

Technologie szybkiego prototypowania 3D w elektroenergetyce

Streszczenie. W pracy opisano techniki modelowania trójwymiarowego stosowane w przemyśle, w tym zasady modelowania metodą MES, która obecnie jest powszechnie stosowana podczas procesów projektowych w różnorodnych gałęziach przemysłu. Omówiono najbardziej popularne metody druku przestrzennego stosowane do wytwarzania zaprojektowanych elementów. Wskazano, że druk przestrzenny nie jest jeszcze rozpowszechniony w branży energetycznej tak jak w innych gałęziach przemysłu, co warunkuje możliwość jego zastosowania do produkcji izolacyjnych elementów konstrukcyjnych linii energetycznych. W pracy zaprezentowano w pełni funkcjonalny element osprzętu linii energetycznej wykonany przy użyciu technologii FDM wraz z wynikami badań.

Abstract. Publication presents the variety of 3D modeling techniques in industry, and describes the principle of FEM modeling, which is now commonly used in design processes in various industries. The 3D printing methods of designed elements were also shown, and the most popular ones were described. It was pointed out that the 3D printing in the power industry is not yet as popular as in other industries, which significantly increases the possibilities for the development of insulation parameters of power line construction elements. A fully functional element made using FDM technology was presented, which shows the usefulness of this technology as well as gives further opportunities for its development. (3D rapid prototyping technologies in the power industry).

Słowa kluczowe: modelowanie komputerowe, druk przestrzenny, elektrotechnika, elektroenergetyka, materiały dielektryczne, materiały izolacyjne

Keywords: computer modeling, 3D printing, electrical engineering, power engineering, dielectric materials, insulating materials

Wstęp

Dzięki dynamicznemu rozwojowi techniki komputerowej na przestrzeni ostatnich kilkudziesięciu lat powstało wiele różnorodnych narzędzi i technik przystosowanych do tworzenia grafiki 3D. Pomimo iż możliwość prezentacji obiektów w trzech wymiarach jest dostępna w inżynierii już od dość długiego czasu, to jej technologia jest ciągle udoskonalana. W obecnych czasach bardzo szybki proces ewolucji procesorów graficznych GPU (ang. *Graphics Processing Unit*) doprowadził do tego, że praktycznie wszystkie dostępne na rynku karty graficzne są zaopatrzone we wbudowane funkcje, które mają za zadanie ułatwiać tworzenie obrazu przestrzeni trójwymiarowej.

Należy również zauważyć, iż obecnie istnieje wiele różnorodnych technik druku przestrzennego. Z roku na rok technologie te są ciągle udoskonalane i unowocześniane. Modelowanie trójwymiarowe jest więc nieodłącznym procesem poprzedzającym wykonywane na późniejszym etapie prace optymalizujące stworzone obiekty oraz docelowo sam wydruk zaprojektowanych elementów. Obecne techniki drukarskie dają ogromne możliwości naukowcom i inżynierom z wielu różnych dziedzin nauki i gałęzi przemysłu. Istnieje więc potencjalna możliwość zastosowania tych technologii do tworzenia wybranych (wcześniej odpowiednio zaprojektowanych) elementów osprzętu linii energetycznych, zarówno tych przesyłowych jak i rozdzielczych.

Modelowanie przestrzenne w przemyśle

Wydawać by się mogło, że rozwijana od ponad pięćdziesięciu lat technologia jest już wystarczająco zaawansowana, lecz twórcy wyspecjalizowanych w tej dziedzinie oprogramowań ciągle je udoskonalają. Obecnie komputerowe przetwarzanie obrazów oraz związane z nim projektowanie różnorodnych elementów wykorzystywanych w przemyśle stało się pewnego rodzaju standardem.

Najczęściej wykorzystywanymi sposobami modelowania 3D to modelowanie oparte na wykorzystaniu krzywych NURBS (ang. *Non-uniform rational B-splines*). Technika ta oparta jest na wykorzystaniu składowych fragmentów krzywych Béziera do zamodelowania dowolnego kształtu. Kształt krzywej NURBS jest zależny w dużej mierze od ilości węzłów oraz punktów kontrolnych znajdujących się na

modelowanej krzywej. Dodatkowo istotnym aspektem jest też sama waga punktów kontrolnych. Dowolny punkt na krzywej określa się następującym wzorem:

$$(1) \quad p(t) = \frac{\sum_{i=0}^{m-n-1} w_i p_i N_i^n(t)}{\sum_{i=0}^{m-n-1} w_i N_i^n(t)} \quad \text{dla } t \in [u_n, u_{m-n}]$$

