Nieizotermiczne charakterystyki impulsowych układów zasilających

Krzysztof Górecki
Akademia Morska w Gdyni
Katedra Elektroniki Morskiej

Plan prezentacji

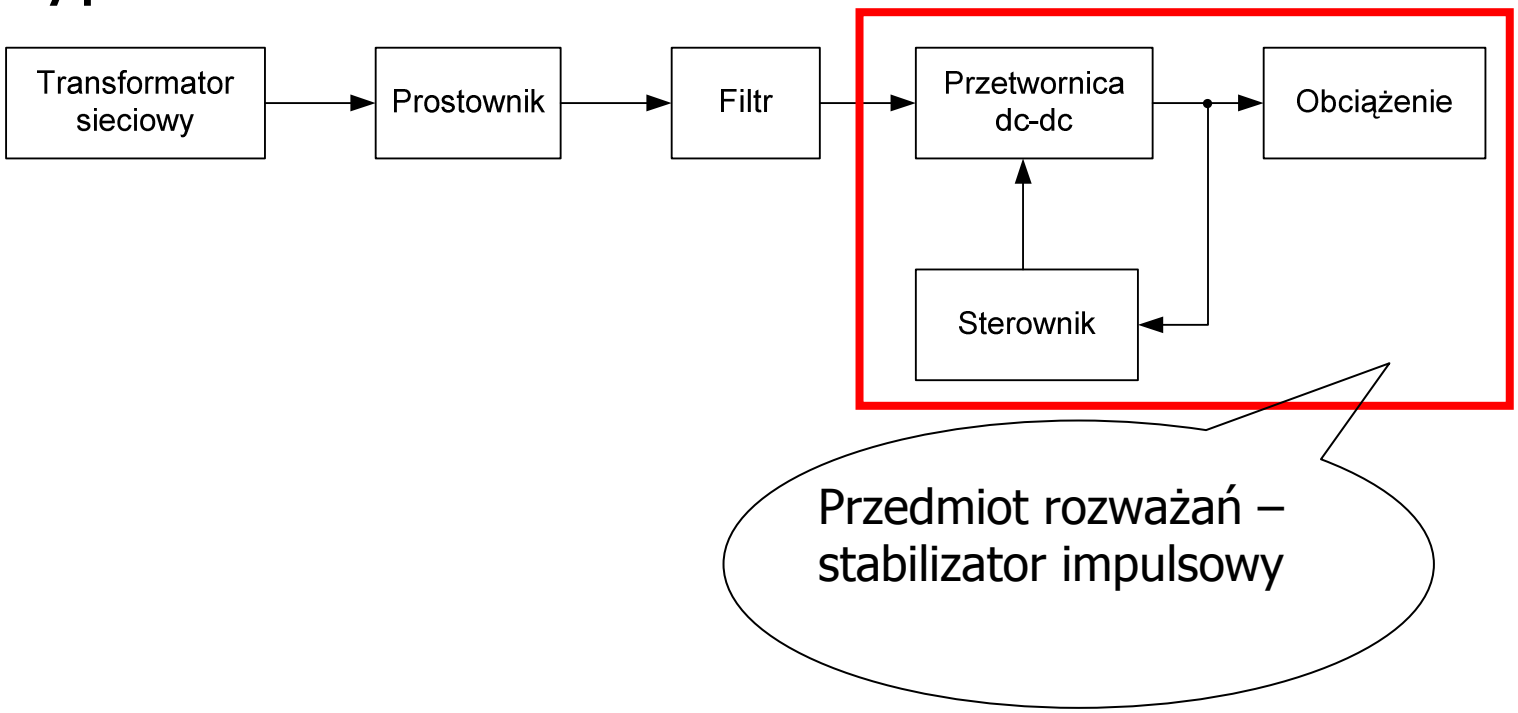
- Wprowadzenie
- Struktura zasilacza impulsowego
- Metody elektrotermicznej analizy układów impulsowych
- Elektrotermiczne modele elementów elektronicznych i układów scalonych
- Wyniki badań
- Podsumowanie

Wprowadzenie

- Zasilacze liniowe i zasilacze impulsowe
- Typowo stosowane układy impulsowe, zapewniające wyższą sprawność energetyczną
- Zasada działania – znana od wielu lat
- Zmieniają się stosowane elementy półprzewodnikowe i rośnie częstotliwość pracy
- Oferowane są układy scalone realizujące funkcje zasilacza impulsowego i wymagające zaledwie kilku elementów zewnętrznych

Struktura zasilacza impulsowego

- Typowa struktura



Elementy składowe stabilizatorów impulsowych

- Układy scalone – sterowniki lub regulatory impulsowe
- Tranzystory – unipolarne lub bipolarne
- Diody impulsowe lub Schottky'ego
- Elementy bierne
- We wszystkich elementach zachodzą zjawiska cieplne – rozważania dotyczą tylko elementów półprzewodnikowych

Wpływ samonagrzewania na elementy elektroniczne

- Wzrost temperatury elementów,
- Pogorszenie niezawodności,
- Zmiana przebiegu charakterystyk i wartości parametrów roboczych układów z tymi elementami

- Istotny problem – wiarygodne modele elementów i skuteczne metody analizy elektrotermicznej układów impulsowych

Metody analizy układów impulsowych (1)

- Klasyfikacja
  - Ze względu na rodzaj analizy
    - Metoda analizy stanów przejściowych
    - Metoda analizy stałoprądowej
    - Metoda małosygnałowej analizy częstotliwościowej
  - Ze względu na rodzaj stosowanych modeli
    - Analizy z modelami kluczowanymi
    - Analizy z modelami uśrednionymi

Metody analizy układów impulsowych (2)

- Metoda analizy stanów przejściowych:
  - Zalety:
    - Możliwość wyznaczenia czasowych przebiegów napięć i prądów w układzie,
    - Możliwość oceny stabilności układu,
    - Informacja o tętnieniach napięć i prądów
  - Problemy:
    - Modelowania elementów kluczujących,
    - Impulsy Diraca w chwili przełączenia (dla kluczy idealnych),
    - Długi czas trwania analizy niezbędny do uzyskania stanu ustalonego w układzie.

Metody analizy układów impulsowych (3)

- Metoda analizy dc z modelami uśrednionymi:
  - Zalety:
    - Wyznaczenie charakterystyk przetwornic w stanie ustalonym za pomocą analizy dc,
    - Krótki czas trwania obliczeń,
    - Brak problemów ze zbieżnością.
  - Wady:
    - Uproszczone modele elementów kluczujących,
    - Brak informacji o fluktuacjach napięć i prądów,
    - Konieczność sformułowania struktury zastępczej analizowanego układu przed obliczeniami

