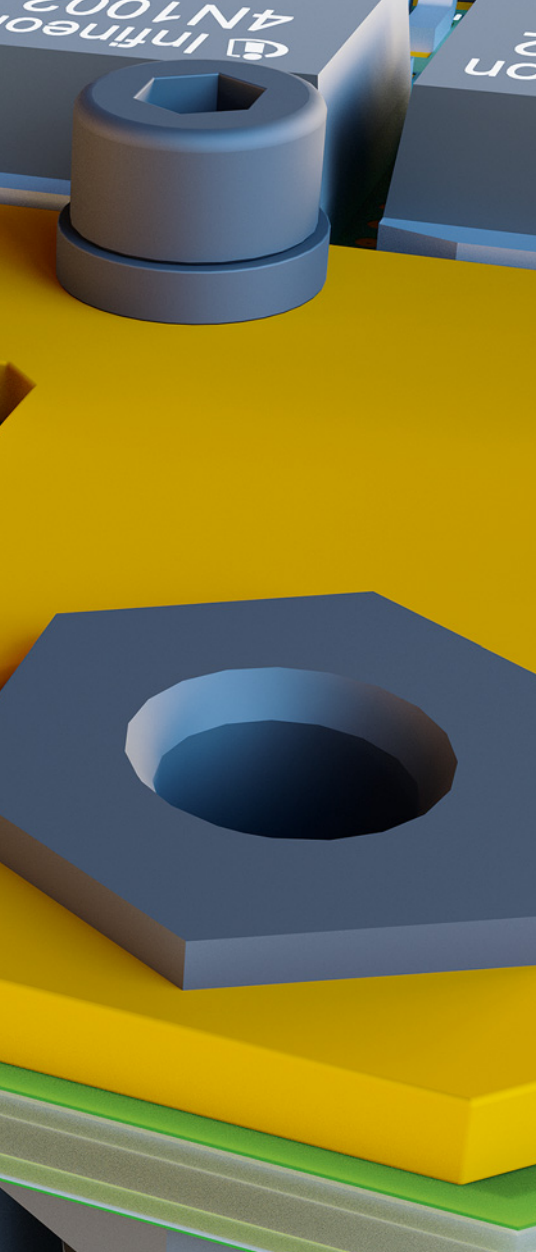


Szczeliny powietrzne i ścieżki upływu w płytkach drukowanych

Wysokie napięcie stanowi zagrożenie nie tylko dla życia i zdrowia, ale także dla obwodów drukowanych. Niezbędna do działania moc dostarczona do urządzeń elektronicznych może być jednocześnie dla nich destrukcyjna. Aby zapewnić bezpiecznie działający układ zasilania, odległości między materiałami przewodzącymi i między wysokimi potencjałami muszą być wystarczająco duże, aby nie dochodziło do niepożądanych wyładowań.



Przepisy bezpieczeństwa dotyczące zjawiska iskrzenia oraz wytrzymałości dielektrycznej mają przede wszystkim na celu ochronę życia ludzkiego. Specjalne normy dotyczące zachowania bezpiecznych odległości od obiektów pod wysokim napięciem istnieją wszędzie tam, gdzie przewożeni są ludzie a ich życie może być zagrożone. Zastosowania te obejmują więc przede wszystkim windy, pojazdy i samoloty, ale także sprzęt medyczny. Ważna jest także wytrzymałość dielektryczna materiałów, ponieważ nie tylko elektronika może ulec zniszczeniu. Awaria lub nieprawidłowe działanie mogą mieć katastrofalne skutki. Jeśli chodzi o życie ludzkie, kwestie odpowiedzialności i ochrony ubezpieczeniowej mają ogromne znaczenie dla producentów.

Postęp w elektronice odbywa się w szalonym tempie ze względu na trendy

w e-mobilności, automatyzacji i energii odnawialnej. Napędy (falowniki) do silników elektrycznych są już używane nie tylko stacjonarnie, ale również mobilnie w pojazdach. Półprzewodnikowe elementy mocy, takie jak tranzystory IGBT, MOSFET lub diody SiC o wyższym napięciu, służą do optymalizacji wydajności jednostek sterujących. W zależności od zastosowania istnieją różne wartości maksymalne dla niskiego napięcia, średniego napięcia i wysokiego napięcia. Aby chronić ludzi lub instalacje przed skutkami awarii elektrycznych, zwłaszcza w przypadku przepięć, odstępów izolacyjnych oraz wytrzymałość dielektryczna muszą być odpowiednio dostosowane.