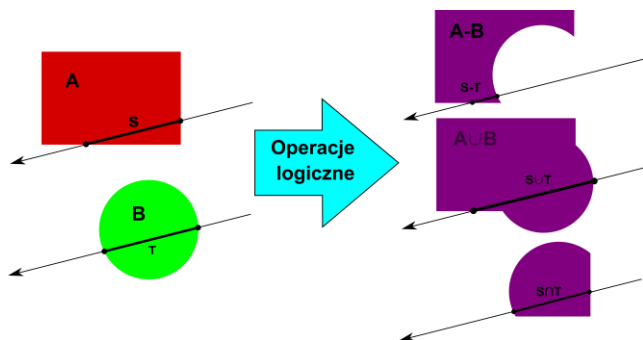
gdzie: N_i^n jest unormowaną funkcją B-sklejaną, p_0, \dots, p_{m-n-1} to punkty kontrolne, u_0, \dots, u_m – węzły, w_0, \dots, w_{m-n-1} – to wagi punktów kontrolnych, wyrażone liczbą ze zbioru liczb rzeczywistych, n – stopień sklejenia wielomianów [1].

Popularnym oprogramowaniem opartym o technologię NURBS i wykorzystywanym w przemyśle jest autorskie oprogramowanie firmy Autodesk o nazwie AutoCAD. Pierwsza wersja oprogramowania została wydana w 1982 roku i jest ona udoskonalana aż do dzisiaj. Użycie tego rodzaju krzywych podczas projektowania obiektów pozwala na tworzenie ich ze zdecydowanie większą dokładnością, niż w przypadku techniki modelowania wielokątowego (ang. *polygonal modeling*).

Modelowanie wielokątowe to proces polegający na aproksymacji, czyli budowaniu rozwiązań w taki sposób, który nie posiada analitycznej możliwości jego przedstawienia za pomocą siatki tworzącej wielokąty. Technologia ta pozwala na tworzenie wysoce precyzyjnych obiektów, przy czym jest ona wykorzystywana w przemyśle rzadziej, gdyż zwykle wymaga ona zaangażowania o wiele więcej zasobów sprzętowych niż technologia NURBS [2]. Im większa dokładność obiektu, tym więcej wygenerowanych wielokątów składowych całej siatki wielokątów danego obiektu, a tym więcej obliczeń musi przetworzyć komputer.

Przy tworzeniu różnych obiektów przestrzennych w szeroko rozumianym przemyśle stosuje się również sposób modelowania trójwymiarowego wykorzystujący konstruktywną geometrię bryły CSG (ang. *Constructive Solid Geometry*). Technika ta bazuje na reprezentacji danych obiektów poprzez zastosowanie przy ich tworzeniu drzewa działań logicznych takich jak sumy, różnice czy iloczyny. Działania te wykonywane są na tak zwanych prymitywach (są to proste figury geometryczne takie jak sześciany, walce, stożki, itp.). Wykorzystanie prymitywów ma na celu zamodelowanie znacznie bardziej złożonych

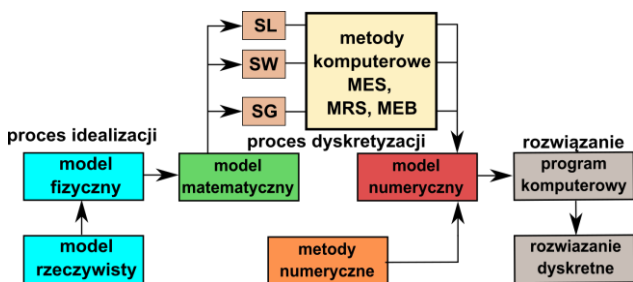
modeli poprzez szereg wykonanych operacji logicznych [3]. Pozwala to na poddawanie praktycznie nieskończonej ilości działań modyfikujących dany obiekt. Technika ta jest najczęściej stosowana podczas pracy w programach 3ds Max firmy Autodesk oraz Blender. Oprogramowania pomimo różnic licencyjnych (pierwsze narzędzie posiada płatną licencję, drugie funkcjonuje jako w pełni darmowe narzędzie GPL, ang. *General Public License*) korzystają z tej samej technologii [4].