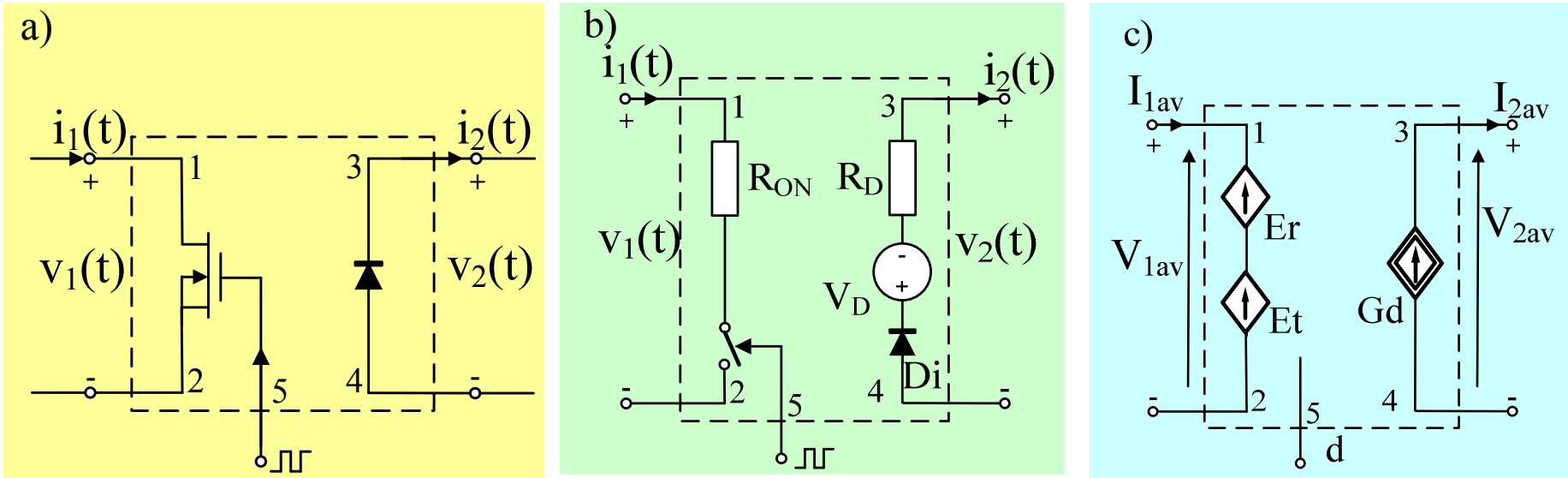
Nowe metody analizy

- Klasyczne metody analizy pomijają zjawiska cieplne
- Metody opracowane w Katedrze Elektroniki Morskiej AMG:
  - wyznaczanie nieizotermicznych charakterystyk przetwornic dławikowych przy wykorzystaniu liniowego elektrotermicznego uśrednionego modelu przełącznika diodowo – tranzystorowego
  - wyznaczanie nieizotermicznych charakterystyk przetwornic dławikowych przy wykorzystaniu ich nieliniowych elektrotermicznych modeli uśrednionych
  - przyspieszona elektrotermiczna analiza stanów przejściowych w przetwornicach dc-dc
  - małosygnałowa elektrotermiczna analiza przetwornic dc-dc

1. Górecki K.: A New Electrothermal Average Model of the Diode-Transistor Switch. *Microelectronics Reliability*, Vol. 48, No. 1, 2008, pp. 51-58.
2. Górecki K.: Non-linear average electrothermal models of buck and boost converters for SPICE. *Microelectronics Reliability*, Vol. 49, no.4, 2009, pp. 431-437.
3. Górecki K., Zarębski J.: The method of a fast electrothermal transient analysis of single-inductance dc-dc converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 27, No. 9, 2012, pp. 4005-4012.
4. Górecki K., Zarębski J.: Małosygnałowy elektrotermiczny model przetwornicy boost. *Elektronika*, Nr 12, 2007, ss. 90-93.

Liniowy uśredniony model przełącznika diodowo–tranzystorowego

- Ogólna koncepcja [1]
  - We wszystkich przetwornicach dc-dc można wyróżnić przełącznik diodowo-tranzystorowy



  - Dioda i tranzystor w stanie ustalonym włączane są naprzemiennie a sygnał sterujący jest okresowy
  - Wada – ograniczony zakres częstotliwości pracy [2]

[1] R. Ericson, D. Maksimovic: Fundamentals of Power Electronics. Norwell, Kluwer Academic Publisher, 2001.

[2] K. Górecki, J. Zarębski: Investigations of the Usefulness of Average Models for Calculations Characteristics of Buck and Boost Converters at the Steady State. *International Journal of Numerical Modelling Electronic Networks, Devices and Fields* Vol. 23, No. 1, 2010, pp. 20-31.

Liniowy elektrotermiczny uśredniony model przełącznika diodowo–tranzystorowego

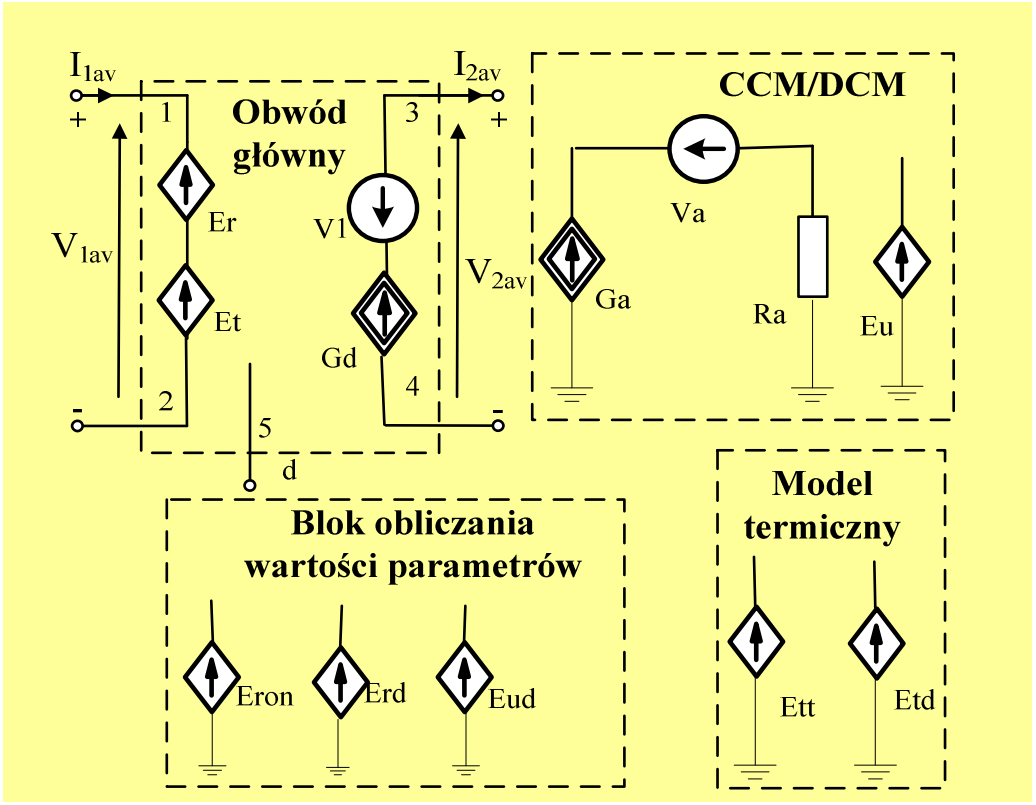
- W celu sformułowania modelu elektrotermicznego:
  - Uzależniono charakterystyki elementów półprzewodnikowych od temperatury,
  - Opracowano model generacji ciepła i model termiczny elementów kluczujących,
  - Opracowano sposób implementacji modelu w programie SPICE w postaci odpowiedniego podukładu
- Przy formułowaniu modelu generacji ciepła występuje problem wyznaczania nadwyżki temperatury elementu pobudzanego okresowym sygnałem w.cz.

---

[1] Górecki K.: A New Electrothermal Average Model of the Diode-Transistor Switch. *Microelectronics Reliability*, Vol. 48, No. 1, 2008, pp. 51-58.

