Częstochowie. Omówiono również sposób budowy i wielkości materiałowe stosowane do produkcji pojedynczych kondensatorów, zwłaszcza wykonanych z tworzyw, łączonych w baterie dla układów wielkiej częstotliwości stosowanych w wykonawczych (roboczych) układach rezonansowych falowników.

Słowa kluczowe: kondensator, wielka częstotliwość, układ rezonansowy falowników.

**NUMERICAL SIMULATION OF THE ACTUAL CAPACITOR
BANK WORKING IN HIGH FREQUENCY SYSTEMS
FOR USE IN INVERTERS.
PART I. CAPACITORS FOR HIGH FREQUENCY BANKS**

Summary. Part I of the paper shows the real problems associated with the use of high-frequency capacitors in resonance systems of inverters and the capacitor is shown as a

circuit element. The historical beginnings of the construction of the first capacitors and the first historical applications in Czestochowa are shown. The method of construction and material sizes used for the production of single capacitors, especially plastic, are combined in banks for high frequency circuits used in executive (working) resonant systems of inverters.

Keywords: capacitors, high frequency, resonant systems of inverters.

Wstęp

Falowniki są to urządzenia służące do przekształcania prądu stałego na prąd przemienny o częstotliwości dostosowanej do właściwości odbiornika energii, a niezwiązanej z częstotliwością sieci zasilającej, przy czym energię prądu stałego falownik pobiera z prostownika sieciowego. Stosowane są one powszechnie między innymi w technice ultradźwiękowej, grzejnictwie indukcyjnym, napędach elektrycznych, układach przetwarzania napięć. Z jednej strony poszukuje się takich rozwiązań technicznych dla tych urządzeń, które są proste w konstrukcji, sprawne w działaniu i funkcjonalne, a z drugiej strony odbiorcy chcą otrzymać produkt niezawodny, tani w eksploatacji i dobrze dostosowany do ich potrzeb. Wykorzystując zjawisko rezonansu po stronie roboczej, unika się generowania zakłóceń od wyższych harmonicznych po stronie zasilania. Podwyższając częstotliwości przełączeń, uzyskuje się polepszenie jakości przekształcania energii i poprawę własności dynamicznych przekształtnika. Lepsze możliwości przekazywania energii elektrycznej daje rezonansowy układ szeregowy i dlatego jest on częściej stosowany. Ponieważ częstotliwości pracy falowników zbliżone są do dolnego pasma fal radiowych, dlatego jako zasadę przyjęto, aby nie osiągała ona częstotliwości pośredniej 455 [kHz], stosowanej w radiotechnice [4].

Aby uzyskać maksymalne prądy i jak najmniejsze straty mocy w falownikach stosuje się obwód rezonansowy szeregowy, zawierający skupione elementy indukcyjne i pojemnościowe. W czasie wieloletnich badań okazało się, że elementem najczęściej ulegającym awarii w części wykonawczej falownika jest zespół baterii kondensatorów wysokiej częstotliwości, pracujący w trudnych warunkach. Od lat poszukuje się takich rozwiązań technicznych i technologicznych aby usunąć ten podstawowy mankament falowników, jakim są powtarzające się uszkodzenia baterii kondensatorów w wykonawczym roboczym układzie rezonansowym. Tym zagadnieniem została poświęcona niniejsza praca.

Kondensator jako element obwodu elektrycznego

Kondensatory są to elementy elektryczne, których parametrem użytkowym jest pojemność C wyrażana w faradach [F]. W ogólnym, najprostszym przypadku stanowi on układ dwóch powierzchni przewodzących, zwanych *okładkami*, odizolowanych od siebie dielektrykiem. Kondensator służy do gromadzenia ładunków elektrycznych, przy czym w wyniku doprowadzenia napięcia stałego na jego okładkach pojawiają się ładunki równe co do wartości, lecz o przeciwnych znakach. Zmiany napięcia doprowadzonego do kondensatora powodują zmiany ładunku na okładkach kondensatora, w wyniku tego przez kondensator przepływa prąd elektryczny. Pojemność kondensatora określają: rozmiary przewodzących powierzchni (okładek), przenikalność

dielektryczna: $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ [F/m] (gdzie $\varepsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^{-9}$ [F/m] – przenikalność elek-

tryczna próżni; ε_r – względna przenikalność elektryczna) oraz grubość materiału dielektrycznego wypełniającego przestrzeń między tymi okładkami [1]. Proces, w czasie którego zachodzi gromadzenie się ładunku, nazywany jest ładowaniem kondensatora. Trwa on do momentu, w którym potencjał pomiędzy okładkami osiągnie taką wartość, jak napięcie ładowania. Ładunek pojedynczej okładki nazywany jest ładunkiem kondensatora. Doprowadzenie do okładek rzeczywistego kondensatora, napięcia harmonicznego lub o przebiegu odkształconym od sinusoidy powoduje przepływ przez kondensator prądu zmieniającego swoją wartość i kierunek, co może być przyczyną jego nagrzewania się. Kondensator, przy przepływie prądu przemiennego, stanowi reaktancję pojemnościową X_c wyrażaną w omach [Ω], zależną od odwrotności pulsacji $\omega = 2\pi f$ (gdzie f to częstotliwość w hercach [Hz]) i odwrotności pojemności C [1].

