

Marek Adamowicz^{1,4}, Paweł Stec², Zbigniew Krzemiński^{3,4}, Jarosław Guziński⁴

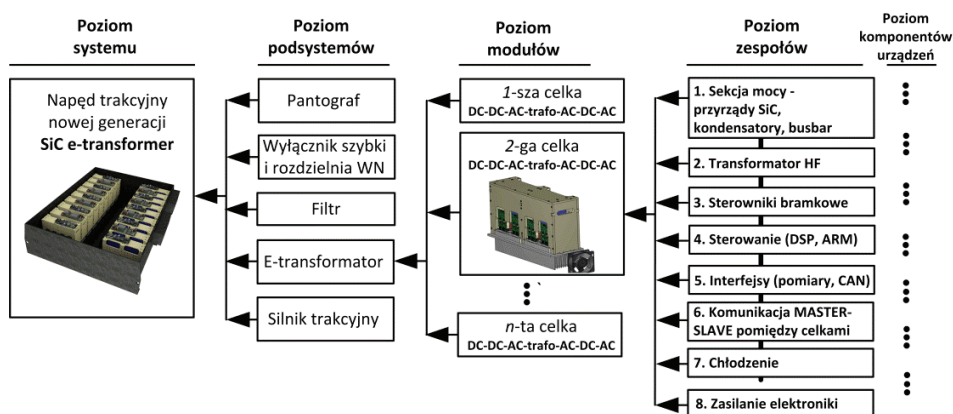
(1) H. Cegielski – ENERGOCENTRUM, (2) PESA S.A., (3) MMB Drives Sp. z o.o.

(4) Politechnika Gdańska

ELEMENTY ANALIZY RAMS I CYKLU ŻYCIA NAPĘDÓW NOWEJ GENERACJI W UKŁADZIE E-TRANSFORMATORA REALIZOWANYCH W TECHNOLOGII SIC DO ELEKTRYCZNYCH ZESPOŁÓW TRAKCYJNYCH

ELEMENTS OF RAMS AND LIFE CYCLE ANALYSIS OF THE NEW GENERATION E-TRANSFORMER BASED ELECTRIC DRIVES IMPLEMENTED IN SIC TECHNOLOGY FOR ELECTRIC MULTIPLE UNITS

Transport kolejowy podlega ciągłej presji, aby zwiększać dostępność połączeń i obniżać koszty przejazdów. Konstruktorzy pociągów i przewoźnicy, w odpowiedzi na stawiane oczekiwania, starają się wdrażać pojawiające się na rynku nowe innowacyjne rozwiązania [1], [2]. Europejski program Shift2Rail stawia ambitne cele w stosunku do kluczowych wskaźników wydajności (*z ang. KPI - Key Performance Indicators*) systemu kolejowego obejmującego infrastrukturę, sygnalizację i tabor: aby o 50% zmniejszyć koszt cyklu życia urządzeń (*ang. LCC – Life Cycle Cost*), o 50% zwiększyć ich niezawodność i o 100% zwiększyć wydajność transportu kolejowego [2].



Rys. 1. Diagram zawierający bloki funkcjonalne e-transformatora

Technologia e-transformatora (Rys. 1), nazywanego w zastosowaniach kolejowych energoelektronicznym transformatorem trakcyjnym PETT [3] (z ang. *power electronic traction transformer*), umożliwi wyeliminowanie w pojazdach szynowych, zasilanych z trakcji AC, wielkogabarytowych transformatorów trakcyjnych oraz zmniejszenie gabarytów dławika filtru wejściowego. Dzięki precyzyjnej regulacji prądu i precyzyjnemu generowaniu napięcia z wysoką częstotliwością przełączeń, e-transformator pozwala zmniejszyć straty w dławiku i w silniku trakcyjnym - co prowadzi również do wydłużenia żywotności silnika trakcyjnego. Istota proponowanego w niniejszym referacie rozwiązania e-transformatora trakcyjnego zawiera się w wykorzystaniu wysokosprawnych modułów tranzystorowych SiC MOSFET. Podstawowym modułem konstrukcyjnym e-transformatora jest celka DC-DC-AC-transformator-AC-DC-AC zbudowana z 8 mostków typu H i posiadająca izolację galwaniczną realizowaną za pomocą transformatora wysokiej częstotliwości.

Dla oszacowania wskaźnika intensywności uszkodzeń całego urządzenia e-transformatora zakłada się sumowanie wskaźników λ_{ref} wszystkich jego komponentów występujących zgodnie ze strukturą hierarchiczną (Rys. 1):

$$\lambda_{e-trafo} = \sum_{i=1}^n (\lambda_{ref})_i \cdot \quad (1)$$

Dostępność e-transformatora jest determinowana przez upływ czasu opisany parametrami MTBF oraz MTTR. Ze względu na relatywnie dużą liczbę komponentów, e-transformator będzie charakteryzować się relatywnie dużą wartością całkowitego wskaźnika $\lambda_{e-trafo}$ oraz relatywnie niższą wartością parametru MTBF - w porównaniu z klasycznymi falownikami napędowymi o topologii dwupoziomowej bądź trójpoziomowej. Zapewnienie wysokiej niezawodności $A(t)$ uzyskuje się w e-transformatorze poprzez minimalizację czasu MTTR [4]. Służy temu budowa modułowa e-transformatora wraz z zastosowaniem nowej generacji komponentów, przyrządów półprzewodnikowych SiC i niskoindukcyjnych kondensatorów polipropylenowych. W referacie poruszono wybrane zagadnienia analizy RAMS i cyklu życia, które mają zastosowanie do nowej generacji napędu trakcyjnego o topologii e-transformatora, przeznaczonego do modernizacji elektrycznych zespołów trakcyjnych.

Projekt finansowany ze środków Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój, Poddziałanie 1.2 Programy Sektorowe, nr umowy POIR.01.02.00-00-0193/16-00.