Liniowy elektrotermiczny uśredniony model przełącznika diodowo–tranzystorowego

- Postać modelu

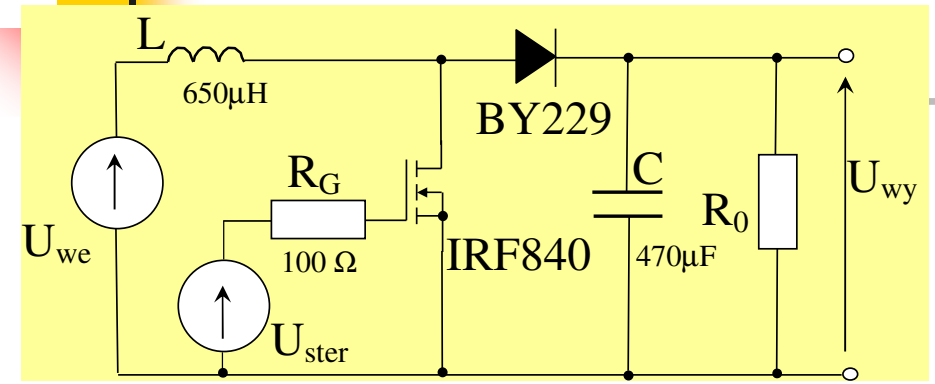


$$\Delta T = T_j - T_a = R_{th} \cdot P_{(AV)}$$

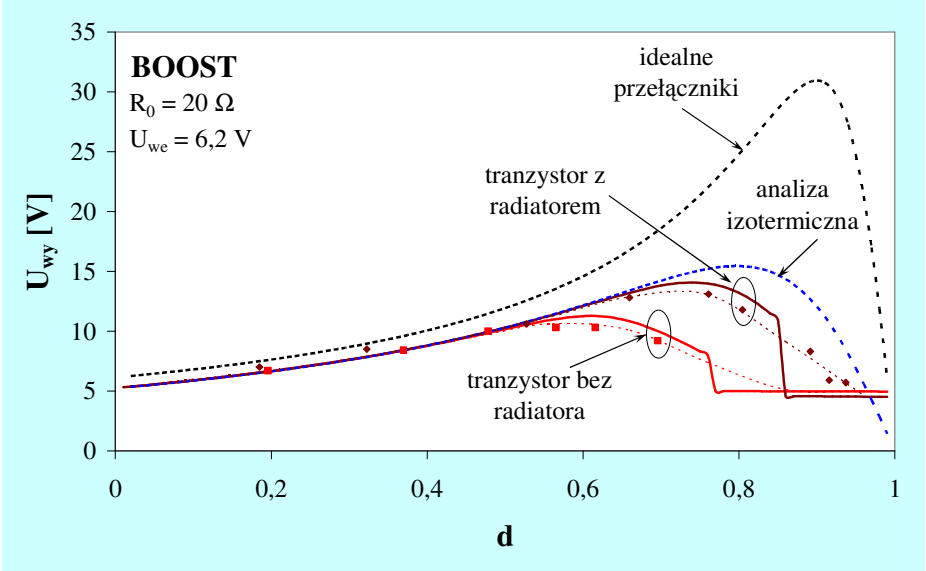
R_{th} – rezystancja termiczna

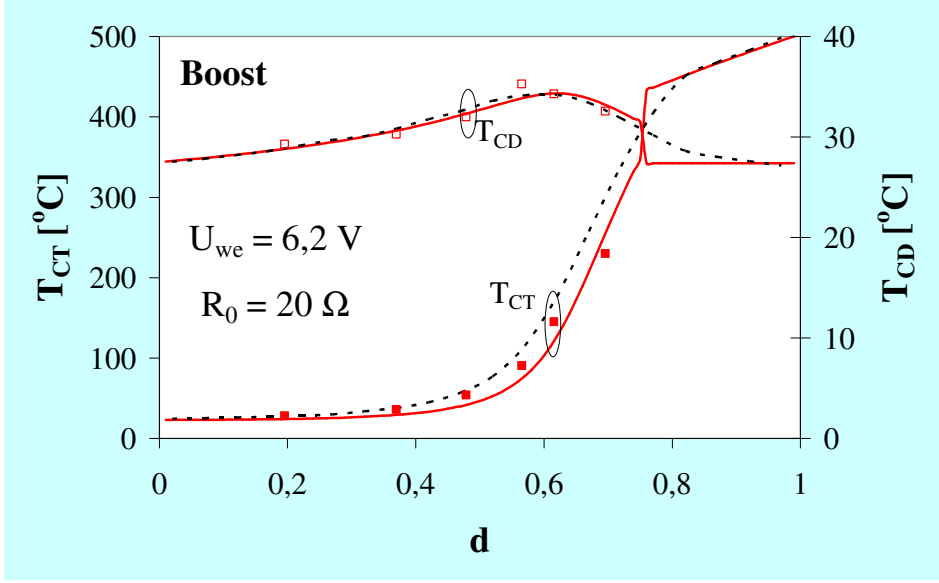
$P_{(AV)}$ – wartość średnia mocy

Wyniki obliczeń i pomiarów



Czas trwania obliczeń krótszy o 4 rzędy wielkości

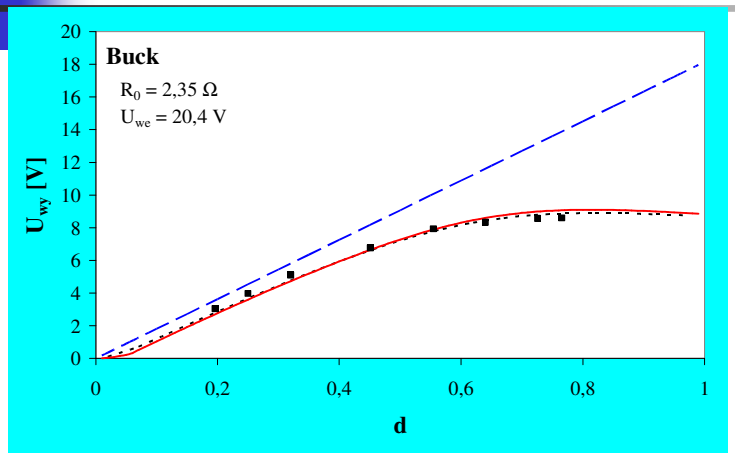


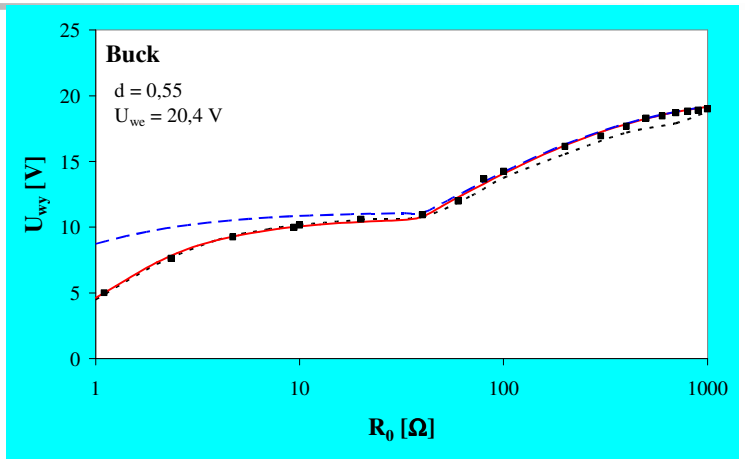


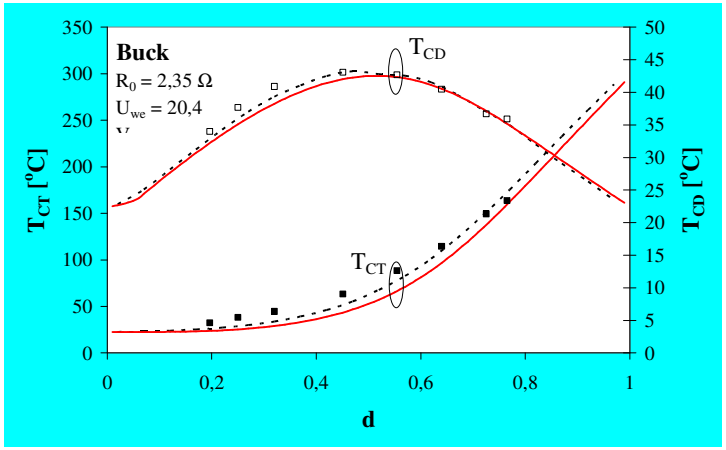
izotermiczny model uśredniony — autorski model uśredniony