Przenikalność dielektryczna ujawnia się, gdy atomy materiału dielektrycznego umieszczone w polu elektrycznym ulegają polaryzacji w wyniku odkształcenia orbit elektronów na zewnętrznych powłokach na skutek działania pola elektrycznego. Powstają tak zwane dipole, które mogą się obracać i przyjmują ten sam kierunek, jaki ma w danej chwili pole elektryczne generowane przez okładki kondensatora. Przy szybkich zmianach pola elektrycznego dipole obracają się równie szybko, co powoduje grzanie się dielektryka tworzącego kondensator [2]. Wytrzymałością elektryczną dielektryka kondensatora nazywa się maksymalną wartość natężenia pola elektrycznego, która jeszcze nie niszczy własności izolacyjnych dielektryka. Znacząca część parametrów kondensatora uzależniona jest od temperatury oraz częstotliwości i napięcia, dlatego w zależności od dopuszczalnego zakresu temperatury, częstotliwości pracy oraz wartości stosowanego napięcia należy wybierać kondensator z odpowiednim dielektrykiem.

W celu osiągnięcia potrzebnej wartości pojemności, w zależności od tego, jakie kondensatory produkowane przemysłowo są w dyspozycji, można je łączyć na różne sposoby w baterie, mające wiele praktycznych zastosowań w elektrotechnice, energoelektronice, energetyce i telekomunikacji.

Biblijny kondensator, budowa pierwszych kondensatorów

Wybitny polski inżynier elektryk, profesor i doctor honoris causa Politechniki Warszawskiej Janusz Lech Jakubowski (ur. 1905 r.; zm. 2000 r.) przypuszczał, wypowiadając to również publicznie, że opisana w Biblii Arka Przymierza (Rys. 1) była pierwszym kondensatorem elektrycznym [9].



Rys. 1. Wyobrażenie Arki Przymierza (pochodzenie rysunku: Wikipedia, wolna encyklopedia).

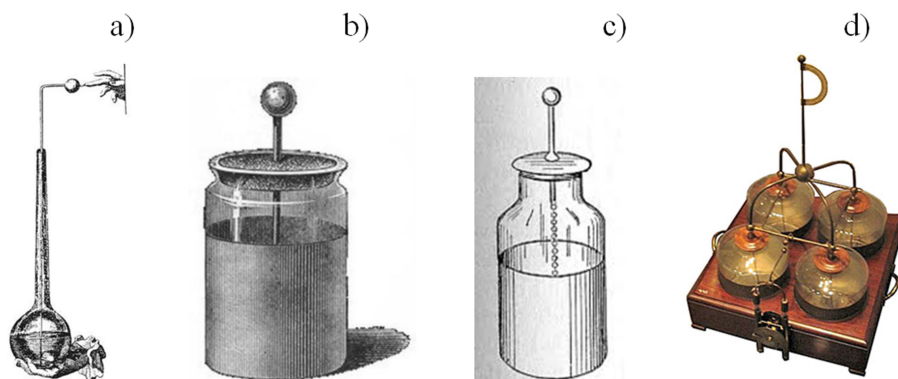
Przepis na budowę Arki Przymierza był następujący [8, Stary Testament, Księga Wyjścia, Przepisy o zorganizowaniu kultu, Przybytek i jego sprzęty. Arka, Rozdział 25, 10-15, 17-22]: (10) *I uczynią arkę z drzewa akacjowego; jej długość będzie wynosiła dwa i pół łokcia; jej wysokość półtora łokcia i jej szerokość półtora łokcia.* (11) *I pokryjesz ją szczerym złotem wewnątrz i zewnątrz, i uczynisz na niej dokoła złote wieńce.* (12) *Odlejesz do niej cztery pierścienie ze złota i przymocujesz je do czterech jej krawędzi: dwa pierścienie do jednego jej boku i dwa do drugiego jej boku.* (13) *Rozkażesz zrobić drążki z drzewa akacjowego i pokryjesz je złotem.* (14) *I włożysz drążki te do pierścieni po obu bokach arki celem przenoszenia jej.* (15) *Drążki pozostaną w pierścieniach.*

