

Wirkung von Y-Kondensatoren auf Überspannungen bei Leistungsschnittstellen von Luftfahrtgeräten bei induzierten Transienten nach DO-160/ED-14

Frank Meier, Apparatebau Gauting, Gauting

1 Einleitung

Einschläge von Blitzen in die Flugzeugstruktur führen zu punktuellen thermischen Belastungen und über die Änderungsgeschwindigkeit des Ableitstromes zu induzierten Spannungen im Leitungsnetz. Zur Qualifikation von elektronischen Geräten sind, für die direkte Einwirkung wie auch die induzierende Wirkung, Prüfpulse nach ED-14/DO-160 und MIL-STD-461 festgelegt, die tatsächlich auftretende Ereignisse nachbilden [1, 2]. Beide Normen gehen auf Untersuchungen in den 80iger Jahren zurück, die an messtechnisch ausgestatteten Flugzeugen ermittelt wurden [3]. Derzeit wird an der Protokollierung der speziell ausgestatteten Verkehrsflugzeuge gearbeitet, um gesicherte Daten über die Häufigkeit, die lokale Verteilung und die Intensität zu erhalten. Ein- und Ausgänge müssen mit Spannungsschutzelemente versehen werden, um die Isolationsfestigkeit der Komponenten und die mittelbare Wirkung auf die Funktion des Gerätes in Grenzen zu halten. Für Signalschnittstellen helfen die Innenwiderstände, den transienten Strom in das Schutzelement zu begrenzen [4].

Ein resistives Serienelement verbietet sich bei den Ein- und Ausgängen für Leistungsschnittstellen. Bei Netzein- und ausgängen für 115V/200V oder 230V/400V Wechselspannung werden Y-Kondensatoren immer vorgesehen, um hochfrequente Störungen zu dämpfen. Für transiente Belastungen können sie, zusammen mit der Induktivität der Verkabelung, der Haupt- und Streuinduktivität des Transformators, der Streuinduktivität des Pulsgenerators und die Induktivität dedizierter Drosseln, zu einer Schwingung führen. Ihre Amplitude ist zu berücksichtigen, um die Spannungsfestigkeit der Y-Kondensatoren bemessen zu können. Bei kleinen Kapazitätswerten kann die Spannung das Doppelte der induzierten Spannung betragen, was bei der Auslegung häufig unterschätzt wird. Große Kapazitätswerte reduzieren die Überspannungen deutlich besser, doch begrenzt der Platzbedarf wie auch Forderungen an die Personensicherheit den größtmöglichen Wert.

2 Elektrische Prüfung

Bei der Prüfung der Störfestigkeit während des Betriebs (engl.: functional upset testing) wird eine induktive Kopplung (engl. cable bundle injection) durch eine Transformator auf den Kabelbaum vorgenommen. Bei der Prüfung auf Robustheit (engl.: damage testing) wird eine galvanische Kopplung auf den Kontakt im Steckverbinder (engl.: pin injection) angewendet. Der Pulsgenerator PG führt über die Primärwicklung einen Strom so in die Leiterschleife aus Kabelbaum, Erde und Gerät ein, dass sich an der Monitorschleife die beabsichtige Pulsform einstellt, Abb. 1. Die Ladespannung U_{CH} wird schrittweise erhöht, bis der Spitzenwert \hat{u}_{CM} den Sollwert U_T oder der

Spitzenwert des Gleichtaktstromes \hat{i}_{CM} den Sollwert I_T erreicht hat. Der Gleichtaktstrom i_{CM} wird mit einem Stromwandler inductiv erfasst und, wie die Monitorspannung u_{MS} , aufgezeichnet. Der Strom an einem Kontakt bleibt ebenso unbekannt wie die Spannung zwischen Kontakt und Erde. Beides stellt sich nach den elektrischen Eigenschaften des Prüflings und dem momentanen Betriebszustand ein.