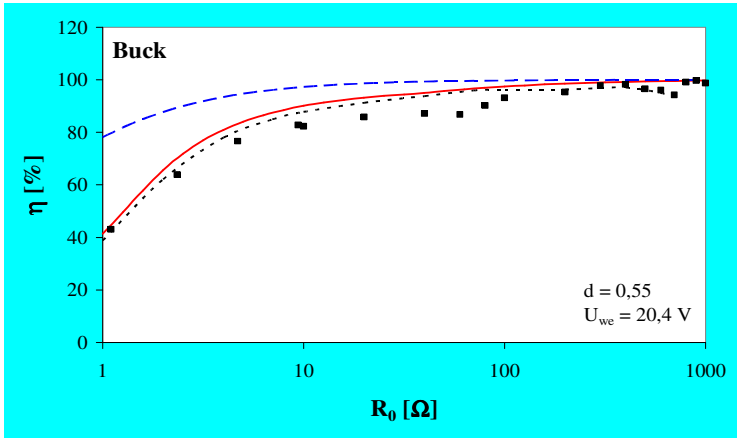
pomiar ..... elektrotermiczna analiza transient

Wyniki obliczeń i pomiarów









analiza elektrotermiczna — analiza izotermiczna - - - pomiary ■■■

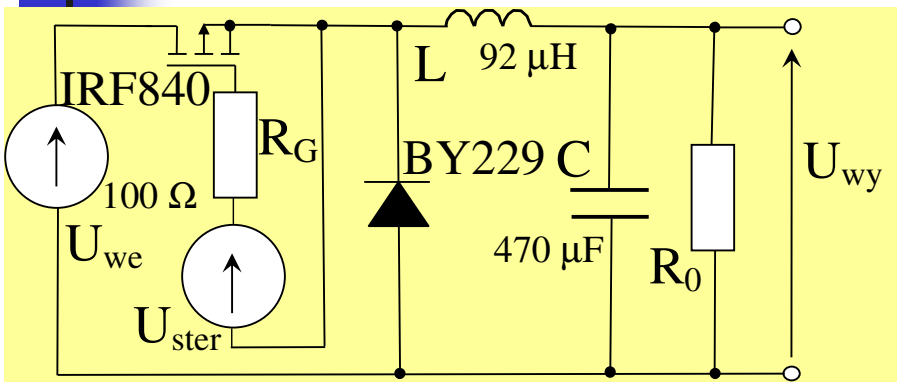
Metoda przyspieszonej analizy elektrotermicznych stanów przejściowych przetwornic dc-dc

- Koncepcja ogólna
  - Przewidywanie wartości napięć w stanie ustalonym na podstawie wyników elektrotermicznej analizy stanów przejściowych przetwornicy przy wykorzystaniu algorytmu splotowego
  - Ze względu na nieliniowość elementów półprzewodnikowych obliczenia są wykonywane iteracyjnie

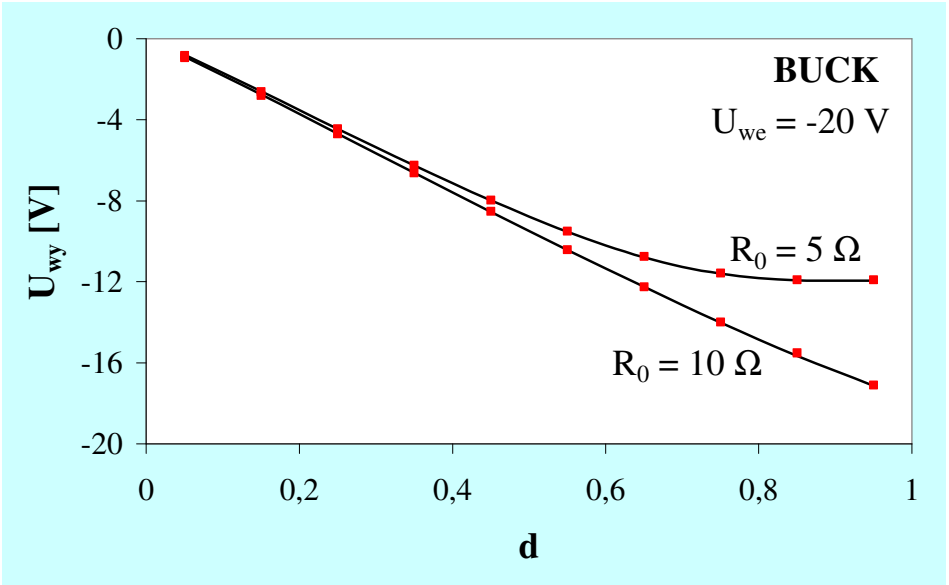
---

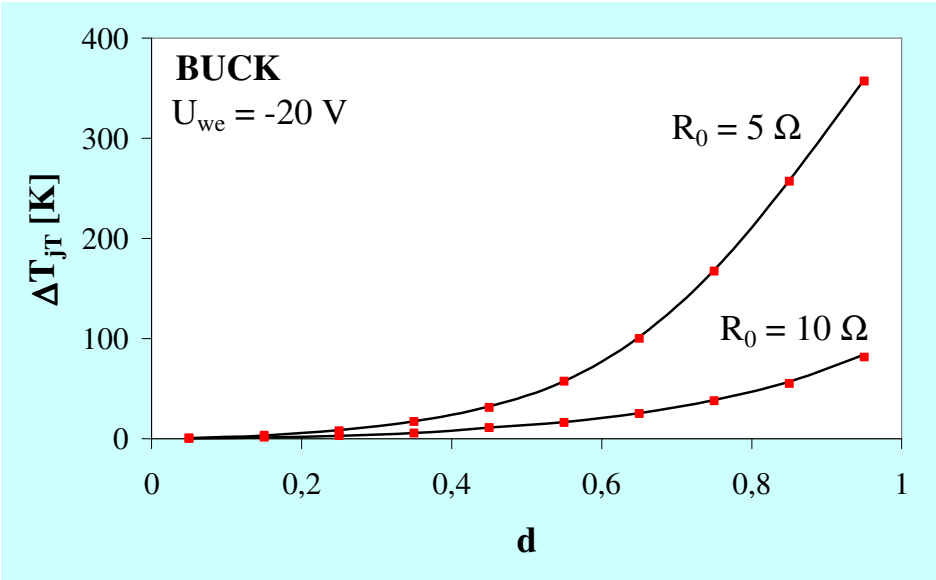
[1] Górecki K., Zarębski J.: The method of a fast electrothermal transient analysis of single-inductance dc-dc converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 27, No. 9, 2012, pp. 4005-4012.