Literatura

- [1] Adamowicz M., „Luxtorpeda 2.0”, OZEON Ekologia Gospodarka Biznes, nr 1 (8)/2018, ss. 46 -50.
- [2] Falco M., Desportes G., Piton M., „Innovative Railway Traction System”, Proc. 7th Transport Research Arena TRA 2018, April 16-19, 2018, Vienna, Austria, ss. 1 – 10.
- [3] Vetterli C., Suranyi A., Concept et potentiel d'économie d'énergie d'un transformateur de traction électronique “PETT”, Rapport annuel, ABB Sécheron SA, 2013.
- [4] Dujic D., Kieferndorf F., Canales F., „Power Electronic Transformer Technology for Traction Applications—An Overview”, *Electronics*, vol. 16, no. 1, 2012, ss. 50-56.

Marek Adamowicz^{1,4}, Paweł Stec², Zbigniew Krzemiński^{3,4}, Jarosław Guziński⁴

(1) H. Cegielski – ENERGOCENTRUM, (2) PESA S.A., (3) MMB Drives Sp. z o.o.

(4) Politechnika Gdańska, e-mail: m.adamowicz@hcp.com.pl

Elementy analizy RAMS i cyklu życia napędów nowej generacji w układzie e-transformatora realizowanych w technologii SiC do elektrycznych zespołów trakcyjnych

**Elements of RAMS and life cycle analysis of the new generation e-transformer based
electric drives implemented in SiC technology for electric multiple units**

1. Wprowadzenie

Transport kolejowy podlega ciągłej presji, aby zwiększać dostępność połączeń i obniżać koszty przejazdów. Chcąc wzmocnić swoją pozycję konkurencyjną w stosunku do innych rodzajów transportu, transport kolejowy musi się ciągle rozwijać, uwzględniając rosnące oczekiwania pasażerów. Pasażerowie wybierają kolej jako środek przemieszczania nie tylko ze względu na cenę biletu, czas czy komfort podróży. Powszechnie rośnie świadomość znaczenia transportu publicznego dla zrównoważonego rozwoju i ochrony środowiska. Konstruktorzy pociągów i przewoźnicy, w odpowiedzi na stawiane oczekiwania, starają się wdrażać pojawiające się na rynku nowe innowacyjne rozwiązania [1], [2]. Przykładowo, europejski program Shift2Rail stawia ambitne cele w stosunku do kluczowych wskaźników wydajności (z ang. *KPI - Key Performance Indicators*) systemu kolejowego obejmującego infrastrukturę, sygnalizację i tabor: aby o 50% zmniejszyć koszt cyklu życia urządzeń (ang. *LCC – Life Cycle Cost*), o 50% zwiększyć ich niezawodność i o 100% zwiększyć wydajność transportu kolejowego [2]. Badania i prace rozwojowe prowadzone przez europejskich producentów napędów trakcyjnych dla pociągów regionalnych koncentrują się zwłaszcza na [2], [3]:

- Wprowadzeniu do konstrukcji przekształtników wysokosprawnych przyrządów półprzewodnikowych mocy z węgla krzemu - tranzystorów SiC MOSFET,
- Opracowaniu konstrukcji przekształtników o zmniejszonych indukcyjnościach połączeń umożliwiających zmniejszenie przepięć łączeniowych,
- Opracowaniu konstrukcji napędu następnej generacji w konfiguracji e-transformatora z wykorzystaniem tranzystorów SiC do istniejących pociągów regionalnych [3].



Celem prowadzonych prac jest zapewnienie możliwości wdrożenia innowacyjnych napędów trakcyjnych na zasadzie "plug and play", tzn. bez konieczności wprowadzania większych zmian w konstrukcji istniejących pociągów regionalnych. Oznacza to, że głównym ograniczeniem jest zaprojektowanie nowego systemu o takich samych wymiarach i interfejsach jak w przypadku aktualnie używanych urządzeń [2]. Napęd trakcyjny wraz ze zintegrowanym pokładowym systemem zasilania pociągu stanowi około 10 procent wartości nowego elektrycznego zespołu trakcyjnego. Cykl życia tych urządzeń powinien być wnikliwie przeanalizowany i opisany przez producenta. Jednym z elementów standardu IRIS jest obowiązek prowadzenia analizy RAMS (*ang. Reliability Availability Maintainability Safety*). W celu efektywnego wykorzystania technologii e-transformatora i spełnienia wymagań producentów pojazdów istnieje potrzeba ustanowienia standaryzowanego zarządzania procedurami RAMS/LCC oraz wdrożenia tych procedur do oceny całych systemów napędowych następnej generacji pracujących w układzie e-transformatora.



Rys. 1. Trójfazowy e-transformator MMB Drives o mocy 1 MW na napięciu 4kV wykonany w technologii SiC MOSFET z 18 celek AC-DC-AC-transformator-AC-DC-AC, z przeznaczeniem do napędów przemysłowych.

2. Konstrukcja e-transformatora trakcyjnego

Technologia e-transformatora (Rys. 1), nazywanego w zastosowaniach kolejowych energoelektronicznym transformatorem trakcyjnym PETT [4] (*z ang. power electronic traction transformer*), wyprzedza oferowaną funkcjonalnością wszystkie znane rozwiązania przekształtników mocy stosowane dotychczas w przemyśle i energetyce [5] – [7]. W energetyce e-transformator, posiadając wbudowaną izolację galwaniczną wejścia i wyjścia, może zastępować konwencjonalne transformatory sieciowe - oferując kompensację mocy biernej i zdolność utrzymywania wysokich parametrów jakości energii dostarczanej do odbiorców. Dodatkowo, e-transformator może spełniać rolę interfejsu pomiędzy systemami AC i DC bądź systemami o różnych częstotliwościach napięcia sieci. W napędach trakcyjnych rozwiązanie e-transformatora umożliwia wyeliminowanie w pojazdach