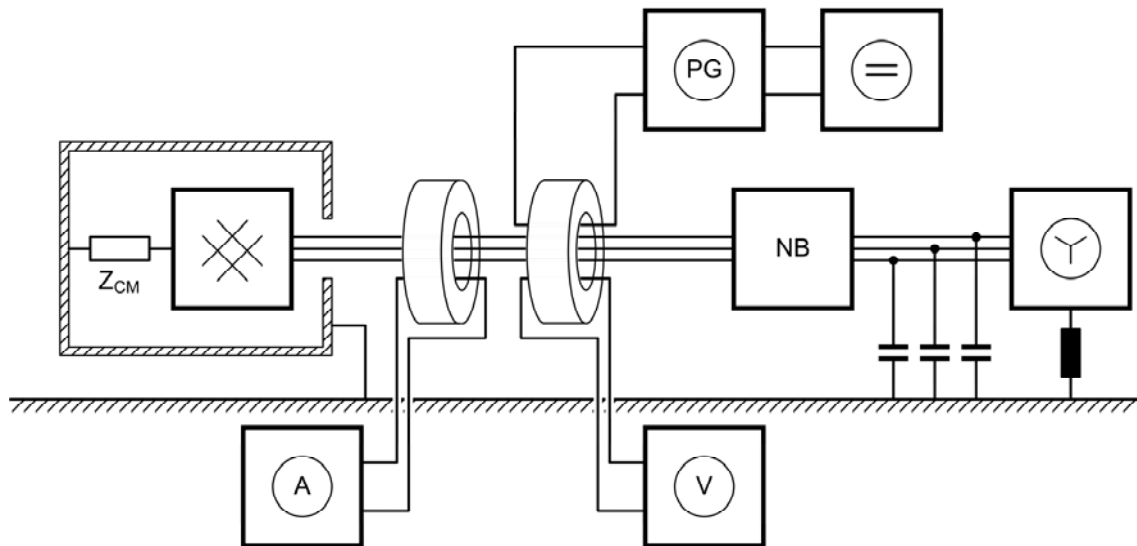


Abbildung 1: Aufbau mit zu prüfendem Gerät, Koppelglied und Pulsgenerator

Die Pulsenergie muss vollständig vom Transformator TP umgesetzt werden und erfordert ein hochpermeables Material. Hysterese und Sättigung treten auf und verzerren die Pulsform. Ihr Einfluss lässt sich allerdings während der schrittweisen Erhöhung der Ladespannung für jeden Puls ablesen und ist eine kontrollierbare Größe.

Zum Schutz des Netzgenerators werden Stützkondensatoren C_N mit $10 \mu\text{F}$ zwischen Phase und Erde verwendet. Sie dämpfen, zusammen mit der Längsinduktivität der Bordnetz nachbildung, Spannungssprünge und schützen den Generator. Allerdings führen sie zu einer erheblichen Blindleistung und müssen bei der Auslegung der Prüfmittel berücksichtigt werden.

Der Prüfling EUT selbst wird als unbekanntes Netzwerk angenommen, dass eine Gleichtaktimpedanz Z_{CM} zum Gehäuse hat. Der Pfad von Gehäuse zu Erde wird als impedanzlos angenommen. Parasitäre Elemente könnten der Gleichtaktimpedanz zugeschlagen werden. Vielfach haben Prüflinge mehr als ein Kabel, das zu zusätzlichen Ableitwegen für den Strom führt. Sie bleiben in der Diskussion unberücksichtigt, damit die maximale Wirkung des Pulses auf den Y-Kondensator untersucht werden kann.

Unter Vernachlässigung von Hysterese und Sättigung kann ein Summen-Ersatzschaltbild aus zwei gekoppelten Kreisen erstellt werden, das nur lineare Elemente enthält, Abb. 2. Die Gleichtaktimpedanz Z_{CM} wird in C_Y , R_Y und L_Y aufgeteilt und schließt parasitäre Komponenten der Leitung und der Elemente des Eingangskreises ein. Der Pulskondensator C_P hat eine Anfangsspannung U_{CPO} , die von der Ladespannung U_{CH} bestimmt wird. Mit dem Längswiderstand R_D und dem Entladewider-

standes R_E wird die Dämpfung eingestellt, während die Zeitkonstante durch den Kapazitäten C_P und C_Y sowie den Induktivitäten L_D , L_T , L_{NB} bestimmt wird.