Szczeliny powietrzne i ścieżki upływu

Szczelina powietrzna jest najkrótszą drogą między dwoma przewodami elektrycznymi przechodzącą przez powietrze. Gdy do obu przewodów zostanie przyłożone wysokie napięcie, powietrze pomiędzy nimi się jonizuje i staje się lepszym przewodnikiem. W zależności od wartości napięcia, stopnia zanieczyszczenia, czasu trwania i ciśnienia powietrza może wystąpić zwarcie i wówczas powstaje łuk elektryczny. Wyładowanie powoduje zwiększenie temperatury, powstanie pola elektromagnetycznego i niepożądany transfer ładunku między dwoma przewodnikami. Te oddziaływania mogą zniszczyć elektronikę lub sąsiednie komponenty. Przy projektowaniu odstępów decydujące są znamionowe napięcia przebicia, które wynikają z kategorii przepięciowej i przyłożonego napięcia.

W przypadku ścieżki na PCB dochodzi do zwarcia między dwoma przewodami na powierzchni materiału izolacyjnego przy przekroczeniu napięcia efektywnego. Na płytkach drukowanych prąd przechodzi („pełza”) po powierzchni FR-4, lakieru ochronnego, podzespołach i kablach. Stąd ścieżka upływu to najkrótsze połączenie wzdłuż powierzchni izolatora między przewodami.

Wilgotność i ciśnienie powietrza wpływają na napięcie przebicia izolatora w powietrzu i prawdopodobieństwo powstania łuku elektrycznego. Wilgoć, oleje i kurz, które osadzają się na powierzchniach płytki drukowanej i podzespołów z czasem zmniejszają efektywną ścieżkę upływu między przewodami.

Jeśli odległość między dwiema ścieżkami na płytce drukowanej jest zbyt

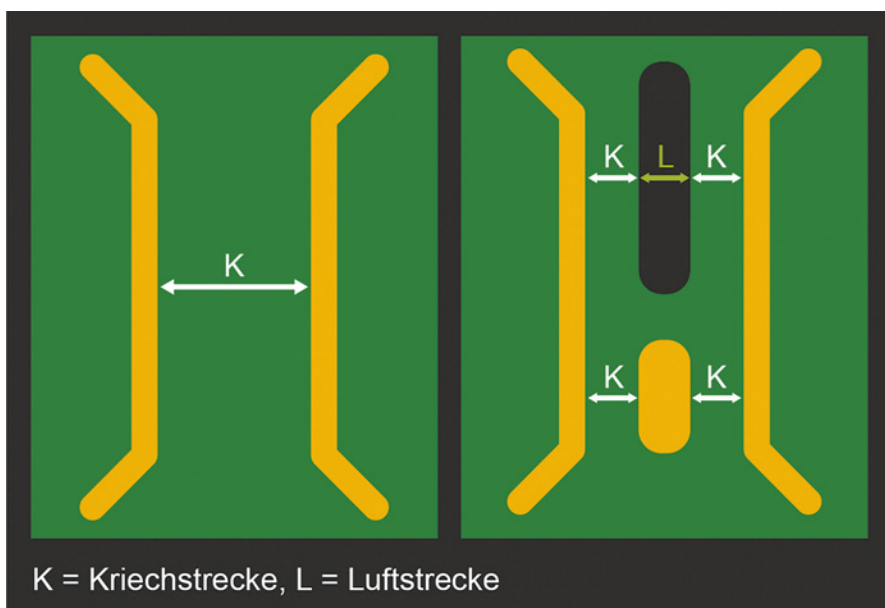
mała i nie została osiągnięta minimalna dopuszczalna długość ścieżki upływu, to między ścieżkami można wyfrezować szczelinę (rys. 1). Następnie dozwoloną odległość oblicza się z kombinacji długości uzyskanej szczeliny powietrznej oraz ścieżki upływu. Dzięki oprogramowaniu NEXTRA odległość ta jest sprawdzana na więcej niż jednym poziomie. Ze względu na to, że prąd upływu może też „pełzać” w kierunku pionowym wzdłuż linii frezowania, brzegu otworu lub na krawędzi płytki drukowanej to konieczne jest sprawdzenie wszystkich możliwych kombinacji na wszystkich warstwach PCB w trzech wymiarach. Miedziane wyspy, śruby mocujące lub inne przewody, które znajdują się pomiędzy dwoma liniami o wyższym napięciu, skracają długość ścieżki.