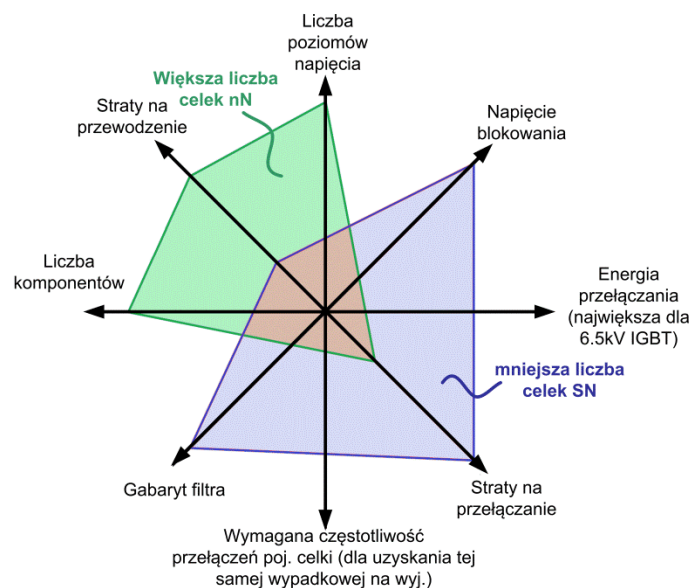
szynowych, zasilanych z trakcji AC, wielkogabarytowych transformatorów trakcyjnych oraz zmniejszenie gabarytów dławika filtru wejściowego. Dzięki możliwości precyzyjnej regulacji prądu i zdolności precyzyjnego generowania napięcia e-transformator pozwala zmniejszyć straty w dławiku i w silniku trakcyjnym - co prowadzi również do wydłużenia żywotności silnika trakcyjnego. E-transformator trakcyjny zawiera część wejściową po stronie trakcji – przekształtnik *active front end*, wbudowaną izolację galwaniczną oraz część wyjściową – falownik trakcyjny. Konstrukcja modułowa umożliwi budowę e-transformatorów dla różnych poziomów napięć z tych samych modułów funkcjonalnych.

Istota proponowanego w niniejszym referacie rozwiązania e-transformatora trakcyjnego zawiera się w wykorzystaniu wysokosprawnych modułów tranzystorowych SiC MOSFET do konstrukcji falownika trakcyjnego posiadającego topologię kaskadową. Każda gałąź fazowa falownika trakcyjnego jest skonstruowana z określonej liczby wysokosprawnych, niskonapięciowych mostków tranzystorowych typu H (*ang. cascaded H-bridge converter*), szeregowo połączonych dla uzyskania średniego napięcia silnika trakcyjnego. Zgodnie z zasadą działania falowników kaskadowych średniego napięcia, źródło zasilania każdego mostka H jest izolowane od pozostałych. Do zapewnienia izolacji w e-transformatorze wykorzystane są izolowane przekształtniki DC-DC zawierające dwa mostki aktywne typu H (*ang. Dual Active Bridge DAB*) oraz transformator wysokiej częstotliwości [8]. Wejścia poszczególnych przekształtników DAB DC-DC są połączone z przekształtnikiem wejściowym, złożonym z mostków H – w liczbie odpowiadającej sumie mostków H falownika trakcyjnego - dopasowującym napięcie sieci trakcyjnej do poziomów poszczególnych izolowanych przekształtników DC-DC. Proponowany w niniejszym referacie e-transformator jest przeznaczony do zasilania z sieci trakcyjnej 3kV DC i służy do zasilania trójfazowych silników trakcyjnych o napięciu znamionowym rzędu 2,4kV.

Podstawowym modułem konstrukcyjnym e-transformatora jest celka DC-DC-AC-transformator-AC-DC-AC zbudowana z 8 mostków typu H i posiadająca izolację galwaniczną realizowaną za pomocą transformatora wysokiej częstotliwości. Każdy mostek typu H składa się z dwóch modułów tranzystorowych mocy SiC MOSFET.

Konstrukcja e-transformatora z celek niskonapięciowych w porównaniu z celkami konstruowanymi z tranzystorów 3,3kV bądź 6,5kV prowadzi do uzyskania najwyższej gęstości mocy (kW/dm^3) i sprawności urządzenia [9]. Na rysunku 2 pokazano porównanie wpływu liczby celek, większej dla celek nN i mniejszej dla celek SN, na poszczególne parametry e-transformatora. Przez szereg lat głównymi problemami nie pozwalającymi na rozpowszechnienie urządzenia e-transformatora na rynku był problem zapewnienia odpowiednio wysokiej niezawodności, a także wysoki koszt nowej technologii. Zagadnienia niezawodności e-transformatora są związane ze zwiększoną ilością wykorzystywanych łączników półprzewodnikowych. Aktualnie, osiągnięcie wymaganej dojrzałości przez technologię półprzewodnikową węgla krzemu SiC i wprowadzenie na szeroką skalę tranzystorów SiC do klasycznych przekształtników trakcyjnych, m.in. w Japonii [10], wpłynęło na istotną poprawę parametrów niezawodnościowych tranzystorów i diod mocy SiC. Z drugiej strony, rozwiązano szereg problemów związanych ze zwiększeniem dostępności e-transformatora, m.in. poprzez zapewnienie redundancji w konstrukcji e-transformatora [9], [11].





Rys. 2. Wpływ liczby celek, SN lub nN, na poszczególne parametry e-transformatora [9].