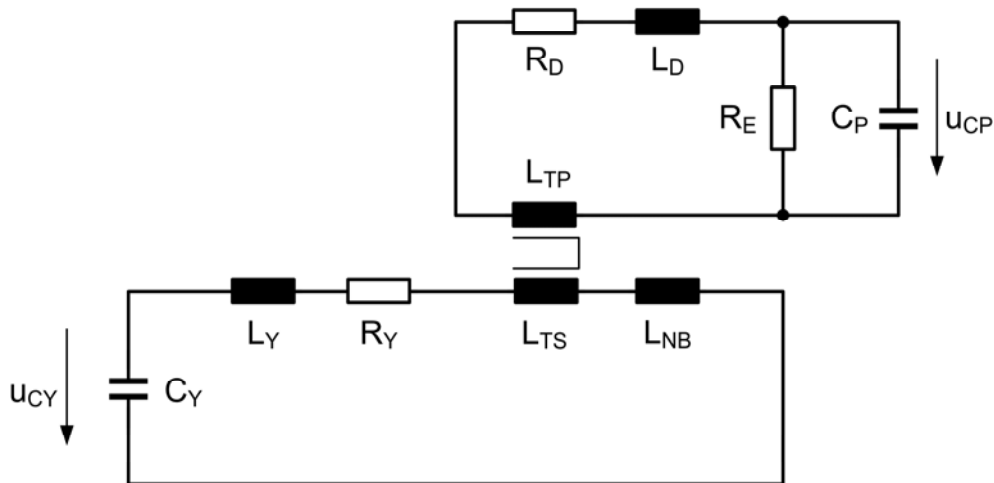


Abbildung 2: Summen-Ersatzschaltbild mit Pulskreis und Lastkreis

Der Leitungswiderstand R_Y ist immer zu berücksichtigen, da der Querschnitt der Zuleitung eines Gerätes immer knapp bemessen ist. Da der Pulsstrom beträchtlich größer als der Nennstrom ist, darf er nicht vernachlässigt werden. Die Induktivität der Zuleitung L_Y ist zu berücksichtigen, da sie in der Größenordnung der Netznachbildung mit $5 \mu\text{H}$ liegt. Die Umformung in ein Serien- oder Parallel-Ersatzschaltbild ist möglich, Abb. 3.

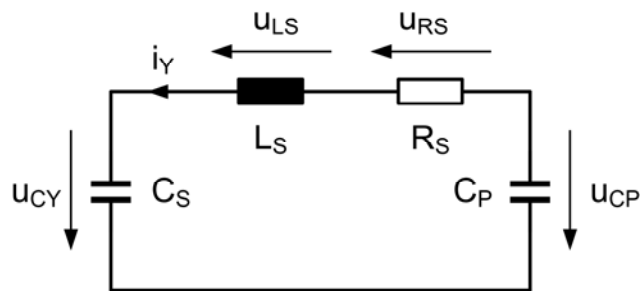


Abbildung 3: Vereinfachtes Ersatzschaltbild als Serien-Schwingkreis

3 Auslegung

Zum Zeitpunkt der Auslegung des Eingangsfilters sind Sollwerte des Spitzenstroms I_T und der Spitzenspannung U_T bekannt, so kann die Wirkung auf die Schaltungselemente durch Netzwerkanalyse, numerisch oder analytisch, bestimmt werden. Allerdings muss hier eine Wahl aller Bauteileparameter bekannt sein. Selbst das symbolische Rechnen in Programmpaketen wie *Mathematica* und *Maple* lassen nur begrenzt variable Parameter zu, wenn das Netzwerk komplex ist [5, 6]. Es bleibt wünschenswert, das Verhalten aus geschlossenen mathematischen Ausdrücken, also ohne noch zu ermittelnde Lösungen, Integral- oder Differentialoperatoren, zu kennen. Durch Vernachlässigung von Sättigung und Hysterese sind Vereinfachungen möglich

und das Ersatzschaltbild aus linearen, zeitinvarianten Elemente kann in einen Satz linearer Differenzialgleichungen mit konstanten Koeffizienten überführt werden.