Wytrzymałość dielektryczna lub odległość niezbędna dla zachowania bezpiecznie długiej ścieżki upływu jest funkcją:

- stopnia zanieczyszczenia,
- wilgotności,
- temperatury,
- wartości ciśnienia powietrza,
- kategorii przepięciowej urządzenia,
- częstotliwości,
- poziomu zanieczyszczeń chemicznych,
- hydrolizy,
- siły nacisku mechanicznego oraz obszaru zastosowania (motoryzacja, lotnictwo, gospodarstwa domowe, przemysł lub medycyna).

Przyjęte normy określają bezpieczeństwo komponentów w systemach niskiego napięcia oraz definiują odpowiednie odstępki. Przykłady podano w DIN EN 60 664-1 / VDE 0110 – norma ta określa odległości, jakie należy zachować między obiektami przewodzącymi, aby zapobiec powstawaniu ścieżki upływu, przeskoku iskry lub awarii. Norma IEC 61010 wszelkie zanieczyszczenia gazami, cieczami lub ciałami stałymi, które mogą prowadzić do zmniejszenia rezystancji elektrycznej lub zdolności izolacyjnej, określa czterema stopniami:

1. dopuszcza brak lub niewielkie, ale nieprzewodzące zanieczyszczenie, które nie ma wpływu na obwód,
2. stopień zanieczyszczenia to lekkie zanieczyszczenie, które może przewodzić sporadycznie. Są to np. rosa (zwiększona wilgotność powietrza) lub pot z dłoni,
3. stopień to zanieczyszczenie przewodzące lub przewodzące poprzez kondensację,



Rys. 1. Wyfrezowana szczelina w laminacie płytki drukowanej

4. stopień zanieczyszczenia to występowanie stałej przewodności spowodowanej kurzem, deszczem lub wilgocią (nie jest to dopuszczalne w przypadku izolacji, która stanowi środek ochrony).

Wytrzymałość dielektryczna

Wytrzymałość dielektryczna materiału izolacyjnego opisuje maksymalne natężenie pola elektrycznego (kV/mm) przed wystąpieniem wyładowania elektrycznego. Laminat FR-4 ma wy-

trzymałość dielektryczną około 13 kV/mm w temperaturze otoczenia 20°C. Wyładowanie elektryczne dla wielu substancji nie jest proporcjonalne do grubości izolatora ze względu na niejednorodny rozkład pola elektrycznego, zwłaszcza przy napięciu stałym. Dlatego też cienkie folie mają wyższą wytrzymałość dielektryczną niż materiały o dużej grubości w przeliczeniu na grubość. Ten efekt jest wykorzystywany w kondensatorach foliowych. Wytrzymałość dielektryczna zależy od różnych czynników. Jej war-