Rys.1. Przykład zastosowania wybranych operacji w technice CSG (Źródło: opracowanie własne na podstawie [4])

Metoda elementów skończonych (MES)

Metody komputerowe są procesami analizy różnego rodzaju zagadnień, które wykorzystują przybliżone metody obliczeniowe zaimplementowane w postaci programu komputerowego. Metody rozwiązań przybliżonych cieszą się coraz to większą popularnością między innymi w mechanice, termodynamice czy elektrodynamice. Są one najczęściej wiązane z programami CAE (ang. *Computer Aided Engineering*), które wykorzystując zaawansowane metody komputerowe umożliwiają modelowanie różnych zjawisk fizycznych, w układach o zróżnicowanych stopniach zaawansowania. Programy te pozwalają na symulację dynamiki/kinematyki układu, analizę przepływu ciepła, naprężeń, czy aerodynamiczności złożonych obiektów. Zastosowanie tej technologii w przemyśle znacząco usprawnia proces projektowania bardziej skomplikowanych obiektów, a tym samym ma duży wpływ na obniżenie kosztów tego procesu.



Rys.2. Schemat realizacji metody komputerowej (Źródło: opracowanie własne na podstawie [5])

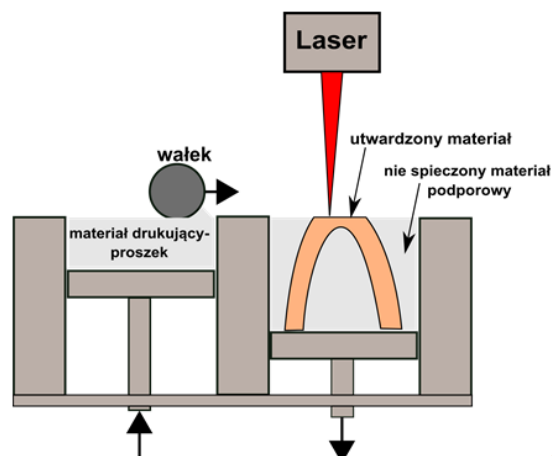
Metoda elementów skończonych to procedura wariacyjna rozwiązywania równań różniczkowych (funkcje aproksymacyjne wyznacza się w obszarze zastąpionym przez zbiór prostych podobszarów nazywanych elementami skończonymi). Funkcje aproksymacyjne to wielomiany algebraiczne, które wyznacza się według zasad aproksymacji interpolacyjnej. Dla inżyniera MES to nic innego jak jedna z kolejnych metod obliczeniowych, która podczas procesu opracowywania danego modelu pozwala na znalezienie w przybliżony sposób funkcji rozwiązujących problemy brzegowe. Należy zaznaczyć, iż główną zaletą tej metody jest możliwość uzyskania stosunkowo precyzyjnych wyników dla skomplikowanych kształtów/obiektów, dla

których przeprowadzenie obliczeń analitycznych jest bardzo utrudnione lub niemożliwe [5].

Obecnie na rynku dostępnych jest zaledwie kilka zaawansowanych oprogramowań posiadających na tyle wysoce zaawansowaną technologię symulacji zjawisk fizycznych, rozkładu sił mechanicznych czy oddziaływania różnorodnych sił i umożliwiający projektowania elementów przemysłowych o skomplikowanych kształtach. Jednym z takich programów jest Simcenter 3D, opracowany przez firmę Siemens. Daje ono możliwość uniknięcia wielu błędów związanych z procesem konstrukcyjnym oraz pozwala ono na integrację różnych dziedzin obliczeniowych. Narzędzie to pozwala na symulację zachowywania się tworzonych elementów przy jednoczesnym oddziaływaniu kilku zjawisk fizycznych. Należy nadmienić, iż oprogramowanie to może zostać wykorzystane przy projektowaniu konstrukcyjnych elementów izolacyjnych energetycznych linii przesyłowych. Zaprojektowany element, podczas procesu badawczego, może zostać zoptymalizowany pod kątem rozkładu pola elektrycznego w jego otoczeniu, a tym samym ograniczenia procesów przebiegowych występujących w krytycznych warunkach środowiskowych, co skutkować będzie znaczną poprawą jego finalnych parametrów użytkowych.

Druk przestrzenny, czyli technologia przyrostowa

Powszechnie uważa się, iż różnego rodzaju techniki druku przestrzennego są dopiero od niedawna stosowane powszechnie w procesach projektowo-produkcyjnych. Nie jest to prawda. Prace nad koncepcją technologii druku przestrzennego sięgają lat 70-tych XX wieku. Pierre Ciraud, bo to jego uważa się za pomysłodawcę projektu pierwszej drukarki przestrzennej, opisał metodę wytwarzania obiektów o dowolnym kształcie poprzez dodawanie warstwa po warstwie sproszkowanego materiału, który to był spiekany źródłem energii cieplnej pod postacią wiązki laserowej. Technologia ta, nazywana SLS (ang. *Selective Laser Sintering*), jest ciągle udoskonalana i stanowi jedną z najbardziej popularnych metod szybkiego prototypowania elementów.