4 Differenzialgleichung zweiter Ordnung

Nach der Vereinfachung des Ersatzschaltbildes auf den Serien-Schwingkreis kann die Lösung gesucht werden, Abb. 3. Für diesen Fall kann sie als geschlossenen Lösung angegeben werden.

$$\underline{u}_{CS}(t) = c_0 \exp((-c_2 + c_3)t) + c_1 \exp((-c_2 - c_3)t)$$

$$c_2 = \frac{1}{2} R_S \frac{1}{C_S L_S} \quad (1)$$

$$c_3 = \frac{1}{\sqrt{C_S L_S}} \sqrt{\left(\frac{1}{2} R_S \frac{C_S}{L_S}\right)^2 - 1}$$

Dabei werden die Koeffizienten c_0 und c_1 aus den Anfangsbedingungen i_{LS0} und u_{CS0} bestimmt. Wenn c_3 imaginär ist, tritt eine Oszillation auf.

Als Summe von zwei Exponentialfunktionen mit komplexem Argument wird eine komplexe Zahl für \underline{u}_{CS} geliefert und die physikalische Größe u_{CS} ist ihr reeller Anteil. Die Realwertbildung kann auch in die rechte Seite eingeführt werden (2).

$$u_{CS}(t) = d_0 \exp(-c_2 t) \cos(c_3 t) + d_1 \exp(-c_2 t) \sin(c_3 t) \quad (2)$$

Ist die Lösung für eine der Netzwerkgrößen u_{CS} , u_{LS} , u_{RS} oder i_S bekannt, so können alle anderen Netzwerkgrößen algebraisch berechnet werden oder es treten Integral- oder Differentialoperatoren auf.

$$\begin{aligned} 2 \sin^2(\alpha) &= 1 - \cos^2(\alpha) \\ 2 \cos^2(\alpha) &= 1 + \cos^2(\alpha) \\ \cos^2(\alpha) + \cos^2(\alpha) &= 1 \\ \cos^2(\alpha) - \cos^2(\alpha) &= \cos(2\alpha) \\ 2 \cos(\alpha) \sin(\alpha) &= \sin(2\alpha) \end{aligned} \quad (3)$$

In diesem Fall entsteht ein Mischterm, der auf $a(t)\cos(\alpha t) + b(t)\sin(\alpha t)$ zurückgeführt werden kann (3).

Weiterhin kann die Summe aus $\cos(\alpha t)$ und $\sin(\alpha t)$ auf genau eine trigonometrische Funktion transformiert werden (4).

$$\begin{aligned} a_1 \sin(\omega t) + a_2 \cos(\omega t) &= a \cos(\omega t + \varphi) \\ a &= \sqrt{a_1^2 + a_2^2} \\ \tan(\varphi) &= \frac{a_2}{a_1} \end{aligned} \quad (4)$$

Die Form legt nahe, den Term in eine nicht-oszillierende Term $m(t)$ und einen oszillierende Term $n(t)$ des Betrages eins aufzuteilen (5). In der Signalübertragung tritt $m(t)$ als Modulation auf. In den Diskussionen über analytische Signale wird eine sol-

che Aufteilung gesucht. Allerdings ist $m(t)$ eine unabhängige Variable wie die Phase $p(t)$.

$$u_{CS}(t) = m(t) n(t) \quad (5)$$

In Lösungen von Differenzialgleichungen sind die Variablen $m(t)$ und $n(t)$ lediglich Abkürzung. Daher soll $m(t)$ als Einhüllende bezeichnet werden. Dieser Begriff wird häufig in Lehrbüchern verwendet und als Verbindungslinie aufeinander folgender, lokaler Maximas einer oszillierenden Funktion verstanden. Für $m(t)$ gilt dies nicht, da bei einem lokalen Maximum von $m(t)n(t)$ nicht als Maximum von $n(t)$ liegt. Nur bei konstantem $m(t)$ tritt dieser der Fall auf. Für viele Anwendungsfälle ist dieser Unterschied von ungeordneter Bedeutung und der Begriff Einhüllende wird hier synonym verwendet. Analog lässt sich die Aufteilung für die komplexe Lösung vornehmen (6).

$$\begin{aligned} \underline{u}_{CS}(t) &= m(t) n(t) \\ m(t) &= \sqrt{c_0^2 + c_1^2} \exp(-c_2 t) \\ n(t) &= \frac{1}{\sqrt{c_0^2 + c_1^2}} (c_0 \exp(+c_3 t) + c_1 \exp(-c_3 t)) \end{aligned} \quad (6)$$

Die Einhüllende $m(t)$ beschreibt die Energie des Systems für jeden Zeitpunkt t , während der oszillierende Term die Verteilung der Energie auf die reaktiven Elemente beschreibt. Die Summe der Exponentialfunktion liefert keinen einfachen Zusammenhang zur Energie.