niach arki i nie będą z nich wyjmowane. I dalej podano, jak powinna wyglądać przeblagalnia z aniołami (cherubami) umieszczona na pokrywie Arki Przymierza: (17) *I uczynisz przeblagalnię ze szczerego złota [...] (18) dwa też cheruby wykujesz ze złota. Uczynisz zaś je na obu końcach przeblagalni. (19) Jednego cheruba uczynisz na jednym końcu, a drugiego cheruba na drugim końcu przeblagalni. Uczynisz cheruby na końcach górnych. (20) Cheruby będą miały rozpostarte skrzydła ku górze i zakrywać będą swymi skrzydłami przeblagalnię, twarze zaś będą miały zwrócone jeden ku drugiemu. I ku przeblagalni będą zwrócone twarze cherubów. (21) Umieścisz przeblagalnię na wierzchu arki, w arce zaś złożysz Świadectwo, które dam tobie. (22) Tam będą się spotykał z tobą i sponad przeblagalni i spośród cherubów, które są ponad Arką Świadectwa, będą z tobą rozmawiał o wszystkich nakazach, które dam za twoim pośrednictwem Izraelitom.* Złota blacha wnętrza skrzyni stanowiła jedną, a złota blacha na zewnątrz – drugą okładkę kondensatora. Suche drewno akacjowe izolujące okładziny, aby utrzymać ciężar złotej blachy, miało dużą grubość i dlatego tak powstały kondensator można było naładować do wysokiego napięcia. Po połączeniu blachy wewnętrznej z przewodzącym podłożem znajdującym się wokół izolowanej od podłoża Arki, elektryzacji dokonywano prawdopodobnie za pomocą polerowania fragmentami futra (przez kapłanów) zewnętrznej powierzchni skrzyni, przy czym sandały z grubą drewnianą podeszwą dobrze izolowały ich od przewodzącej powierzchni podłogi. Dotknięcie Arki Przymierza mogło być śmiertelnie groźne dla osób niewtajemniczonych. O skuteczności działania Arki Przymierza opowiada historia synów Aarona, którzy ofiarowali inny ogień, niż był im nakazany – ze śmiertelnym skutkiem [8, Stary Testament, Księga Kapłańska, Przepięstwo Synów Aarona. Dodatkowe Przepisy, Śmierć Nadaba i Abihu, Rozdział 10. 1–2]: (1) *Nadab i Abihu, synowie Aarona, wzięli każdy swoją kadzielnicę, nabrali do niej ognia, włożyli na niego kadzidło i ofiarowali przed Panem ogień inny, niż był im nakazany. (2) Wtedy ogień wyszedł od Pana i pochłonął ich. Umarli przed Panem.* Innym przykładem jest historia 250 mężów zbuntowanych przeciw władzy Mojżesza [8, Stary Testament, Księga Liczb, Ukaranie buntowników, Rozdział 16, 35], na których: (35) *Wtedy wypadł ogień od Pana i pochłonął dwustu pięćdziesięciu mężów, którzy ofiarowali kadzidło.* W obu pokazanych przypadkach ukarani gromadzą się wokół przeblagalni, przynoszą kadziła z niewłaściwym ogniem i pojawia się ogień, który pochłania ludzi używających w pobliżu Arki Przymierza tych kadzideł.

Kondensator był pierwszym elementem obwodu elektrycznego zbudowanym przez człowieka, ale na początek trzeba było stworzyć źródło produkujące ładunki elektryczne. Niemiecki fizyk, wynalazca i budowniczy Otto von Guericke (ur. 1602 r., zm. 1686 r.), w latach 1646–1676 burmistrz Magdeburga, w 1662 roku skonstruował maszynę elektrostatyczną, będącą rodzajem prostego generatora elektrostatycznego, działającego na zasadzie indukcji elektrosta-