Rys.4. Schemat procesu wytwarzania elementu w technologii SLS (Źródło: opracowanie własne)

Jednocześnie jest to najpopularniejsza technologia w produkcji małoseryjnej części wykonywanych z tworzyw sztucznych o dobrych właściwościach mechanicznych. Technologia ta zapewnia wysoką jakość zespolenia ze sobą poszczególnych warstw, minimalizując ryzyko ich oddzielenia się od siebie. Ma to znaczący wpływ przy tworzeniu elementów, które podczas użytkowania poddawane są częstemu występowaniu różnorodnych naprężeń. Trwałe zespolenie warstw w drukowanych elementach poprawia również ich parametry izolacyjne, co ogranicza możliwość wystąpienia wylądowań niezupełnych

(ulot elektryczny), a w krytycznych przypadkach również zjawiska przebicia elektrycznego, co jest szczególnie istotne dla elementów wytworzonych jako osprzęt linii energetycznych [6]. Technologia ta jest alternatywą dla produkcji elementów z formowania wtryskowego, ponieważ umożliwia wytwarzanie elementów posiadających wysoce złożoną geometrię, pozwalającą uzyskiwać 12-te lub 13-te klasy dokładności wymiarowej, zgodnie z normą EN ISO 286-1. Technologia ta posiada swoje wady, którymi są dość duża ziarnistość i porowatość powierzchni drukowanych części, co często wymusza konieczność zastosowania dodatkowej obróbki poprodukcyjnej, mającej na celu ich wygładzenie. Na uwagę zasługuje również fakt, że dostępność przemysłowych systemów SLS jest znacznie niższa niż w przypadku systemów FDM albo SLA, skutkiem czego czas realizacji zamówień jest wydłużony.

Znacznie bardziej dostępna technologia sterylografii addytywnej SLA (ang. *Stereolithography*), pozwala na szybsze wytwarzanie elementów, poprzez ograniczenie czasu oczekiwania na rozpoczęcie ich procesu produkcji.

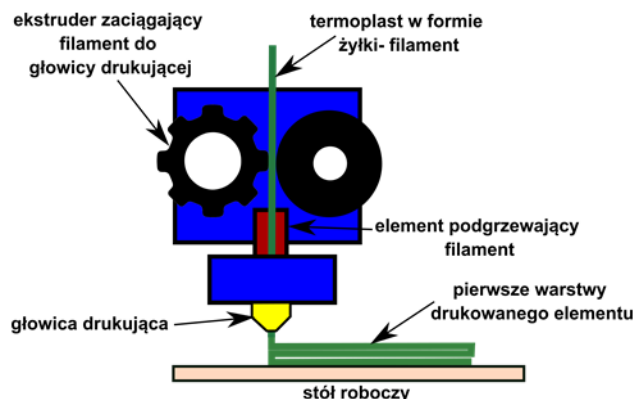


Rys.4. Proces wytwarzania modelu – druk 3D w technologii SLA (Źródło: opracowanie własne)

Proces wytwarzania części polega na utwardzaniu materiałów składających się ze związków chemicznych o małej masie cząstkowej, zwanych również monomerami. Materiałem, z którego wytwarzane są elementy, nie jest proszek jak w technologii SLS, lecz płynna żywica, która jest utwardzana za pomocą wiązki lasera odbijanej przez lustro. Do ostatecznego utwardzenia modelu stosuje się naświetlanie promieniowaniem UV. Dużą zaletą tej techniki jest możliwość drukowania większych elementów, bez ryzyka powstania znaczących odkształceń jego struktury. W przypadku stosowania technologii druku przestrzennego do wytwarzania form dla prototypów produktów, wiele firm decyduje się na użycie właśnie technologii SLA.