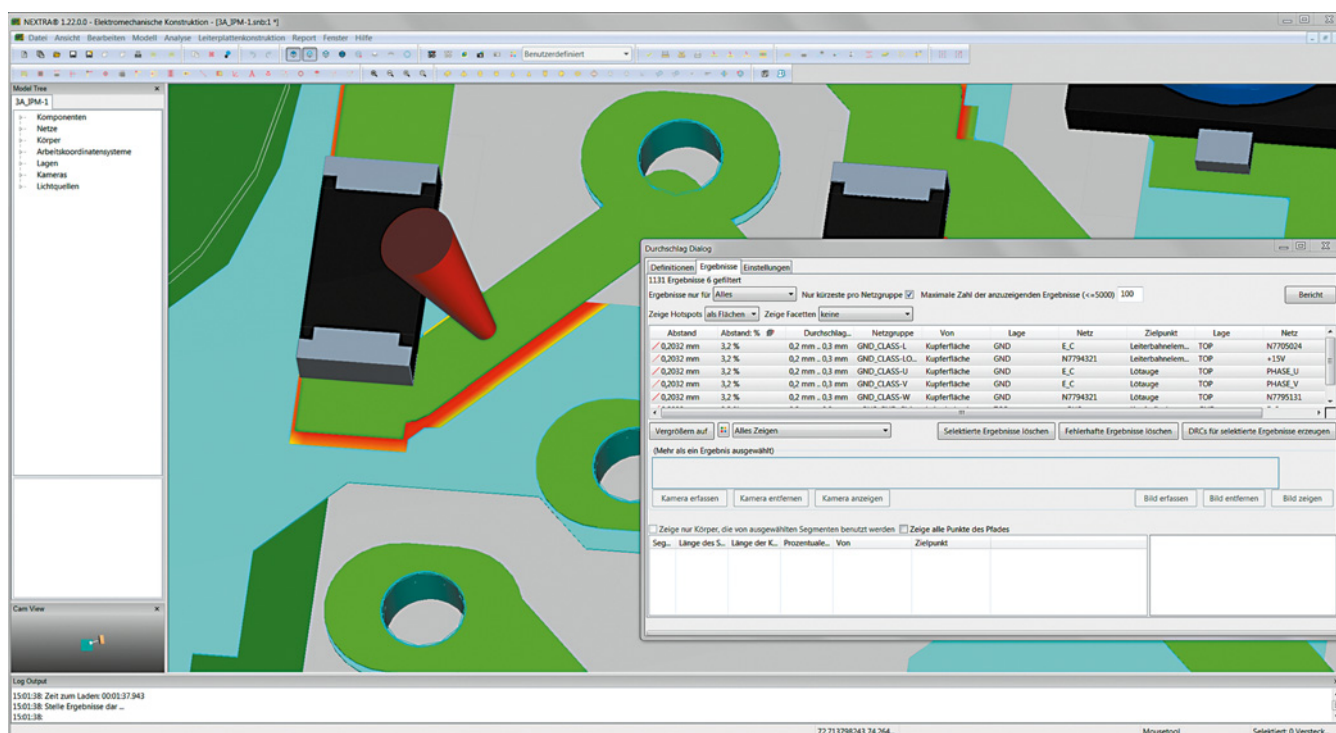
tość maleje wraz ze wzrostem temperatury i częstotliwości, a zatem nie jest stałą materiałową. Do testów wymagana jest symulacja 3D wykorzystująca metodę elementów skończonych (rys. 2).

Wysokie napięcie zaczyna się od 60 V

Podczas projektowania płytki minimalne odległości muszą być zdefiniowane odpowiednio wcześniej. Zazwyczaj oprogramowanie do projektowania PCB sprawdza odległości tylko na jednej warstwie i ignoruje miedziane wysypki lub frezowania. W ocenie pomaga NEXTRA – oprogramowanie, które importuje dane projektowe z różnych systemów eCAD, a następnie przeprowadza zgodny ze standardami test płytki drukowanej. Modele komponentów i dane projektowe obudowy można również importować do NEXTRA za pośrednictwem bezpośrednich dwukierunkowych interfejsów dla wszystkich ważnych systemów eCAD i mCAD w celu pełnej weryfikacji szczelin powietrznych oraz ścieżki upływu.

Modele 3D-STEP komponentów mogą być pobrane bezpośrednio z Allegro lub OrCAD-a

W pojazdach elektrycznych i hybrydowych, stosowane są napięcia baterii 200...400 V, a nawet do 850 V. Wyższe na-



Rys. 2. Ocena obszarów o niewystarczającej wytrzymałości dielektrycznej

pięcia stosuje się również w falownikach zasilających silniki. W sektorze motoryzacyjnym napięcia powyżej 60 V określane są jako wysokie napięcie (bo przy tej wartości może już powstać łuk). Do tej pory w technice motoryzacyjnej różniano tylko niskie i wysokie napięcie, aby zapewnić mechanikom w warsztacie specjalne informacje o zagrożeniach elektrycznych. Ze względu na konstrukcję całego systemu elementy wysokonapięciowe muszą mieć wytrzymałość dielektryczną zgodną z normą ISO 6469.