2. Elementy analizy RAMS e-transformatora: niezawodność (R) i dostępność (A)

Uwzględniając przeglądy i okresową wymianę poszczególnych podzespołów, napęd trakcyjny zawierający e-transformator powinien zapewniać bez mała 30-letnie funkcjonowanie pojazdu szynowego. Dokumentowanie procedury RAMS przez producenta napędu trakcyjnego obejmuje kalkulację wskaźników niezawodnościowych, zbieranie danych oraz plany działań doskonalących. Producent jest zobligowany do ustanowienia procesu, mającego na celu zagwarantowanie dostępności dostarczonego urządzenia oraz części zamiennych w czasie całego, zdefiniowanego i opisanego, cyklu życia urządzenia. Norma PN-EN 50126 definiuje 14 faz cyklu życia systemów kolejowych, od fazy koncepcji (*i*) poprzez fazę definiowania profilu misji i warunków stosowania (*ii*), fazę analizy ryzyka (*iii*), fazę określenia wymagań RAMS systemu (*iv*), fazę rozdzielenia wymagań RAMS pomiędzy poszczególne podsystemy (*v*), fazę projektowania i wdrażania (*vi*), fazę produkcji (*vii*), fazę instalacji (*viii*), fazę walidacji - obejmującą uruchomienie i potwierdzenie bezpieczeństwa systemu (*ix*), fazę akceptacji - obejmującą potwierdzenie zgodności podsystemów z wymaganiami RAMS oraz gotowości systemu do serwisowania (*x*), fazę użytkowania i utrzymania (*xi*), fazę monitorowania jakości i wydajności (*xii*), fazę modyfikacji i tzw. retrofitingu (*xiii*), aż po ostatnią fazę - wycofania z eksploatacji (*xiv*). Sposób opis cyklu życia systemu przez PN-EN 50126 umożliwia planowanie, zarządzanie, controlling oraz monitorowanie RAMS we wszystkich aspektach.

Dla przewoźnika, poza kosztem zakupu elektrycznego zespołu trakcyjnego, bardzo istotne są również koszty jego późniejszego utrzymania oraz koszty zużywanej energii. Dla producenta, który jest integratorem pojazdu szynowego, przeprowadzona analiza cyklu życia napędu trakcyjnego pozwala na wybór właściwego produktu we właściwej cenie, a w okresie eksploatacji – pozwala dać niezbędne informacje nabywcy pojazdu – przewoźnikowi, jakie będzie ponosił niezbędne koszty utrzymania w uzgodnionych ramach czasowych. Dla samego producenta napędu trakcyjnego analiza cyklu życia daje możliwość porównania i wyboru

architektury przekształtnika, w tym wyboru technologii półprzewodnikowej i wyboru dostawcy komponentów i podzespołów.

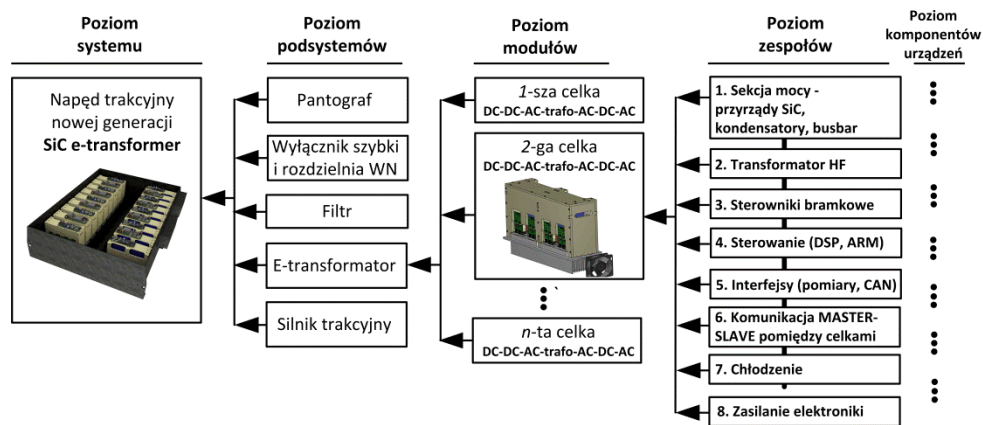
Analiza niezawodności urządzeń, w których skład wchodzi elementy elektryczne i elektroniczne jest prowadzona w oparciu o szacowanie czasu życia wszystkich elementów - z wykorzystaniem funkcji tzw. czasu do wystąpienia uszkodzenia TTF (*ang. Time To Failure*), która ma zwykle postać rozkładu wykładniczego. Norma PN-EN 50126 podaje przykłady szeregu parametrów określających niezawodność systemów, m.in. wskaźnika intensywności uszkodzeń $\lambda(t)$ (*ang. FIT - Failure In Time*). Przyjmuje się, że 1 FIT = 1 uszkodzenie na 10^9 godzin pracy. Kolejnymi parametrami RAMS są: średni czas do wystąpienia uszkodzenia MTTF (*ang. Mean Time To Failure*) - dla komponentów nienaprawialnych oraz średni czas pomiędzy uszkodzeniami MTBF (*ang. Mean Time Between Failure*) - dla komponentów naprawialnych, a także funkcja niezawodności $R(t)$:

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(x) dx} \quad (1)$$

Dla oszacowania wskaźnika intensywności uszkodzeń $\lambda_{e-trafo}$ całego urządzenia e-transformatora stosuje się sumowanie wskaźników wszystkich jego komponentów składowych λ_{ref} , występujących zgodnie ze strukturą hierarchiczną przedstawioną na Rys. 3:

$$\lambda_{e-trafo} = \sum_{i=1}^n (\lambda_{ref})_i \quad (2)$$

gdzie λ_{ref} - referencyjną wartość wskaźnika intensywności uszkodzeń dla poszczególnych komponentów podaje ich producent.



Rys. 3. Uogólniona postać diagramu zawierającego bloki funkcjonalne napędu trakcyjnego nowej generacji w układzie e-transformatora

Przy stałej wartości wskaźnika intensywności uszkodzeń zależność (1) przyjmuje postać:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (3)$$

Średni czasu do wystąpienia uszkodzenia MTTF (dla komponentów naprawialnych - średni czasu pomiędzy uszkodzeniami MTBF) jest określany na podstawie zależności:

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(x)dx = \int_0^{\infty} e^{-\lambda x} dx = \frac{1}{\lambda} \quad (4)$$

Przyjmując założenie, że e-transformator powinien pracować w pociągu przez okres 30 lat, należy uwzględnić wpływ skutków zużycia na poszczególne komponenty i podzespoły [5]. Biorąc pod uwagę zużycie komponentów, wskaźnik intensywności uszkodzeń λ nie będzie mieć stałej wartości, lecz jego wartość będzie rosła w funkcji czasu wraz z rosnącym zużyciem. Funkcja niezawodności $R(t)$ przyjmuje wówczas postać rozkładu Weibulla [5]:

$$R(t) = \begin{cases} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}, & t \geq \gamma \\ 0, & t < \gamma \end{cases} \quad (5)$$

gdzie β oznacza współczynnik kształtu (jeżeli $\beta > 1$ wówczas λ rośnie), η jest parametrem skali lub charakterystycznym czasem (czasem przy którym 63,2% populacji zawiodło), γ oznacza czas wolny od uszkodzeń, który jest czasem początkowym rozkładu.