Najczęstszym zastosowaniem tej techniki jest tworzenie form odlewniczych zamodelowanych obiektów. Stereolitografia addytywna, praktycznie jak każda technologia wytwarzania, ma niezliczoną ilość zalet, ale i też swoje wady. Pomimo ciągle spadających cen urządzeń, zakup profesjonalnej drukarki SLA to wciąż dość duży wydatek, aczkolwiek nie tak duży, jak w przypadku wspomnianych wcześniej przemysłowych drukarek SLS. Niemniej jednak wielu producentów nie może sobie pozwolić na wysokie koszty związane z zakupem drukarki SLA. Dodatkowo oprócz samej ceny zakupu urządzenia, niezbędne są również materiały eksploatacyjne takie jak wysokiej jakości ciekłe żywice czy płukania wydrukowanych elementów, które jest wielokrotnie droższe od filamentów stosowanych w FDM. Należy również pamiętać, że przy produkcji większej ilości elementów konieczne jest odseparowane pomieszczenie z zamontowanym wydajnym systemem wentylacji, ze względu na szkodliwy dla zdrowia charakter tych substancji.

Na rynku istnieje jednak wiele znacznie tańszych technik druku przyrostowego, ma przykład wspomniana technologia FDM (ang. *Fused Deposition Modeling*), która jest obecnie najbardziej rozpowszechnioną metodą druku przestrzennego. Jej popularność wynika z stosunkowo niskich kosztów zakupu urządzenia do druku, niskich kosztów eksploatacji oraz dużej gamie dostępnych na rynku materiałów drukarskich, tzw. filamentów. W technologii FDM podczas procesu drukarskiego wykorzystuje się różnego rodzaju termoplasty (tworzywa sztuczne), które służą do formowania geometrii w wysokich temperaturach. Elementy wytwarzane za pomocą tej technologii w ogólnym założeniu wykonuje się warstwa po warstwie, podobnie jak w technologiach SLA i SLS, lecz z zastosowaniem podgrzanego do wysokiej temperatury termoplastu. Materiał początkowo w formie cienkiej żyłki (zazwyczaj o średnicy 1,75 lub 2,85 mm) nawiniętej na szpulę jest ekstrudowany z podgrzewanej dyszy bezpośrednio na stół roboczy. Zależnie od stosowanego materiału i modelu urządzenia filamenty podgrzewa się do temperatury w zakresie od 190°C do 260°C. Bardzo ważnym elementem podczas wytwarzania części metodą FDM jest ciągły i bezawaryjny system dosyłania filamentu do głowicy drukującej [6].



Rys.5. Schemat głowicy drukarki 3D stosowanej w technologii FDM (Źródło: opracowanie własne)

Większość drukarek FDM posiada jedną głowicę drukującą co pozwala na wydruk modelu tylko z jednego rodzaju materiału. Dostępne są jednak drukarki, które pozwalają na wydruk przy pomocy czterech lub nawet pięciu filamentów o różnych kolorach i parametrach jednocześnie. Daje to o wiele większe możliwości niż w przypadku druku jednym materiałem.

Druk metodą FDM jest stosunkowo tani w porównaniu do technologii SLS i SLA, jednak wytworzone elementy nie są tak precyzyjne jak przy zastosowaniu metod SLS i SLA.

Osprzęt izolacyjny napowietrznych linii energetycznych

Sieć elektroenergetyczna to rozbudowany zespół połączonych i współpracujących ze sobą elementów takich jak linie napowietrzne i kablowe, stacje transformatorowo-rozdzielcze oraz urządzenia pomocnicze, których zadaniem jest przesył energii elektrycznej z elektrowni i jej rozdział pomiędzy poszczególnych odbiorców. Poprawnie działający system elektroenergetyczny zapewnia bezpieczeństwo energetyczne, czyli stan gospodarki, który umożliwia pokrycie bieżącego i perspektywicznego zapotrzebowania odbiorców na energię elektryczną. Sieci elektroenergetyczne są projektowane i budowane według określonych norm i standardów technicznych, co ma na celu zapewnić bezpieczeństwo oraz minimalizować ryzyko powstawania wypadków lub awarii, a tym samym przerw w dostawie energii elektrycznej do odbiorców (obiekty przemysłowe, użyteczności publicznej i gospodarstwa domowe). Jednym z ważniejszych elementów składowych linii energetycznej

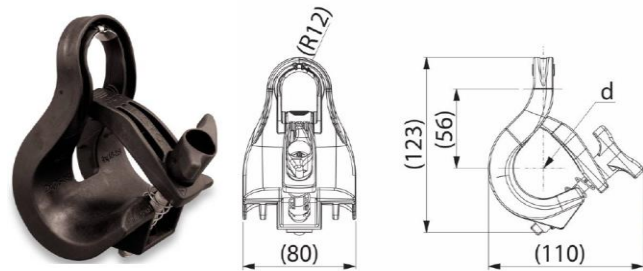
jest osprzęt izolacyjny, który ma zapewnić bezpieczne zawieszenie przewodów na konstrukcji wsporczej bez ryzyka wystąpienia przebicia.