tycznej. Maszyna była zbudowana z topionej siarki uformowanej w kulę umieszczoną między deskami, którą można było obracać połączoną z nią korbą. Pocieranie za pomocą odpowiedniej rękojeści obracającej się kuli elektryzowało ją, a kula przyciągała lekkie przedmioty: jak papier, słomki, łodygi traw, małe cząsteczki złota, płatki srebra. Za pomocą lnianej nici, nie dłuższej od trzech stóp, dotykającej kuli, właściwość ta mogła być przekazywana na odległość. Był to pierwszy przypadek celowego przekazywania ukierunkowanej energii elektrycznej (w zasadzie elektrostatycznej) na odległość [10]. Maszynę tę wkrótce zmodernizowano. Angielski inżynier i wynalazca James Wimshurst (ur. 1832 r.; zm. 1903 r.) skonstruował powszechnie dziś używaną w pokazach fizyki szkolnej maszynę elektrostatyczną, składającą się z dwóch tarcz izolacyjnych, obracanych w przeciwnych kierunkach. Na zewnętrznych stronach tych tarcz nałożono metalowe segmenty, które ulegały elektryzacji. Na osi obrotu tarcz, po obu stronach, umocowano metalowe pręty, zaopatrzone na końcach w metalowe szczotki, które w czasie ruchu dotykały segmentów. Na wysokości poziomej średnicy tarcz umocowano metalowe pręty, opatrzone ostrzami (nazywanymi *grzebieniami*), które były zwrócone do obu tarcz, lecz ich nie dotykały. Ostrza te zbierały ładunki, doprowadzone do iskiernika. Iskiernik stanowiły dwie kulki na prętach metalowych. Podczas obracania tarcz powstawały ładunki, zbierane przez grzebienie i przenoszone do iskiernika. Po wystąpieniu nadmiaru ładunków, między kulkami iskiernika powstawała duża różnica potencjałów, powodująca przeskoczenie iskry [10].

Niemiecki duchowny, prawnik, uczonek Ewald Jürgen Georg von Kleist (ur. 1700 r., zm. 1748 r.), w latach 1722–1747 dziekan katedry w Kamieniu Pomorskim, był wynalazcą *butelki Kleista* (niem. *die Kleistische Flasche*), którą zbudował już w październiku 1745 roku (rys. 2a, 2b). Ewald von Kleist po postawieniu na cynowym talerzu naelektryzowanej szklanki wody i dotknięciu talerza doznał silnego uderzenia, a to nasunęło mu myśl o kondensowaniu ładunku. Po licznych doświadczeniach, 11 października 1745 roku przeprowadził udaną próbę z naczyniem ze szkła wypełnionym wodą i zatkanym korkiem, który był przebity na wylot miedzianym prętem zakończonym kulką [7]. Butelkę ładowano elektrycznie, na przykład pocierając pręt i kulkę ręką lub jedwabiem. Poprzez pręt oraz wodę ładunek dostawał się do środka naczynia i gromadził się na jego wewnętrznej ścianie. Pojemność elektryczną butelki można było znacznie zwiększyć, pokrywając szkło od zewnątrz i wewnątrz znanym już wtedy staniolem (cynfolią). Sukcesywne badania wynalazcy prowadzone na prowincji, w oddaleniu od stolic państw i ośrodków naukowych, w czasie trwającej w Niemczech wojny, były mało znane i na ogół Ewald von Kleist nie jest wymieniany jako pierwszy odkrywca kondensatora.



Rys. 2. a) *butelka Kleista* – rysunek wykonany ręką odkrywcy, b) *butelka Kleista* ze szkłem oblepionym cynfolią, c) *butelka lejdejska*, d) bateria butelek lejdejskich. (pochodzenie rysunków: Wikipedia, wolna encyklopedia).

O dokonanym odkryciu Ewald von Kleist poinformował listownie swojego kolegę z czasów gimnazjalnych, diakona w kościele św. Jana w Gdańsku, Pawła Świetlickiego (ur. 1699 r.; zm. 1756 r.), członka miejscowego Towarzystwa Przyrodniczego. Z kolei Paweł Świetlicki zainteresował wynalazkiem innego gdańszczanina, Daniela Gralatha (ur. 1708r.; zm. 1767 r.), także członka Towarzystwa Przyrodniczego. D. Gralath nawiązał kontakt z Ewaldem von Kleistem i samodzielnie rozpoczął budowę *butelki Kleista*, a następnie powtórzył doświadczenie 5 marca 1746 roku i opisał te eksperymenty oraz wyjaśnił działanie urządzenia. Zmierzył również siłę działającą między naładowanymi okładkami butelki, na 40 lat przed badaniami Charles Augustina de Coulomba (ur. 1736 r.; zm. 1806 r.) [10]. Wadą odkryć Daniela Gralatha było to, że zwykle ograniczał się do jakościowego opisu zjawisk, pomijając ich opis ilościowy, czyli nie potrafił badanych przez siebie zjawisk opisywać za pomocą wzorów fizycznych i matematycznych. Badania prowadził w Gdańsku, w siedzibie Towarzystwa Przyrodniczego, w Zielonej Bramie. W swojej trzytomowej książce *Historia elektryczności* (kolejne tomy opublikowane zostały w latach 1747, 1754 i 1756) omawiającej historię badań nad elektrycznością od starożytnych Greków do swoich czasów, zawarł wyjaśnienie – zasadę działania *butelki Kleista*. Napisał również bibliografię wszystkich dzieł poświęconych elektrostatyce pt. *Biblioteka elektryczna*.