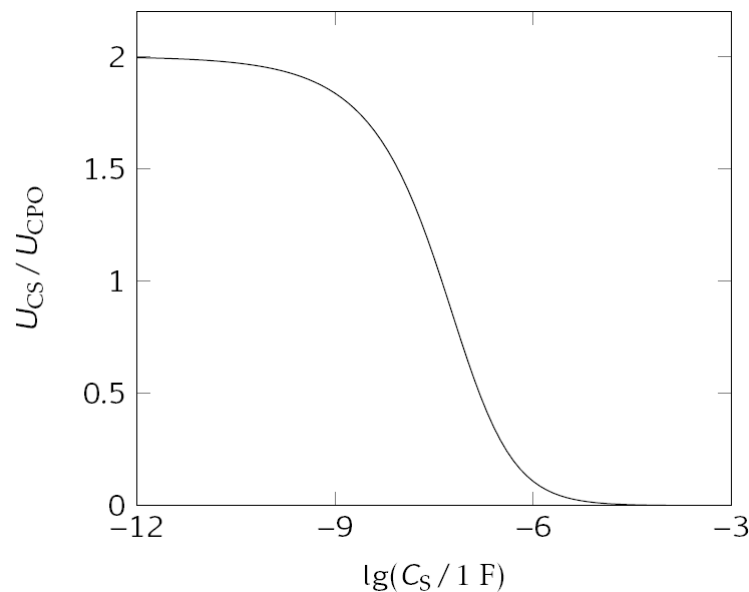


Abbildung 4: Verhältnis der Spitzenspannung als Funktion des Kapazitätsverhältnisses

Für die Auslegung der Y-Kondensatoren liefert $m(t)$ direkt den Einfluss von C_Y auf die maximale Spannung am Kondensator \hat{u}_{CY} . Die allgemeinen Anfangsbedingungen erlauben einen Anfangswert die Zustandsgrößen, die Spannung am Kondensator C_S und den Strom in der Induktivität L_S .

Wie zu erwarten war, strebt die Spitzenspannung U_{CY} gegen null, wenn gegen Unendlich strebt. Geht C_Y gegen Null, so steigt \hat{u}_{CY} auf das Doppelte der Anfangsspannung des Pulscondensators U_{CPO} . Damit wird die häufig anzutreffende Annahme widerlegt, die Spitzenspannung am Y-Kondensator sei identisch mit der induzierten Spannung u_{MS} im Monitorkreis und dem Sollwert der Spitzenspannung \hat{U}_T .

5 Zusammenfassung

Durch Blitzeinschläge in die Hülle eines Flugzeugs treten induzierte Spannungen an den Netzeingängen von Geräten auf, die zu einer Überbeanspruchung der Y-Kondensatoren führen können. Für Prüfpulse nach ED-14/DO-160 wurde ein Ersatzschaltbild in Form eines Serien-Schwingkreises identifiziert und die Spannung am Kondensator als geschlossenen Ausdruck darstellt. Einschließlich seiner allgemeinen Anfangsbedingungen kann er in einen rein-oszillierenden und einen amplitudenbestimmenden Term aufgeteilt werden. Daraus wurde ein einfacher Zusammenhang zwischen Spitzenspannung am Y-Kondensator zu Anfangsspannung des Pulscondensators ermittelt.

Literatur

- [1] ED-14G. Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment. EUROCAE, Paris, Frankreich, Ausgabe G, 2011. Identisch zu DO-160
- [2] MIL-STD-461F. Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems and Equipment. U. S. Department of Defense, Ausgabe F, 2007
- [3] ED-84. Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms Standard. EUROCAE, Paris, Frankreich, 1997
- [4] Meier, Frank: Auslegung von Spannungsschutzdioden für die digitalen Eingänge von Luftfahrtgeräten bei Störfestigkeitsprüfungen nach DO-160/ED-14. Garbe, Heino [Hrsg.], EMV 2012, VDE-Verlag, 2012
- [5] Mathematica. Wolfram Research, Champaign, IL, USA
- [6] Maple. Maplesoft, Waterloo, Kanada