Parametry izolacyjne stosowanego obecnie osprzętu uległy znaczącej poprawie, a co z tego wynika zmniejszyła się ich podatność na awarie i uszkodzenia. Osprzęt jest również o wiele bardziej rozwinięty niż jeszcze kilkanaście lat wstecz, kiedy – ze względu na brak możliwości zastosowania tworzyw sztucznych – wykorzystywano najczęściej elementy stalowe izolowane za pomocą ceramiki lub szkła, co nie dawało zbyt dużych możliwości rozwoju. Obecnie dzięki stosowaniu tworzy sztucznych oraz między innymi technologii wtrysku PVC wzrosły możliwości projektowe w całej branży energetycznej, a zwłaszcza przy tworzeniu osprzętu linii napowietrznych. Nowoczesne materiały łączą ze sobą wiele potrzebnych cech, takich jak: wytrzymałość na różnice temperatur, odporność na promieniowanie UV czy trudnopalność.

Podstawowym osprzętem izolacyjnym stosowanym w napowietrznych liniach rozdzielczych do 1kV w systemie izolowanym czteroprzewodowym są:

- zaciski przebijające izolację,
- uchwyty odciągowe z wkładkami wykonanymi z tworzyw sztucznych, zapobiegającymi uszkodzeniu izolacji przewodu,
- uchwyty przelotowe wykonane w systemie hybrydowym (połączenie stali z wkładką z tworzywa sztucznego) lub uchwyt lekki, w całości z tworzywa sztucznego.

Na szczególną uwagę zasługuje element wymieniony jako ostatni, który to został wykonany w całości z tworzywa sztucznego, a jedynym elementem stalowym jest śruba łącząca wszystkie jego części.



Rys.6. Schemat uchwyty przelotowego SO270 2-4x(25-120) mm² prod. ENSTO [7]

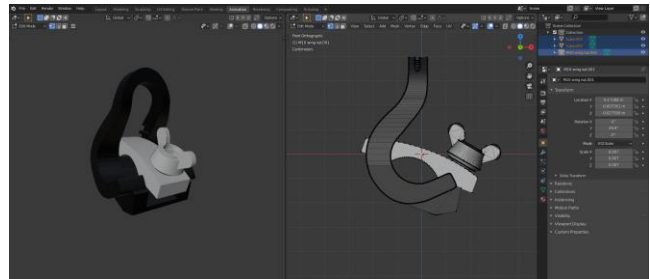
Uchwyt ten jest powszechnie stosowanym elementem osprzętu linii energetycznej. Spełnia on wszystkie stawiane przed nim wymagania zapisane w odnośnych normach (tj. PE-EN-50483-4/5/6) oraz dodatkowo spełnia wymagania dotyczące temperatur podczas procesu montażu, które zgodnie z normą PE-EN-50483-2:2009 nie powinny być niższe niż -15°C (temperatura eksploatacji wynosi 25°C). Obrazuje to wspomniany wcześniej rozwój technologiczny, zarówno na poziomie inżynierii materiałowej (ze względu na dobór odpowiedniego tworzywa spełniającego parametry wytrzymałościowe), jak również branży projektowej, w której wykorzystuje się najnowsze oprogramowanie służące do modelowania przestrzennego rozkładu pola elektrycznego powstałego wokół obiektu.

Osprzęt linii elektroenergetycznych a druk 3D

Obserwując rozwój technologiczny zarówno technologii przestrzennych, w tym różnych programów do modelowania przestrzennego, jak i rozmaitych technologii przyrostowych, zapostulowano możliwość wykorzystania druku 3D do wytworzenia osprzętu linii elektroenergetycznych. W tym celu podjęto próbę ponownego zaprojektowania jednego z dostępnych na rynku uchwytów przelotowych, przy czym dostosowano tworzony model pod kątem druku

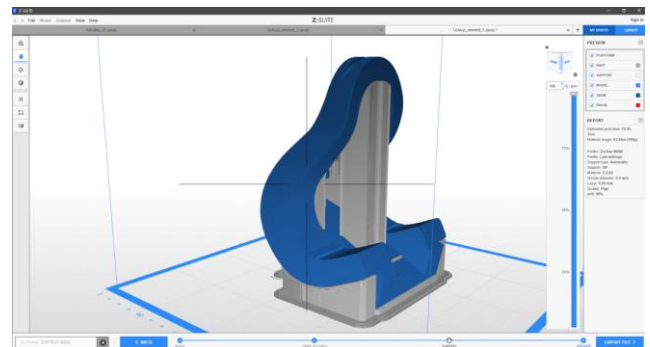
przestrzennego. Skupiono się na wewnętrznej strukturze obiektu oraz na doborze takiego materiału drukarskiego, który posiada odpowiednie parametry dielektryczne.