W styczniu 1746 roku duński matematyk, filozof, lekarz i astrolog, profesor miejscowego uniwersytetu Pieter (Petrus) van Musschenbroek (ur. 1692 r., zm. 1761 r.) i jego asystent laboratoryjny Andreas Cuneus (ur. 1712 r., zm. 1778 r.) w Leyden w Holandii wynaleźli kondensator zwany *butelką lejdejską* (*Leyden jar*). Wynalazek dokonany został przypadkiem podczas ładowania elektrycznego butelki z wodą, którą mokrą ręką trzymał wynalazca,

otrzymując bardzo mocny udar (porażenie) z przeskokiem iskry elektrycznej (Rys. 2c). Zrealizowana *butelka lejdejska* była to szklana butelka, której powierzchnie – wewnętrzna i zewnętrzna – pokryte były izolowaną folią metalową, stanowiącą okładki kondensatora. Przez korek w naczyniu był spuszczone do butelki łańcuszek, co umożliwiało napełnianie butelki ładunkiem elektrycznym za pomocą wirującej maszyny elektrostatycznej. Wkrótce okazało się, że doświadczenia z udziałem *butelki lejdejskiej* są niebezpieczne dla życia badaczy. Cywilizowany świat za pomocą listów został poinformowany o odkryciu profesora i dlatego nazwa wynalazku związana została z Leyden, miastem drugiego wynalazcy Pietera van Musschenbroeka. [10].

Pojemność *butelki lejdejskiej* wynosi zwykle od kilkuset do kilku tysięcy pikofarad, a napięcie przebicia sięga do 20 kilowolt. W celu zwiększenia pojemności użytkowej tych kondensatorów, *butelki lejdejskie* były łączone w baterie umieszczane zwykle w drewnianych skrzynkach (Rys. 2d).

W 1749 roku angielski lekarz i fizyk, badacz elektryczności William Watson (ur. 1715 r.; zm. 1787 r.) za pomocą zmodyfikowanej *butelki lejdejskiej* z sukcesem przetransmitował energię elektryczną po drucie przeciągniętym nad Tamizą i po przeciwnej stronie rzeki wywołał iskrę elektryczną.

Butelka lejdejska okazała się prawdziwą sensacją w międzynarodowej społeczności naukowej i w badaniach była stosowana do końca XIX wieku. Przykładem niech będzie amerykański polityk, drukarz, uczonek, filozof oraz wolnomularz Benjamin Franklin (ur. 1706 r.; zm. 1790 r.). Prowadząc w 1752 roku badania nad piorunami, „złapał” prąd z błyskawicy do butelki lejdejskiej i dowiódł, że piorun jest powiązany z wyładowaniami elektrycznymi w atmosferze [10].

Butelka lejdejska choć skomplikowana w budowie i niebezpieczna w obsłudze była zapowiedzią powstania współczesnego kondensatora i była pierwszym krokiem do okiełznania elektryczności. Jednak natura i właściwości elektryczności pozostawały dla naukowców niejasne do roku 1897, kiedy fizyk angielski, laureat Nagrody Nobla z 1906 roku, Joseph John Thomson (ur. 1856 r.; zm. 1940 r.) odkrył elektron.

Pierwsze celowe zastosowanie kondensatorów w Częstochowie

Pierwszą szkołą wyższą, funkcjonującą na terenie Częstochowy od 1671 roku, były *Studia Generali* (uniwersytet) prowadzone na Jasnej Górze, a ukierunkowane przede wszystkim na kształcenie paulinów. W 1674 roku Uniwersytet Jasnogórski otrzymał takie same prawa, jakie miały uniwersytety i akademie publiczne. Uniwersytet ten funkcjonował w murach klasztoru jasnogórskiego do 1918 roku [3].