Metoda przyspieszonej analizy elektrotermicznych stanów przejściowych przetwornic dc-dc



- czas trwania obliczeń krótszy nawet o 8 rzędów wielkości niż w klasycznej metodzie analizy transient





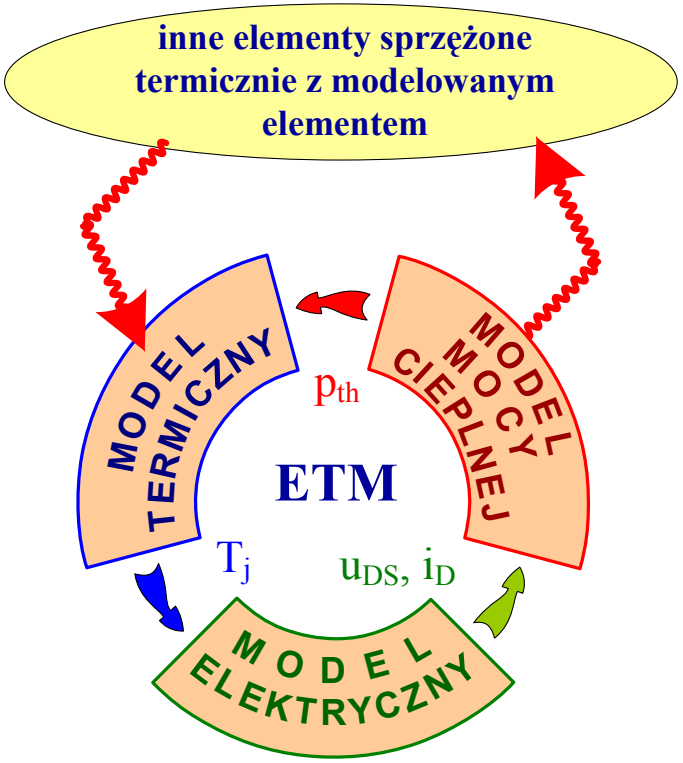
—— metoda przyspieszonej analizy transient ■■■ klasyczna analiza transient

Elektrotermiczna analiza stabilizatorów impulsowych

- Metoda analizy – elektrotermiczna analiza stanów przejściowych z jedną niefizyczną termiczną stałą czasową
- Niezbędne elektrotermiczne modele elementów mocy i układów sterujących
- Elektrotermiczne modele elementów dyskretnych

- Zarębski J., Górecki K.: Modelling CoolMOS Transistors in SPICE. *IEE Proceedings on Cicuits, Devices and Systems*, Vol. 153, No. 1, 2006, pp. 46-52.
- Zarębski J., Górecki K.: A SPICE Electrothermal Model of the Selected Class of Monolithic Switching Regulators. *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 23, No. 2, 2008, pp. 1023 – 1026.
- Górecki K., Zarębski J.: Electrothermal analysis of the self-excited push-pull dc-dc converter. *Microelectronics Reliability*, Vol. 49, no.4, 2009, pp. 424-430.
- Zarębski J., Górecki K.: SPICE-aided modelling of dc characteristics of power bipolar transistors with selfheating taken into account. *International Journal of Numerical Modelling Electronic Networks, Devices and Fields*, Vol. 22, No. 6, 2009, pp. 422-433.
- Górecki K., Zarębski J.: Modelling CoolMOSC3 Transistor Characteristics in SPICE. *International Journal of Numerical Modelling Electronic Networks, Devices and Fields,* Vol. 23, No. 2, 2010, pp. 127-139.
- Zarębski J., Górecki K.: The Electrothermal Large-Signal Model of Power MOS Transistors for SPICE. *IEEE Transaction on Power Electronics*, Vol. 25 , No. 5, 2010, pp. 1265 – 1274.
- Górecki K., Zarębski J.: Influence of MOSFET Model Form on Characteristics of the Boost Converter. *Informacije MIDEM Journal of Microelectronics, Electronic Components and Materials*, Vol. 41, No. 1, 2011, pp. 1-7.
- Górecki K., Detka K.: Electrothermal model of choking-coils for the analysis of dc-dc converters. *Materials Sciences & Engineering B*, Vol. 177, No. 15, 2012, pp. 1248-1253.
- Górecki K., Zarębski: The influence of diodes and transistors made of silicon and silicon carbide on the nonisothermal characteristics of boost converters. *Informacije MIDEM Journal of Microelectronics, Electronic Components and Materials*, vol. 42, No. 3, pp. 176-184.

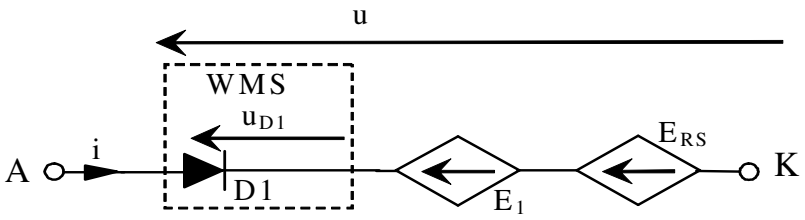
Modele elektrotermiczne

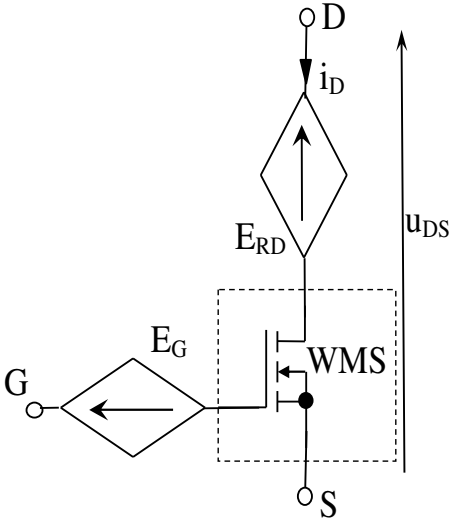


- Skupiony model termiczny w postaci sieci Cauera lub Fostera
- Moc cieplna równa całkowitej mocy traconej w elemencie
- Różne struktury modeli elektrycznych

Model elektryczny (1)