Pierwszym, bardzo istotnym etapem tego procesu było zamodelowanie obiektu przy pomocy narzędzia do modelowania przestrzennego. Model obiektu wykonano w darmowym oprogramowaniu Blender. Nie jest to najnowsze oprogramowanie, lecz ze względu na ciągłe prace nad jego rozwojem wciąż doskonale nadające się do tego typu zastosowań. Oprogramowanie to daje szeroki zakres narzędzi oraz technik służących do tworzenia rozmaitych obiektów, między innymi: Krzywe Béziera, powierzchnie typu NURBS, siatki wielokątów czy konstruktywną geometrię brył CSG.



Rys.7. Widok okna programu Blender: gotowy model uchwyty przelotowego w formacie .blend (Źródło: opracowanie własne)

Zamodelowany obiekt przeniesiono do oprogramowania Z-Suit, firmy ZORTRAX. Narzędzie to służy do zarządzania drukiem 3D, jak również daje możliwość dostosowania zaimportowanego modelu pod kątem skalowania modelu oraz wyboru jego struktury wewnętrznej, co ma znaczenie w przypadku testów określających wytrzymałość elementu na przebicie. Program zapewnia dodatkowo możliwość optymalizacji modelu pod kątem jego ułożenia na platformie roboczej, co ma znaczący wpływ w kontekście osiągnięcia najlepszych parametrów drukowanego modelu. Należy wspomnieć, iż istotnym aspektem podczas dostosowywania obiektu do druku jest odpowiednie ułożenie podpór (czyli tzw. suportu), co przedstawiono na rysunku 8. Ma to wpływ na stabilność obiektu podczas druku i zapewnia uzyskanie właściwego efektu końcowego, gdyż zmniejsza ryzyko wystąpienia odkształceń modelu. Przy czym nadmierne stosowane podpór skutkuje znacznym wzrostem zużycia materiału drukarskiego, a zatem wzrastają również koszty druku takiego elementu.



Rys.8. Widok programu Z-Suit: nałożony suport (Źródło: opracowanie własne)

Ważnym aspektem procesu wytwórczego elementu jest dobór materiału drukarskiego. W opisywanym przypadku zastosowano powszechnie dostępny materiał firmy Zortrax. Jest to filament o nazwie Z-ESD charakteryzujący się znaczącą rezystywnością powierzchniową (10^6 - 10^9 Ω/sq), co pozwala na wykorzystanie go do tworzenia obiektów,

w których występuje ryzyko przepływu prądu elektrycznego (np. podczas uszkodzenia warstwy izolacyjnej przewodu typu AsXSn, do której przytwierdzony jest uchwyt). Ponadto materiał ten posiada wytrzymałość na rozciąganie rzędu 32,88 MPa wg. ISO 527:1998, co znacząco wpływa na zachowanie odpowiedniej wytrzymałości elementu podczas wystąpienia krytycznych naprężeń przy trudnych warunkach pogodowych.

Po zakończonym procesie modelowania i odpowiednim zaimplementowaniu parametrów drukarskich zrealizowano próbną wydruk elementu w technologii FDM. Rezultaty prac, tj. gotowy uchwyt przelotowy linii nN, przedstawiono na rysunku 9. Przybliżony sumaryczny czas wydruku uchwytu to około 36 godzin, a masa zużytego materiału drukarskiego to 225 gramów. Parametry czasowe podano dla drukarki firmy ZORTRAX M200, co jest istotne, gdyż czas wytworzenia takiego elementu może ulegać znacznym zmianom zależnie od posiadanej bazy sprzętowej.



Rys.9. Uchwyt przelotowy linii napowietrznej izolowanej wykonany w technologii druku 3D (Źródło: opracowanie własne)

W celu doświadczalnej weryfikacji poprawności działania oraz wytrzymałości elektrycznej wydrukowanego uchwytu, zaprojektowano i wykonano układ pomiarowy, zasilany z transformatora 220 V/60 kV. Służył on do zamodelowania krytycznych warunków jakie mogą wystąpić w izolowanej napowietrznej linii energetycznej niskiego napięcia. Element zbadano w przypadku odpowiadającym największemu ryzyku uszkodzenia warstwy izolacyjnej (przetarcia), czyli w punktach styku przewodu AsXSn z końcami uchwytu przelotowego. Przetarcie zamodelowano przez wykonanie mechanicznego uszkodzenia izolacji, co przedstawiono na rysunku 10.