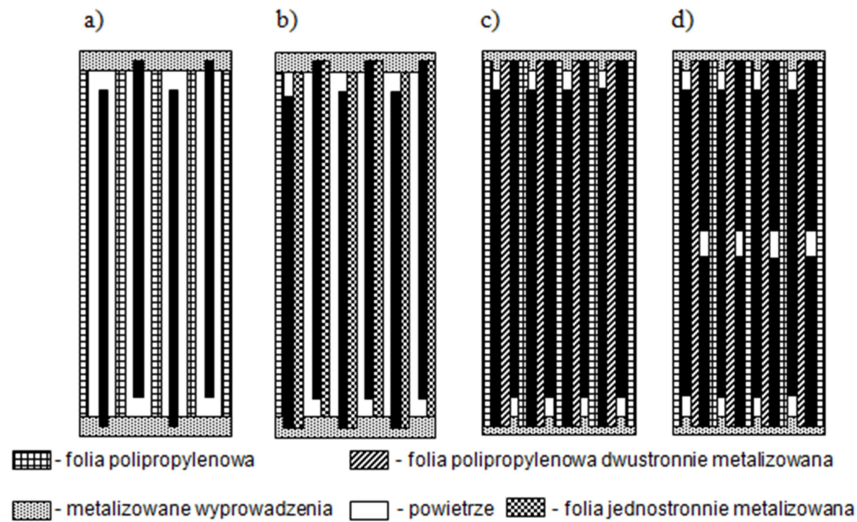
Klasztor jasnogórski usytuowany jest na około osiemdziesięciometrowym wapiennym wzniesieniu. Wieża sanktuarium jasnogórskiego, odbudowana w 1717 roku po wielkim pożarze z 16 lipca 1690 roku, miała wtedy wysokość około 89 metrów, podstawę kamienną do wysokości około 37 metrów, wyżej konstrukcję z belek drewnianych oszalowanych deskami. Drewniany hełm (wtedy najwyższej wieży w kraju) obity był blachą ołowianą z metalową kulą, na kuli umieszczono zaś metalowego kruka trzymającego w dziobie ser (znak zakonu paulinów) na jej szczycie. Będąc, od lat w dobrej komitywie z paulinami jasnogórskimi, na jesieni roku 1778, pijar ks. Józef Herman Osiński (ur. 1738 r.; zm. 1802 r.) przywiózł do Częstochowy gruby drut żelazny, baterię butelek lejdejskich w drewnianej skrzyni oraz mierniki. Założył *konduktor*, czyli gromochron (piorunochron), na szczycie wieży sanktuarium, nad metalową kulą i krukiem, i do wiosny roku 1779, przy udziale studentów Uniwersytetu Jasnogórskiego, prowadził badania ładowania baterii butelek lejdejskich w dni burzowe. Studenci Uniwersytetu Jasnogórskiego do określenia stanu naładowania baterii butelek lejdejskich stosowali elektroskopy własnej konstrukcji. Samą instalację piorunochronną podobno wykonano z użyczonego materiału i nie miała ona charakteru trwałego [3].

Kondensatory w układach wielkiej częstotliwości

W energoelektronicznych układach wielkiej częstotliwości wykorzystywane są kondensatory niepolaryzowalne (to znaczy, że biegunowość podłączenia nie odgrywa roli). Zależnie od potrzeb stosowane są następujące typy kondensatorów: tworzywowe, mikowe i ceramiczne. Od kondensatorów tworzących takie układy energoelektroniczne najczęściej oczekuje się niskich strat w obszarze przenoszonych częstotliwości przez cały okres pracy, dużej liniowości charakterystyki (izolatory używane do budowy takich kondensatorów powinny być liniowe) oraz wysokiej stabilności termicznej. W przypadku kondensatorów używanych we współczesnych obwodach wielkiej częstotliwości istotne są również ich wymiary i kształt oraz generowane przez nie straty energii elektrycznej na promieniowanie elektromagnetyczne.

Kondensatory tworzywowe wykonane są z foliowego dielektryka (tworzywa sztucznego), najczęściej polipropylenu, poliestru albo polistyrenu, rzadziej poliwęglanu lub teflonu. Okładki w kondensatorach foliowych wykonuje się z cienkich folii aluminiowych bądź cynkowych, a dla kondensatorów metalizowanych – z cienkiej warstwy aluminium powstałej w wyniku próżniowego naparowania jednostronnie lub dwustronnie na folię dielektryczną. Zaletą metalizacji jest to, że przy przebiciu elektrycznym naparowany metal wyparuje wokół miejsca przebicia i w ten sposób nie dochodzi do ewentualnego zwarcia. Powstała w wyniku procesu technologicznego taśma jest w konden-

satorach zwijkowych zwijana, a w kondensatorach wielowarstwowych układana systematycznie w kolejne warstwy. Istnieje wiele różnych technik wykonywania kondensatorów, na rys. 3 pokazano przekroje wybranych z nich [6].