W przypadku uwzględnienia zużycia komponentów, obliczenia niezawodności stają się bardziej skomplikowane i wymagają użycia specjalistycznego oprogramowania, np. ReliaSoft BlockSim and RENO 2018.

Przykładowo, zgodnie z hierarchicznym układem przedstawionym na Rys. 3, szacowanie wskaźnika λ dla poszczególnych sekcji mocy celek e-transformatora powinno uwzględniać wpływ zużycia komponentów mocy: modułów SiC MOSFET, transformatora wysokiej częstotliwości oraz kondensatorów polipropylenowych.

Dostępność $A(t)$ jest definiowana jako prawdopodobieństwo, że system w określonych warunkach pracy będzie gotowy do poprawnego wykonywania swoich funkcji w czasie t [5]. Urządzenia naprawialne charakteryzuje wskaźnik intensywności napraw MTTR – średni czas do zakończenia naprawy urządzenia (*ang. Mean Time To Repair*). Dostępność $A(t)$ systemu może być określona jako funkcja wskaźnika intensywności napraw $\mu = \text{MTTR}^{-1}$:

$$A(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\mu}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t} \quad (6)$$

Asymptotyczna dostępność A_{ss} jest określona wzorem:

$$A(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (7)$$

Jak można zauważyć na podstawie (7), dostępność e-transformatora jest determinowana przez upływ czasu opisany parametrami MTBF oraz MTTR. Ze względu na relatywnie dużą liczbę komponentów, e-transformator będzie charakteryzować się relatywnie dużą wartością całkowitego wskaźnika λ oraz niższą wartością parametru MTBF w

porównaniu z klasycznymi falownikami napędowymi, nie posiadającymi w swojej konstrukcji wbudowanej izolacji galwanicznej. Zapewnienie wysokiej niezawodności $A(t)$ e-transformatora uzyskiwane jest poprzez minimalizację czasu MTTR [9] dzięki wysokiemu stopniowi modułowości konstrukcji e-transformatora, umożliwiającemu szybką wymianę poszczególnych celek niskonapięciowych w przypadku awarii.

Redundantność e-transformatora jest uzyskiwana dzięki zastosowaniu w konstrukcji zwiększonej liczby celek $n+1$, gdzie n oznacza minimalną liczbę celek wymaganą do pracy z określoną mocą. W przypadku uszkodzenia celki jest ona zwierana przez bypass i w ten sposób eliminowana z systemu. Jej rolę przejmuje dodatkowa, $(n+1)$ -sza celka, dzięki czemu e-transformator może kontynuować pracę z pełną mocą.

3. Analiza czasu życia tranzystorów SiC MOSFET

Uszkodzenia, które zdarzają się w falownikach napędowych, są w ponad połowie przypadków związane z uszkodzeniami tranzystorów mocy bądź kondensatorów. Analiza symptomów uszkodzeń tranzystorów SiC MOSFET obejmuje zjawiska: stabilności napięcia progowego bramki, degradacji przewodzenia wewnętrznej wbudowanej diody zwrotnej, zwiększenia prądu upływu bramki, który wskazuje na uszkodzenie tranzystora oraz przebicia lawinowego tranzystora [14]. Uszkodzenia tranzystorów można w sposób ogólny podzielić na uszkodzenia powodujące trwałe zwarcie w obwodzie mocy falownika bądź powodujące trwałą przerwę w obwodzie mocy, tzw. typu *open circuit*. Przy uszkodzeniach powodujących zwarcie wykrycie uszkodzenia tranzystora oraz ochrona całego przekształtnika przed awarią musi odbywać się bardzo szybko, na poziomie sprzętowym. Czas pomiędzy zainicjowaniem uszkodzenia i zniszczeniem układu w wyniku przepływu dużego prądu zwarciovego jest bardzo krótki. Układy zabezpieczające przed skutkami uszkodzeniem tranzystora wywołującego zwarcie są standardowo zintegrowane z układami sterowania bramkowego tranzystorów [12]. W przypadku wystąpienia uszkodzenia układ zabezpieczeń wystawia sygnał awarii dla układu sterowania. Zagadnieniom zabezpieczenia przekształtników przed skutkami uszkodzeń tranzystorów powodujących trwałą przerwę w obwodzie poświęcano dotychczas mniejszą uwagę. Uszkodzenie typu *open circuit* może być spowodowane defektem w postaci odklejenia cienkich połączeń drutowych chipów wewnątrz modułu tranzystorowego. Dzieje się to zwykle bądź wskutek naprężeń termicznych wynikających z cyklu nagrzewania i ochładzania tranzystora, bądź uszkodzeniem obwodu sterowania bramkowego, bądź wskutek pęknięcia spowodowanego przepływem prądu zwarciovego o innej przyczynie. Pomimo, że tranzystory SiC charakteryzują się zdolnością pracy przy znacznie wyższych temperaturach niż tranzystory IGBT (węglík krzemu SiC pozostaje w stałym stanie skupienia do 2370°C), produkcja modułu SiC wymaga doboru również innych materiałów poddawanych naprężeniom termicznym, w tym drutowych połączeń chipów wewnątrz modułu. W porównaniu z uszkodzeniem tranzystora powodującym zwarcie, uszkodzenie typu *open circuit* nie powoduje bezpośredniego wyłączenia całego przekształtnika, który może dalej pracować stabilnie - ale w trybie awarii. Stąd jego wykrycie odbywa się w sposób programowy – na podstawie pomiarów prądów i napięć. W trybie pracy po wystąpieniu uszkodzenia typu *open circuit* pozostałe nieuszkodzone tranzystory są jednak



narażone na pojawiające się zwiększone napięcie i prąd o charakterze pulsującym, co, z kolei może doprowadzić do ich uszkodzenia.