Rys.10. Uchwyt przelotowy z zamontowanym odcinkiem przewodu uszkodzoną izolacją (Źródło: opracowanie własne)

Wydrukowany uchwyt przelotowy, został podwieszony oraz przymocowany do stalowej, uziemionej konstrukcji. Następnie w uchwycie przelotowym zamontowano odcinek przewodu samonośnego AsXSn 4x120mm² 0,6/1kV firmy ELPAR o długości 70 cm z uszkodzoną izolacją. Przewód został dokręcony śrubą dociskową bez potrzeby stosowania dodatkowych narzędzi. Układ zasilono z transformatora i przeprowadzono próby napięciowe napięciem 1 kV i 6 kV. Uchwyt przelotowy spełnił założenia i zadziałał poprawnie,

gdyż nie nastąpiło przebicie elektryczne do konstrukcji montażowej.

Tabela 1. Próba napięciowa dla napięcia 1 kV przy uszkodzonej izolacji przewodu [opracowanie własne]

Lp.	U_p [kV]	t [s]	Przeskok (tak / nie)	Próba napięciowa (pozytywna / negatywna)
1	1	60	NIE	pozytywna
2	1	60	NIE	pozytywna
3	1	60	NIE	pozytywna

Tabela 2. Próba napięciowa dla napięcia 6 kV przy uszkodzonej izolacji przewodu [opracowanie własne]

Lp.	U_p [kV]	t [s]	Przeskok (tak / nie)	Próba napięciowa (pozytywna / negatywna)
1	6	60	NIE	pozytywna
2	6	60	NIE	pozytywna
3	6	60	NIE	pozytywna

Pomiary wykonano w temperaturze równej 24°C, przy stosunkowo niskiej wilgotności powietrza (około 33%). Oznacza to, że przy wzroście wilgotności powietrza nie wyklucza się nasilenia występującego zjawiska ulotu elektrycznego (zwłaszcza przy próbach napięciowych rzędu 6kV) lub nawet przebicia. Należy więc na późniejszym etapie badań przeprowadzić dodatkowe próby napięciowe w zróżnicowanych warunkach środowiskowych, w tym dla przypadku wysokiej wilgotności wokół badanego elementu. Wartość zmierzonego prądu upływu to ~0,12 mA przy napięciu 1kV i ~0,15 mA przy napięciu 6 kV, co potwierdza brak przebicia elektrycznego elementu.

Podsumowanie

W pracy wykazano przydatność technik modelowania oraz druku 3D do wykonania osprzętu linii energetycznych niskiego napięcia. Opracowana i wykonana konstrukcja może być poddawana dalszym modyfikacjom w zakresie struktury zewnętrznej i wewnętrznej oraz zastosowanych materiałów, m. in. pod kątem właściwości elektrycznych i mechanicznych, odporności na promieniowanie UV, jak też redukcji masy elementu. Dodatkowo, zastosowanie bardziej zaawansowanego oprogramowania graficznego, posiadającego wbudowane funkcje wykorzystujące metody MES, daje możliwość uwzględnienia analizy rozkładu pola elektrycznego w procesie projektowania, a tym samym optymalizacji właściwości końcowych elementu. Powyższe zagadnienia będą obszarem dalszych prac badawczych.

Autorzy: mgr inż. Mateusz Rak; dr hab. inż. Mariusz Najgebauer, prof. PCz; dr inż. Jarosław Jedryka; Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: mateusz.rak@pcz.pl, mariusz.najgebauer@pcz.pl, jaroslaw.jedryka@pcz.pl.

LITERATURA

- [1] Schneider P., NURB Curves: A Guide for the Uninitiated, MACTECH, 26.09.2014
- [2] Matulewski J., Grafika 3D czasu rzeczywistego, PWN, Warszawa, 2014
- [3] Foley J.D., Computer Graphics: Principles and Practice, 1996
- [4] Fayolle P.A., Pasko A., An evolutionary approach to the extraction of object construction trees from 3D point clouds, Computer-Aided Design, 2016
- [5] Hughes T.J.R., The Finite Element Method: Linear Static and Dynamic Finite Element, Dover Publications, 2000
- [6] Paliga I.J., Popularne technologie druku 3D, Studio, 2016
- [7] Ensto Pol Sp. z o.o., Katalog wyrobów dla energetyki, 2023