- Hybrydowe modele diody i tranzystora polowego



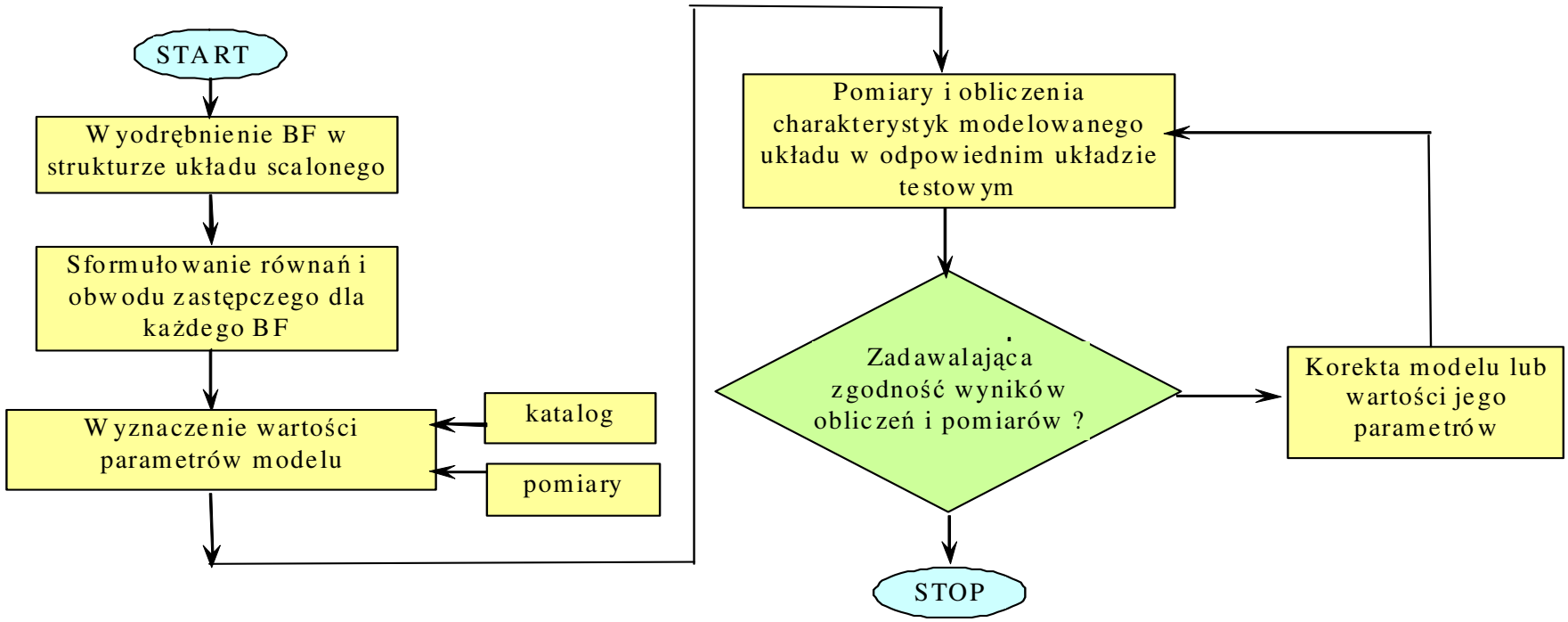


$$E_{RS} = i \cdot RS \cdot \alpha_{RS} \cdot (T_j - T_0) \qquad E_1 = \alpha_u \cdot (T_j - T_0) \qquad p_{th} = u \cdot i$$

$$E_{RD} = i_D \cdot RD \cdot \alpha_{RD} \cdot (T_j - T_0) \qquad E_G = \alpha_u \cdot (T_j - T_0) \qquad p_{th} = u_{DS} \cdot i_D$$

Model elektryczny (2)

- Sposób formułowania modeli układów scalonych



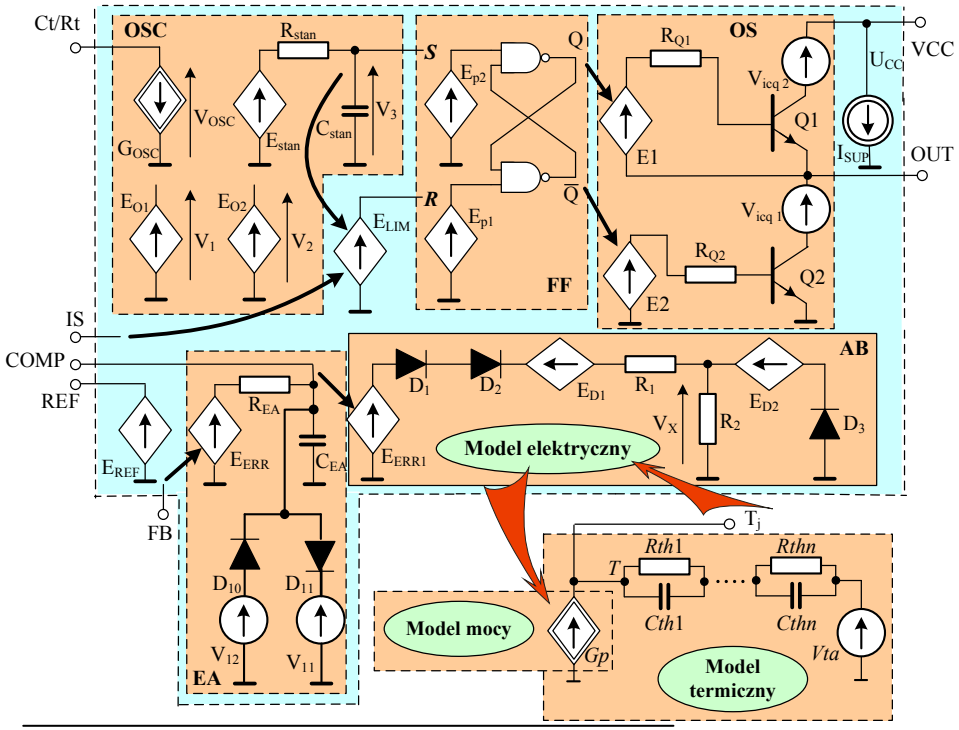
Górecki K.: The electrothermal macromodel of switching voltage regulators from L4970 family. *International Journal of Numerical Modelling Electronic Networks, Devices and Fields*, Vol. 21, No. 6, 2008, pp. 455-473.

Elektrotermiczne modele sterowników i regulatorów

- Opracowano elektrotermiczne modele sterowników i regulatorów impulsowych dla programu SPICE
  - Sterowniki
    - Zarębski J., Górecki K.: The Electrothermal Macromodel of Voltage Mode PWM Controllers for SPICE. *Microelectronics Journal*, Elsevier, Vol.37, 2006, No. 8, pp. 728-734.
    - Zarębski J., Górecki K.: SPICE-Aided Modelling of the UC3842 Current Mode PWM Controller with Selfheating Taken into Account. *Microelectronics Reliability*, Vol. 47, No. 7, 2007, pp. 1145-1152.
    - Górecki K., Zarębski J.: The Electrothermal Macromodel of ZCS Resonant Converter Controllers for SPICE. *Informacije MIDEM*, Vol. 36, No. 1, 2006, pp. 31-36.
    - Górecki K., Zarębski J.: Modelling the UCC3800 controller in SPICE with the electrothermal phenomena taken into account. *International Journal of Numerical Modelling Electronic Network, Devices and Fields*, Vol. 25, No. 4, 2012, pp. 317-324.
  - Regulatory impulsowe
    - Górecki K.: Electrothermal compact model of CoolSET voltage regulators for SPICE. *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, Vol. 20, No. 4, 2007, pp. 181 – 195.
    - Zarębski J., Górecki K.: A SPICE Electrothermal Model of the Selected Class of Monolithic Switching Regulators. *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 23, No. 2, 2008, pp. 1023 – 1026.
    - Zarębski J., Górecki K.: Electrothermal Compact Macromodel of Monolithic Switching Voltage Regulator MC34063A. *Microelectronics Reliability*, Vol. 48, No. 10, 2008, pp. 1703-1710.
    - Górecki K.: The electrothermal macromodel of switching voltage regulators from L4970 family. *International Journal of Numerical Modelling Electronic Networks, Devices and Fields*, Vol. 21, No. 6, 2008, pp. 455-473.