Wskaźnik intensywności uszkodzeń tranzystorów SiC MOSFET można zapisać w postaci uwzględniającej wpływ temperatury i warunków otoczenia:

$$\lambda_{SiC MOSFET} = \lambda_b \pi_T \pi_Q \pi_E \quad (9)$$

gdzie λ_b oznacza wartość bazową wskaźnika, π_T – współczynnik temperaturowy, π_Q – współczynnik jakości, π_E – współczynnik środowiskowy. Wskaźnik intensywności uszkodzeń bądź zamiennie parametr MTTF jest podawany przez producenta tranzystorów SiC MOSFET dla pojedynczego chipu. Tranzystory SiC w porównaniu z tranzystorami IGBT charakteryzują się relatywnie małą powierzchnią chipu, a w związku z tym relatywnie mniejszym maksymalnym prądem przypadającym na powierzchnię pojedynczego chipu. W modułach tranzystorowych SiC chipy są łączone po kilka - dla uzyskania wymaganej wartości maksymalnego prądu przewodzenia. Należy przy tym przyjąć, że jeżeli uszkodzi się pojedynczy chip tranzystora - to uszkodzeniu podlega cały moduł tranzystorowy. Wskaźnik λ_{SiC} dla modułu tranzystorowego mocy SiC, zawierającego gałąź dwóch tranzystorów SiC MOSFET z diodami zwrotnymi SiC Schottky, jest wyznaczany za pomocą wzoru ogólnego:

$$\lambda_{SiC} = \sum \lambda_{SiC MOSFET} + \sum \lambda_{SiC Schottky} \quad (10)$$

W Tabeli 1 podane zostały przykładowe wartości wskaźnika λ dla: pojedynczego chipu SiC MOSFET, pojedynczego chipu diody SiC Schottky oraz wskaźnik wyznaczony dla całego dwutranzystorowego modułu SiC typu CAS120M12BM2, w którym każdy z tranzystorów stanowi równoległe połączenie 6 chipów SiC MOSFET, a każda z dwóch diod zwrotnych SiC Schottky - równoległe połączenie 6 chipów SiC [15]. Ponadto, w tabeli podano wskaźnik λ dla kondensatorów polipropylenowych typu LNK-P7 zastosowanych w projekcie w obwodach prądu stałego celek e-transformatora, a także, dla porównania, wskaźnik λ dla modułu IGBT. Wartość wskaźnika λ dla kondensatorów polipropylenowych w sposób istotny rośnie ze wzrostem temperatury oraz ze wzrostem napięcia pracy. Prawidłowe wyznaczanie wskaźnika niezawodności przy połączeniach szeregowo-równoległych elementów wymaga zachowania określonej kolejności obliczeń [16].

Tabela 1. Wybrane wartości wskaźnika λ

Komponent	[λ]
SiC MOSFET – chip	3,03
Dioda SiC Schottky – chip	0,10
Moduł SiC typ CAS120M12bm2	37,56
Kondensator polipropylenowy typ LNK-P7, pracujący w temp. 70°C przy 0,8U _n	14
Moduł IGBT typ FF300R12KT4	75

Opisana w pracy [13] metoda estymowania czasu życia tranzystorów SiC MOSFET ze względu na wpływ naprężeń termicznych polega na poddawaniu tranzystorów testom

niszczącym tzw. przyspieszonego czasu życia. Testy polegają na nagrzewaniu i chłodzeniu złącza tranzystora z wymuszaniem określonej wartości różnicy temperatur ΔT_j . Przyjęta w [13] wartość $\Delta T_j = 100\text{K}$ umożliwia relatywnie szybkie przeprowadzenie próby. Nagrzewanie złącza tranzystora jest wymuszane przepływem dużego prądu obciążenia, a chłodzenie odbywa się poprzez odbieranie ciepła przez radiator. Zliczana jest liczba N_f cykli nagrzewania i chłodzenia tranzystora do wystąpienia uszkodzenia. Jako wskaźnik uszkodzenia jest przyjmowany 5%-wy wzrost rezystancji przewodzenia tranzystora $R_{DS(on)}$ w stosunku do wartości początkowej. Na podstawie badań przeprowadzana jest ekstrapolacja wartości ΔT_j . Założona w [13] wymagana wartość liczby cykli $N_f = 2 \cdot 10^9$ została osiągnięta dla $\Delta T_j = 17\text{K}$. Dla $\Delta T_j = 100\text{K}$ zmiana $R_{DS(on)}$ o 5% nastąpiła już po 10^5 cykli nagrzewania i chłodzenia tranzystora SiC MOSFET. Dla dużych ΔT_j żywotność tranzystorów SiC MOSFET oraz IGBT jest porównywalna, natomiast tranzystory SiC MOSFET charakteryzują się znacznie większą żywotnością jeżeli w zaprojektowanym układzie utrzymywane są mniejsze wartości ΔT_j .