Rys. 3. Przedstawione schematycznie przekroje wybranych typów zwijkowych kondensatorów a) z folią metalową, b) z folią polipropylenową jednostronnie metalizowaną, c) z folią polipropylenową dwustronnie metalizowaną, d) z folią dwustronnie metalizowaną przy szeregowym połączeniu pojemności (widoczna przerwy w metalizacji na środkowej poziomej osi kondensatora)

W układach wielkiej częstotliwości istotne znaczenie ma wykonanie doprowadzeń. We wcześniejszych konstrukcjach kondensatorów foliowych doprowadzenia były wykonywane 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 (tak wykonane kondensatory zostały pokazane na rys. 3). Wykonane w ten sposób wyprowadzenia mają znacznie mniejsze wartości rezystancji i indukcyjności. Środkowa, wewnętrzna część kondensatora jest obszarem o częściej awaryjności, a występujące uszkodzenia spowodowane są zwykle oddziaływaniami termicznymi. Aby wyeliminować skutki tych oddziaływań, stosuje się specjalne rozwiązania konstrukcyjne kondensatorów. Na rysunku 3d 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 środowisku pracy wielkiej częstotliwości (rys. 4).



Rys. 4. Rozwinięta folia rzeczywistego kondensatora z rysunku 2d, widoczne dwa foliowe zwoje metalowe i szczelina powietrzna między nimi oraz szeroki zwój z folii metalowej o krawędziach nie dotykających pionowych i poziomych kontaktów metalowych

Wyprodukowany kondensator obudowany jest zwykle tworzywem sztucznym (w postaci taśmy lub kubka). Kondensatory foliowe wykonuje się również z dielektrykiem uwarstwionym (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 stosowanych kondensatorów tworzywowych należą: kondensatory polistyrenowe, poliestrowe, poliwęglanowe i polipropylenowe. Porównanie podstawowych wartości tych materiałów podano w tablicy 1 [5].

Tablica 1. Podstawowe parametry elektryczne wybranych materiałów dielektrycznych [5]

Rodzaj dielektryka	Względna przenikalność dielektryczna ϵ_r	Współczynnik stratności $tg\delta$	Dopuszczalne natężenie pola elektrycznego E [kV/mm]
Powietrze	1,00058	<0,0001	3,5÷5
Papier impregnowany	3,5÷6	<0,002	30÷50
Szkło	10	<0,003	120÷140
Polipropylen	2,2	<0,0002	350
Poliester	3,3	<0,005	200
Poliwęglan	2,8	<0,001	150
Polistyren	2,6	<0,0002	100
Polifenyl	3,3	<0,0002	250
Ceramika	5÷50000	<6-12	4÷20
Mika	4÷8	<0,0004	120÷130

W kondensatorach z folią metalizowaną stosowanym dielektrykiem jest cienka folia izolacyjna, wykonana z różnych materiałów. Do najczęściej stosowanych należą: polipropylen, poliester oraz rzadziej poliwęglan. Do grupy coraz częściej stosowanych nowoczesnych materiałów dielektrycznych należy siarczek polifenyłu (PPS). W kondensatorze o niezmiennych wymiarach zastosowanie dielektryków o wzrastającej wartości względnej przenikalności dielektrycznej ϵ_r spełnia dualną rolę, zwiększa pojemność kondensatora oraz podnosi jego wytrzymałość elektryczną. Jednak nie każdy materiał może być zastosowany w określonym typie kondensatorów. Należy również dodać, że wzrost współczynnika przenikalności dielektrycznej ϵ_r folii zmniejsza zwykle rezystancję skrośną tego materiału oraz obniża jego wytrzymałość napięciową.

Poniżej scharakteryzowano najistotniejsze właściwości dielektryków stosowanych przy wytwarzaniu kondensatorów foliowych [5]. **Polipropylen** jest najbardziej popularnym materiałem stosowanym do budowy kondensatorów prądu zmiennego wielkiej częstotliwości. Jest trudny w obróbce mechanicznej oraz metalizacji. Jego głównymi zaletami są: niska stratność ($tg\delta$), duża wytrzymałość elektryczna propylenu na przebicie, wysoka stabilność parametrów w czasie i niska absorpcja dielektryczna. **Poliester** jest także popularnym materiałem dielektrycznym. Jest łatwy w obróbce mechanicznej i metalizacji. Można z niego uzyskać bardzo cienkie folie, o grubości rzędu 1 [μm]. Natomiast ma znaczną wartość strat dielektrycznych ($tg\delta$), małą rezystancję izolacji oraz mniejszą wytrzymałość elektryczną i występowanie znaczącej absorpcji dielektrycznej. Do jego zalet należy wysoka dopuszczalna temperatura pracy. **Poliwęglan** umożliwia wytwarzanie cienkich folii, jest łatwy w obróbce i metalizacji. Współczynnik strat dielektrycznych przyjmuje relatywnie duże wartości. Posiada niską wytrzymałość napięciową przy wysokiej temperaturze pracy. **Polifenyl (PPS)** cechuje się dużą odpornością na wysokie temperatury oraz bardzo niską stratnością, posiada dobrą stabilność parametrów w czasie. Jego podstawową wadą jest niska wytrzymałość elektryczna, co powoduje, że folie kondensatorowe muszą być grubsze, a tym samym kondensatory muszą mieć większe wymiary.