Problematyczne piki napięcia

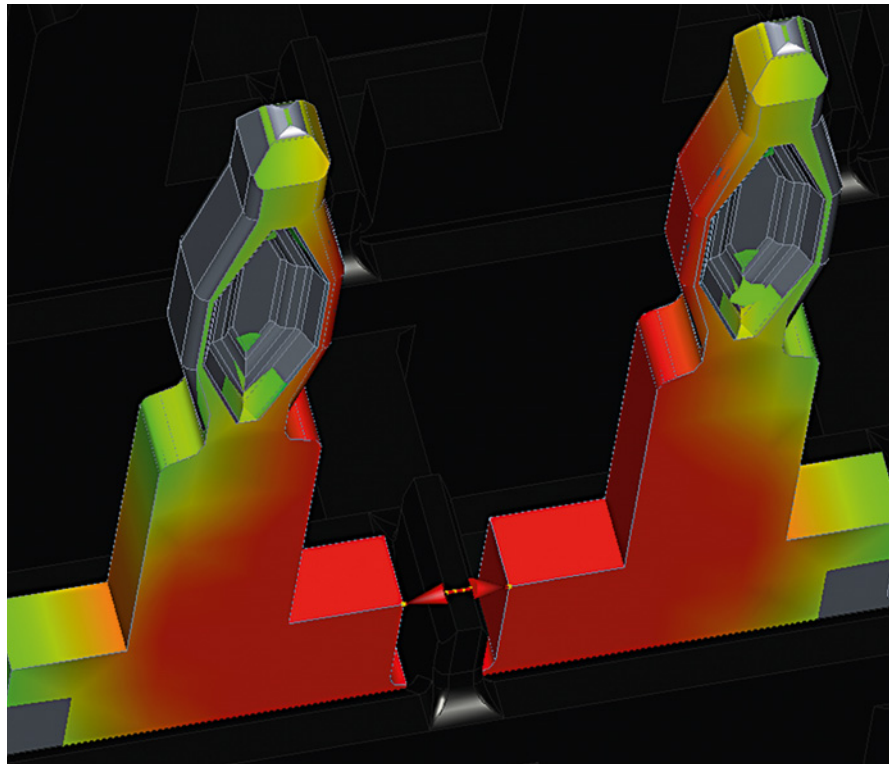
Przetwornice i zasilacze impulsowe obciążają izolację bardziej niż kiedyś, ponieważ elementy sterujące silnikami i zasilacze wykorzystują prostokątne napięcia o regulowanej szerokości impulsu w zakresie 20 kHz i więcej (PWM). Powstające harmoniczne mieszczą się w paśmie znacznie powyżej 50 MHz, a napięcia szczytowe powyżej napięcia roboczego powstają, z powodu rezonansów i pasożytniczych sprzężeń indukcyjnych lub pojemnościowych. Duża stromość zboczy przebiegów (du/dt) w sterowaniu tranzystorów mocy MOSFET lub IGBT powoduje znaczne obciążenie zastosowanych materiałów izolacyjnych.

Przebiegi i oscylacje pojawiają się na skutek istnienia przełączanych obciążeń indukcyjnych lub pojemności podłączonych kabli. Maksymalne wartości napięć spowodowane czynnikami zewnętrznymi mogą zostać z góry określone za pomocą symulacji obwodów przy użyciu PSpice i dalej użyte jako napięcia szczytowe w testach napięciowych prototypów.

Zwiększenie niezawodności

Symulacja obwodu i weryfikacja pod kątem opisywanych zjawisk może poprawić niezawodność systemu oraz osiągnięcie zgodności z normami. Testowanie wyładowań elektrycznych i przebicia napięcia w przypadku instalacji o różnych poziomach zanieczyszczenia jest bardzo wymagające. W profesjonalnym procesie CAD modele 3D STEP dla komponentów wysokonapięciowych mają różne kody kolorów dla materiałów przewodzących i izolacyjnych. Ułatwia to szybką analizę ścieżek upływu oraz szczelin oraz opracowanie niezawodnych konstrukcji.

Mimo że symulacja pomoże wykryć wszystkie najkrótsze ścieżki ze wszystkimi parametrami, to jej dokładność może



Rys. 3. Oprogramowanie NEXTRA wskazuje elementy przewodzące, które są zbyt blisko siebie



Rys. 4. Tworzenie się dendrytów (proces rozgałęziania) na izolatorze wzdłuż ścieżki upływu

być tylko tak dobra, jak parametry wejściowe. Jednym z parametrów wejściowych jest zanieczyszczenie, które dzieli się na cztery kategorie jedynie umownie. Z tego powodu NEXTRA traktuje defekty izolacji jako „obszary problematyczne”, które zostaną przekazane do końcowej oceny inżynierskiej. W rzeczywistości prosta, najkrótsza ścieżka zwykle nie występuje, ponieważ materiał izolacyjny,

pola elektryczne i zanieczyszczenia nie są jednorodne. Zdjęcia drogi upływu mają strukturę fraktali (struktury dendrytyczne, rys. 4), dlatego cały problematyczny obszar musi zostać poddany końcowej ocenie inżynierskiej.

Tomasz Górecki