4. Elementy analizy FMEA podstawowego modułu e-transformatora

Metoda analizy skutków uszkodzeń FMEA (*ang. Failure Mode and Effect Analysis*) znajduje zastosowanie w różnych fazach cyklu życia urządzeń i systemów elektrycznych i mechanicznych: w fazie koncepcji, przed wdrożeniem do produkcji, w czasie wdrażania na skalę przemysłową, w czasie produkcji oraz w trakcie eksploatacji. Zgodnie z diagramem przedstawionym rys. 3, metoda FMEA może dotyczyć całego systemu, podsystemów, modułów tworzących poszczególne podsystemy, a także zespołów, z których składają się moduły. Do zadań metody FMEA należy: (i) zidentyfikowanie możliwych rodzajów uszkodzeń poszczególnych podsystemów/modułów/zespołów bądź komponentów w różnych trybach pracy, (ii) zidentyfikowanie wpływu uszkodzeń na inne podsystemy/moduły/zespoły oraz na cały system, (iii) ocena skutków uszkodzeń w otoczeniu, w którym znajduje się system – napęd trakcyjny (w przypadku napędu trakcyjnego otoczenie stanowić będzie cały pojazd trakcyjny, infrastruktura kolejowa), (iv) zidentyfikowanie możliwych do zastosowania mechanizmów detekcji wystąpienia uszkodzeń oraz (v) wybór sposobu postępowania w okolicznościach wystąpienia określonego uszkodzenia. W systemach kolejowych żadne pojedyncze uszkodzenie nie może prowadzić do stanu zagrożenia – co oznacza konieczność zapewnienia zdolności wykrycia uszkodzenia we właściwym czasie. Podstawowe kroki metody FMEA, opisane po raz pierwszy w 1990 roku w *Military Handbook. Reliability Prediction of Electronic Equipment* obejmują: (1) skonstruowanie diagramu złożonego z bloków funkcjonalnych, (2) użycie diagramu do identyfikacji rodzajów uszkodzeń, (3) zidentyfikowanie skutków uszkodzeń i ocenę ich krytyczności (4) ocenę potencjalnych skutków dla przypadku wystąpienia jednocześnie innych uszkodzeń zidentyfikowanych zgodnie z krokami 2 i 3 (5) zidentyfikowanie przyczyn uszkodzeń i częstotliwości ich występowania (6) określenie sposobów ujawnienia wystąpienia przyczyn uszkodzeń (7) oszacowanie wartości ryzyka (*ang. Risk Priority Number*) jakie niesie za sobą dane uszkodzenie. Wynik analizy systemu napędu trakcyjnego zależy od szeregu aspektów takich, jak typ użytych komponentów, zastosowane oprogramowanie sterujące, czujniki, itp.. Jakość przeprowadzonej analizy FMEA zależy od zdolności analityka do przewidywania, w jaki



sposób system zawiedzie – co często bywa rzeczą bardzo subiektywną. Rozwiązaniem tego problemu może być wprowadzenie elementów FMEA do modeli symulacyjnych urządzeń, tworzonych na etapie projektowania i walidacji systemu. W fazach (i) – (iv) cyklu życia produktu będzie to oznaczać konieczność ścisłego współdziałania zespołu inżynierów projektantów oraz zespołu zajmującego się aspektami niezawodności i bezpieczeństwa. Przykładowy, zaproponowany w [17] sposób postępowania obejmuje trzy kroki: (1) modelowanie i symulację w czasie rzeczywistym urządzenia z użyciem modelu symulacyjnego opracowanego w fazie projektowania. Symulacja powinna zawierać ten sam kod programu co konstruowane urządzenie. Wykonywanie procedur oprogramowania symulacyjnego powinno odbywać się w rzeczywistym procesorze, a także z wykorzystaniem rzeczywistych interfejsów, które będą się znajdować w konstruowanym napędzie (*ang. HIL - Hardware In the Loop simulation*). Efektem symulacji jest sprawdzenie poprawności sygnałów wysyłanych do tranzystorów i aparatury zabezpieczeniowej. W kroku (2) dla uszkodzeń symulowanych z wykorzystaniem symulacji *HIL* opracowywana jest wstępna analiza FMEA przy ścisłym współdziałaniu zespołu projektantów i zespołu zajmującego się bezpieczeństwem i niezawodnością. Dokumentacja FMEA powinna być w sposób ciągły uaktualniana wraz z uzyskiwaniem nowych informacji o możliwych przyczynach i skutkach występowania uszkodzeń w urządzeniu pracującym w warunkach rzeczywistych. Dla napędu trakcyjnego analiza FMEA powinna zaczynać się od przeanalizowania podstawowych warunków pracy napędu [17]:

- praca napędu trakcyjnego w trybie poboru energii z sieci trakcyjnej i hamowania,
- praca przy zmianach wartości zadanej momentu i zadanego wzbudzenia silnika trakcyjnego,
- praca we wszystkich możliwych do przewidzenia trybach sterowania (energooszczędne, antypoślizgowe, tryb awaryjny, itp.)
- praca z przewidywaniem możliwości zmian konfiguracji algorytmu sterowania.

W kolejnym kroku (3) gdy zostanie przeanalizowany i poddany walidacji model nieuszkodzonego napędu trakcyjnego oraz przeanalizowane możliwości wystąpienia uszkodzeń, formalny model urządzenia powinien zostać rozszerzony o podsystemy wymuszające uszkodzenia i stany awaryjne, w tym szumy pomiarowe, zakłócenia powodujące przerwy w zasilaniu i przerwy w połączeniach poszczególnych podsystemów oraz modułów napędu, a także zakłócenia przy pomiarach prądów i napięć. Kolejnym krokiem (4) jest przeprowadzenie zaawansowanej analizy FMEA dla rozbudowanego modelu symulowanego w czasie rzeczywistym HIL. Na podstawie takiej symulacji uzyskiwane są kolejne dane, tym razem na temat zachowania napędu w stanach pracy z występującymi uszkodzeniami. Układ sterowania napędem może być wówczas uzupełniony o procedury zarządzania uszkodzeniami oraz procedury ochrony przed negatywnymi skutkami urządzeń.