Do budowy różnych układów energoelektronicznych wielkiej częstotliwości z grupy kondensatorów tworzywowych stosowane są najczęściej kondensatory polipropylenowe. Wyróżniają się one dużą stabilnością pojemności, dużą wytrzymałością elektryczną 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 $+70^\circ\text{C}$. Polipropylen daje się łatwo 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 wielkiej częstotliwości są rzadko stosowane.

Kondensatory mikowe są stosunkowo drogie, produkowane są w zakresie pojemności od 1 [pF] do 0,1 [μF], obecnie, ze względu na swoje duże wymiary, rzadko stosowane w energoelektronicznych przemysłowych układach wielkiej częstotliwości [6]. Kondensatory mikowe, budowane są z jednej lub z kilku płytek miki z nałożonymi elektrodami metalowymi, często wykonanymi ze srebra, gdyż kondensatory te nie podlegają nagrzewaniu się przy wysokich częstotliwościach. Mika jest minerałem kopalnym występującym w Rosji, Kanadzie i Indiach, gdzie jego jakość i czystość, a tym samym przydatność do produkcji kondensatorów jest szczególnie dobra. Ma znakomite właściwości dielektryczne, jest niepalna oraz odporna na temperaturę, czynniki chemiczne i starzenie się. Ten twardy minerał po wydobyciu ze złoża ma formę tabliczkowych kryształów o pokroju pseudoheksagonalnym, dzięki dobrej łupliwości łatwo rozdzielających się na cienkie płaskie płytki, stosowane do budowy kondensatorów. Charakteryzują się niewielką wartością tangensa kąta stratności ($tg\delta$) i minimalnymi zmianami pojemności wraz ze zmianami temperatury. Właściwości elektryczne, takie jak: duża rezystancja izolacji, niewielka wartość tangensa kąta stratności dielektrycznej oraz stabilność temperaturowego współczynnika pojemności, są lepsze niż nowoczesnych kondensatorów tworzywowych oraz ceramicznych. Mimo stosunkowo dużych wymiarów, kondensatory mikowe stosuje się w militarnych układach wielkiej częstotliwości, tam gdzie wymagana jest niska stratność oraz wysoka stabilność częstotliwościowa i temperaturowa, a także ściśle określony temperaturowy współczynnik zmian pojemności. Należy dodać, że w przypadku układów przemysłowych, w których istotne znaczenie ma miniaturyzacja urządzeń, zamiast kondensatorów mikowych stosuje się kondensatory tworzywowe.

Literatura

- [1] Bierne kondensatory, seria: Elementy elektroniczne, Wydawnictwo A & Z, 1995, stron 154, ISSN 1234-1053.
- [2] Chełkowski A.; Fizyka dielektryków, Wydanie 3 zmienione, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1993, stron 395, ISBN 83-01-11245-X.
- [3] Gąsiorowski A.; Oświetlenie miasta Częstochowy do roku 1927, Piorunochrony, Telegrafy, Telefony (Prąd stały), s. 616-648, w: Monografia II Kongresu Elektryki Polskiej, T.2, Centralny Ośrodek Szkolenia i Wydawnictw, Warszawa 2016, stron 784, ISBN 978-83-61163-67-1.

- [4] Gąsiorski A., Posytek Z.; Rezonansowy falownik prądowy pracujący z trzecią harmoniczną obwodu wzbudzenia, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 12 (rocznik 91) 2015, s. 95-98, ISSN 0033-2097.
- [5] Józwiak K.; Metody oceny jakości kondensatorów foliowych, Praca doktorska, Politechnika Gdańska, Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki, Gdańsk 2011, stron 149
- [6] Katalog ELFA Nr 56/2008, wyd. ELFA Elektronika, Warszawa 2008, stron 2006.
- [7] Nowakowski R., Szymczak P., Moszyńska I.; Ewald Jürgen von Kleist – człowiek i jego dzieło, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe* Nr 4/2016 (112), s. 1-6, ISSN 0239-3646.
- [8] *Pismo Święte Starego i Nowego testamentu Biblia*, Tysiąclecie, Wydanie V, Wydawnictwo Pallottinum, Warszawa-Poznań 2016, stron 1470, ISBN: 978-83-7014-419-7.
- [9] Weinfeld S.; *Poczet wielkich elektryków*, Nasza Księgarnia, Warszawa 1968, s. 218.
- [10] Wróblewski A. K.; *Historia fizyki, od czasów najdawniejszych do współczesności*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2006, stron 620, ISBN 83-01-14635-4.