Elektrotermiczny model sterownika

- model sterownika PWM o sprzężeniu prądowym – UC3842

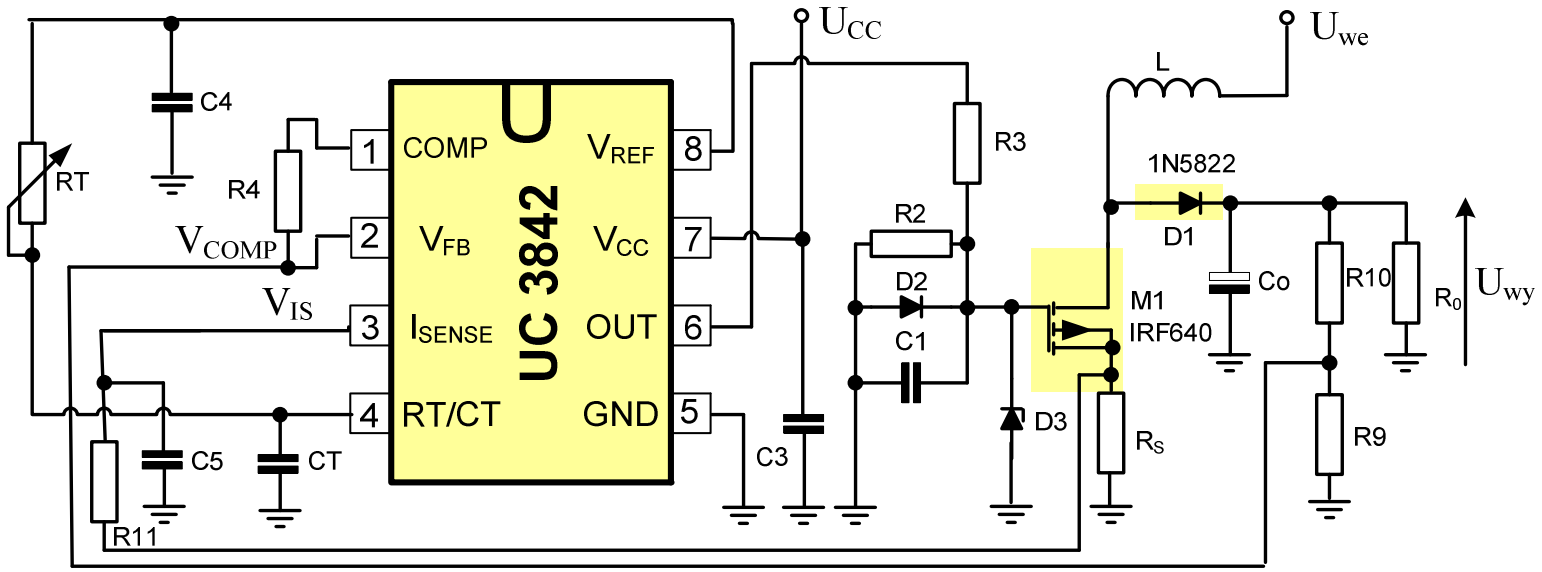


- W modelu uwzględniono:
  - wszystkie wyprowadzenia sterownika,
  - wpływ temperatury na charakterystyki poszczególnych bloków
  - ograniczoną wydajność prądową wzmacniacza błędu
  - pobór prądu przez bloki sygnałowe
  - zjawisko samonagrzewania
  - nieliniowe modele elementów półprzewodnikowych

Górecki K., Zarębski J.: Modeling Nonisothermal Characteristics of Switch-Mode Voltage Regulators. *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 23, No. 4, 2008, pp. 1848 – 1858.

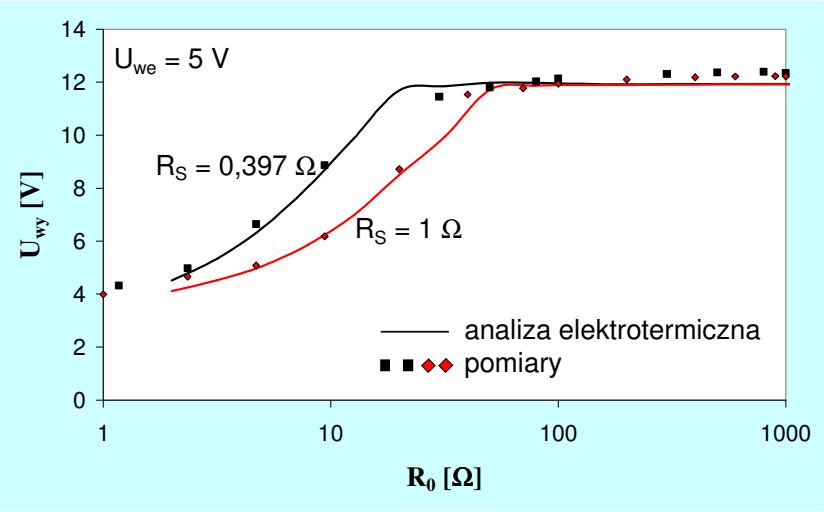
Wyniki obliczeń i pomiarów (1)

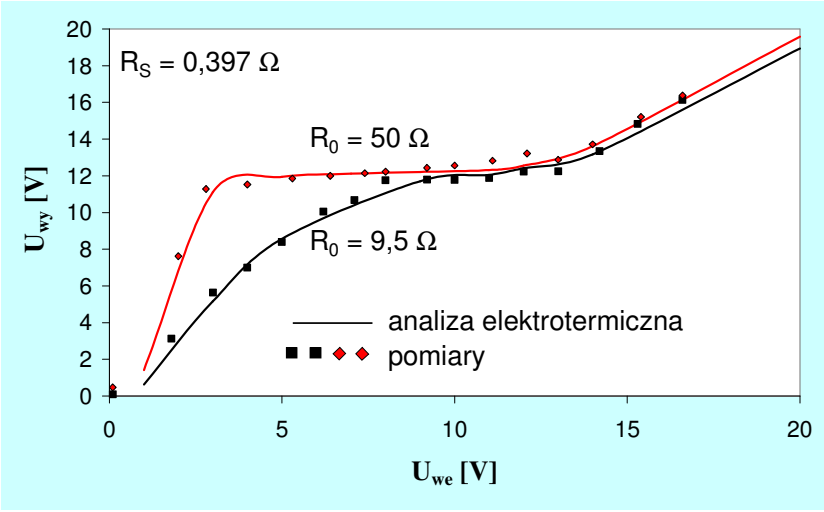
- Badany stabilizator



Wyniki obliczeń i pomiarów (2)