5. Podsumowanie i wnioski

W referacie przedstawiono elementy analizy RAMS i cyklu życia, które powinny być brane pod uwagę przy opracowaniu napędu trakcyjnego nowej generacji, o topologii e-transformatora - przeznaczonego do modernizacji elektrycznych zespołów trakcyjnych. Zwiększona liczba komponentów energoelektronicznych e-transformatora, w porównaniu z



liczbą komponentów klasycznych falowników trakcyjnych jest kompensowana przez uzyskiwany wzrost sprawności napędu, eliminację szeregu problemów związanych z wyższymi harmonicznymi, a także oferowane możliwości oraz możliwością wprowadzenia zaawansowanych algorytmów sterowania i diagnostyki dzięki uzyskiwanej wysokiej precyzji generowania napięcia zasilającego silnik. Urządzenie e-transformatora trakcyjnego, charakteryzujące się, w wyniku zwiększonej liczby komponentów, relatywnie krótszym czasem MTBF, dla uzyskania wysokiej wartości wskaźnika dostępności powinno charakteryzować się zoptymalizowanym, możliwie najkrótszym czasem MTTR. Służy temu budowa modułowa e-transformatora, a także zastosowanie niskonapięciowych komponentów nowej generacji - przyrządów półprzewodnikowych SiC i niskoindukcyjnych kondensatorów polipropylenowych.

Konstrukcja e-transformatora, dzięki budowie modułowej, może być równomiernie rozłożona na powierzchni dachu pojazdu szynowego, a w przyszłościowych rozwiązaniach, w przestrzeni podpodłogowej - zapewniając z jednej strony symetryczne obciążenie konstrukcji pociągu wzdłuż osi jazdy, a z drugiej - zwiększenie dostępnej przestrzeni pasażerskiej. Znany z przeszłości sposób postępowania w postaci przeprowadzenia jednokrotnej analizy niezawodności urządzeń - tylko raz na etapie procesu produkcji urządzenia jest obecnie, z pewnością, niewystarczający do uzyskania krótkiego czasu MTTR urządzenia. Wysokie możliwości obliczeniowe dostępnych na rynku procesorów sygnałowych, gromadzenie ogromnych ilości danych w chmurze (*ang. Big Data*) oraz dostępność oprogramowania pozwalającego na symulacje komputerowe w czasie rzeczywistym z fizycznym wykorzystaniem w pętli symulacyjnej elektronicznych kart interfejsów napędu oferują daleko bardziej zaawansowane możliwości zarządzania ryzykiem uszkodzeń i uzyskanie wysokiej dostępności e-transformatora.

Projekt finansowany ze środków Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój, Poddziałanie 1.2 Programy Sektorowe, nr umowy POIR.01.02.00-00-0193/16-00.

Literatura

- [1] Adamowicz M., „Luxtorpeda 2.0”, OZEON Ekologia Gospodarka Biznes, nr 1 (8)/2018, ss. 46 -50.
- [2] Falco M., Desportes G., Piton M., „Innovative Railway Traction System”, Proc. 7th Transport Research Arena TRA 2018, April 16-19, 2018, Vienna, Austria, ss. 1 – 10.
- [3] Nicod L., „The 2020 future traction system early investigations”, Roll2Rail Final Conference, 17.10.2017, Munich, źródło: http://www.roll2rail.eu/docs/Roll2Rail_Final_Conference_Full_presentation.pdf
- [4] Vetterli C., Suranyi A., Concept et potentiel d'économie d'énergie d'un transformateur de traction électronique “PETT”, Rapport annuel, ABB Sécheron SA, 2013.
- [5] Magro M. C., Savio, S., „Reliability and availability performances of a universal and flexible power management system”, Proc. IEEE Int. Symp. ISIE, 2010, ss. 2461-2468.
- [6] Ronanki D., Williamson, S. S., „Evolution of power converter topologies and technical considerations of power electronic transformer-based rolling stock architectures”, *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 4, no. 1, 2018, ss. 211-219.



- [7] Evans N. M., Lagier T., Pereira A., „A preliminary loss comparison of solid-state transformers in a rail application employing silicon carbide (SiC) MOSFET switches”, Proc. 8th IET Int. Conf. Power Electronics, Machines and Drives (PEMD), 2016, ss. 1-6.
- [8] Adamowicz M., Krzemiński Z., Stec P., „Dual Active Bridge (DAB) DC-DC converter for multilevel propulsion converters for electrical multiple units (EMU)” *MATEC Web of Conferences*, Vol. 180, p. 04002, EDP Sciences, 2018, ss. 1-6.
- [9] Huber J. E., Kolar J. W., „Optimum number of cascaded cells for high-power medium-voltage AC–DC converters”, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol.5 no. 1, 2017, ss. 213-232.
- [10] Negeshi T., Tsuda R., Ota K., Iura S., Yamaguchi H., „3.3-kV All-SiC Power Module for Traction System Use”, Proceedings Int. Conf. PCIM Europe, 2017, ss. 51-56.
- [11] Dujic D., Kieferndorf F., Canales F., „Power Electronic Transformer Technology for Traction Applications–An Overview”, *Electronics*, vol. 16, no. 1, 2012, ss. 50-56.
- [12] Sadik D. P., Colmenares J., Tolstoy G., Pefitsis D., Bakowski M., Rabkowski J., Nee H. P., „Short-circuit protection circuits for silicon-carbide power transistors”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no.4, 2016, ss. 1995-2004.
- [13] ten Have R. Vermulst B., van Duivenbode J., „An approach to lifetime estimation of SiC MOSFETs subjected to thermal stress”, Proc. Int. Conf. Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, PCIM Europe 2015, ss. 1-9.
- [14] Nel B. J., Perinpanayagam S., „A brief overview of SiC MOSFET failure modes and design reliability”, *Procedia CIRP*, vol. 59, 2017, ss. 280-285.
- [15] Sadik, D. P., „On Reliability of SiC Power Devices in Power Electronics”, Doctoral dissertation, KTH Royal Institute of Technology, 2017.
- [16] Faraci V., „Calculating failure rates of series/parallel networks”, *The Journal of Alion' s, System Reliability Center*, I/2006, ss. 1-28.
- [17] del Olmo J., Poza J., Garramiola F., Nieva T., Aldasoro L., „Model driven Hardware-in-the-Loop Fault analysis of railway traction systems”. In IEEE Int. Workshop Electronics, Control, Measurement, Signals Application to Mechatronics (ECMSM), 2017 ss. 1-6.