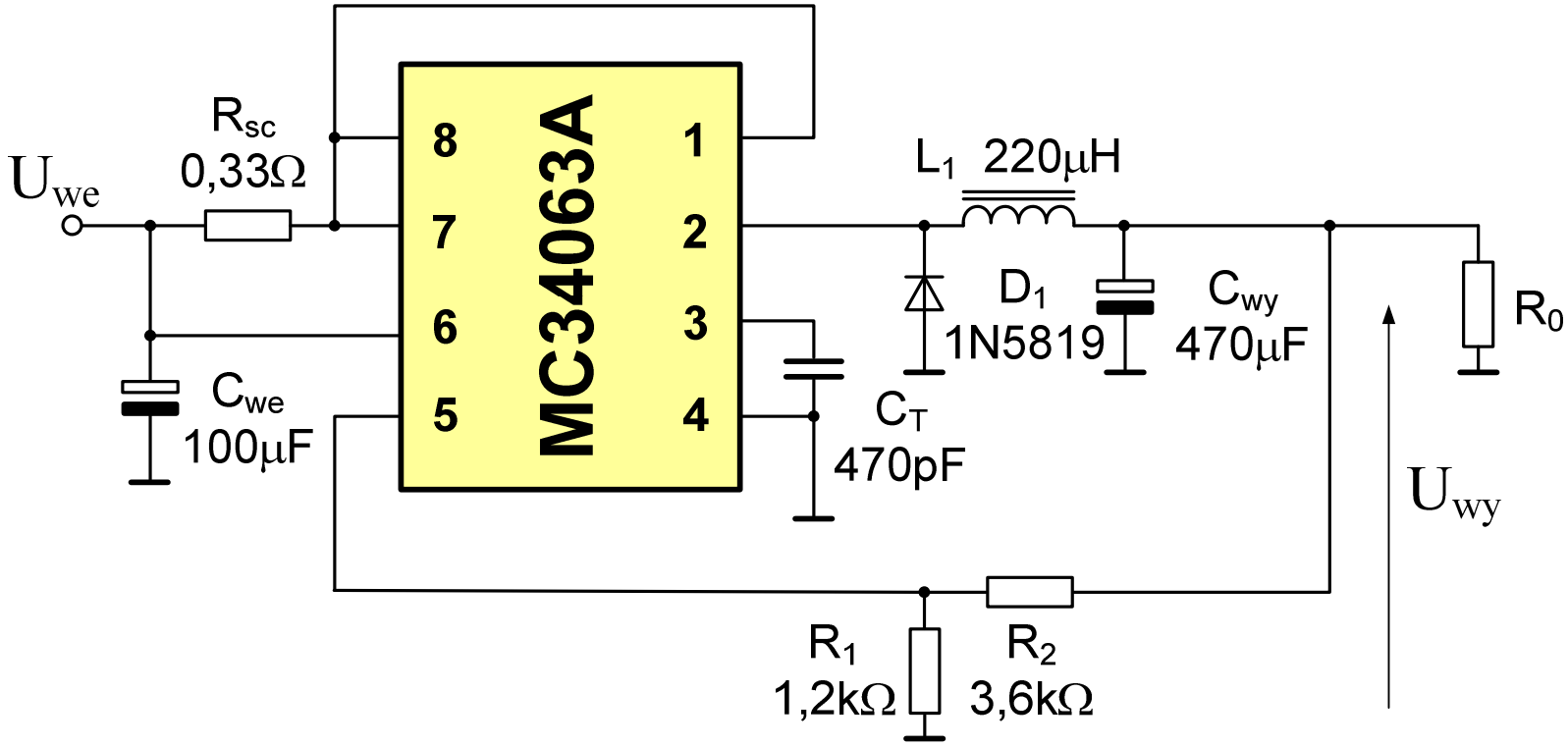
- Charakterystyki nieizotermiczne





Wyniki obliczeń i pomiarów (3)

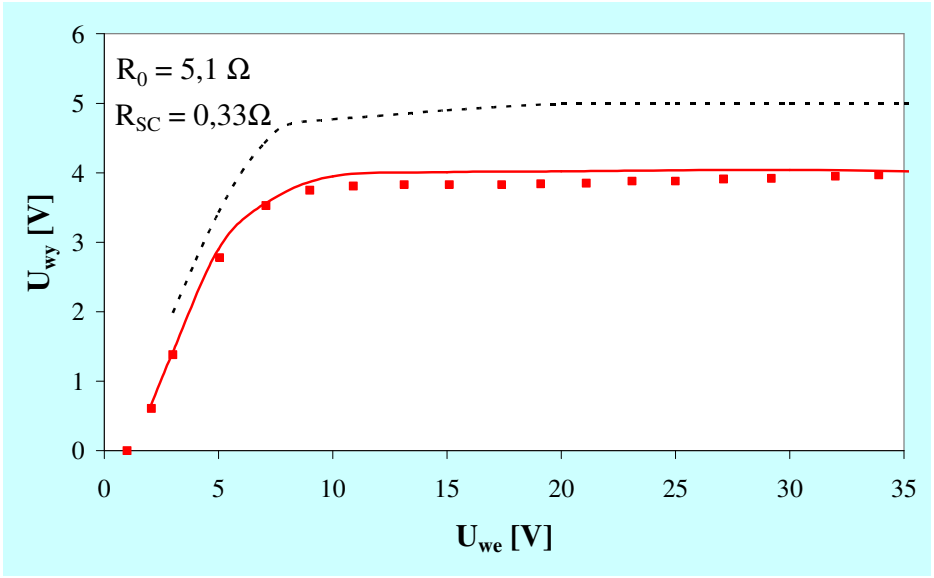
- Badany stabilizator

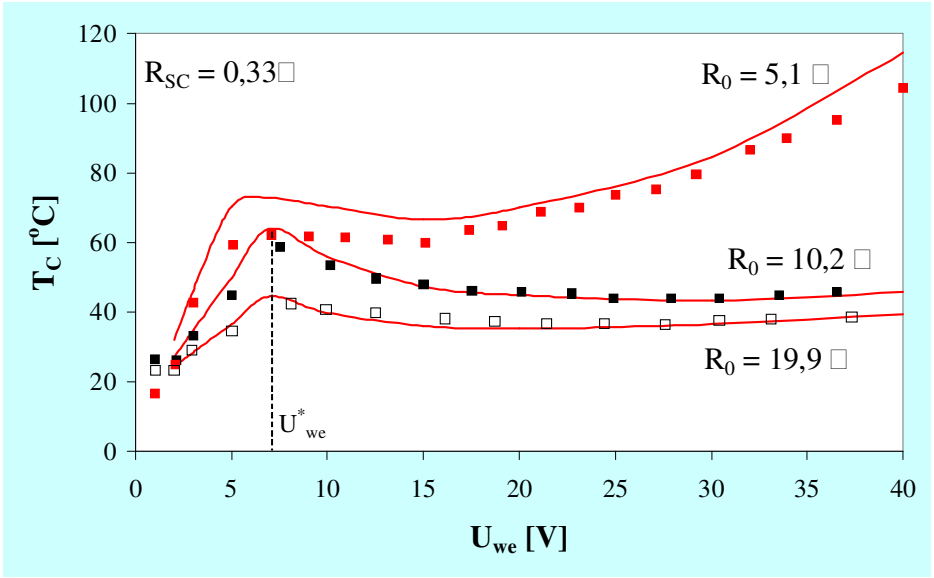


Zarębski J., Górecki K.: Electrothermal Compact Macromodel of Monolithic Switching Voltage Regulator MC34063A. *Microelectronics Reliability*, Vol. 48, No. 10, 2008, pp. 1703-1710.

Wyniki obliczeń i pomiarów (4)

- Charakterystyki nieizotermiczne





analiza izotermiczna — analiza elektrotermiczna □■□ pomiar

Podsumowanie

- Uzyskane wyniki obliczeń i pomiarów dowodzą, że :
  - pod wpływem samonagrzewania:
    - wartość napięcia wyjściowego przetwornic dławikowych może zmienić się o kilkadziesiąt procent, a nawet może nastąpić zmiana kształtu charakterystyk rozważanych przetwornic,
    - Maleje sprawność energetyczna
  - Wpływ samonagrzewania w elementach półprzewodnikowych na charakterystyki przetwornic dc-dc jest najsilniej widoczny w układach o małej wartości napięcia wyjściowego i dużej wartości prądu wyjściowego,
- Zaproponowany sposób formułowania elektrotermicznych makromodeli układów scalonych stosowanych w stabilizatorach impulsowych jest uniwersalny i można przy jego wykorzystaniu opracować makromodel dowolnego sterownika lub regulatora impulsowego,
- Opracowane metody analizy umożliwiają wyznaczenie nieizotermicznych charakterystyk przetwornic dc-dc w stanie ustalonym przy akceptowalnym czasie trwania obliczeń i zadowalającej dokładności,
- Opracowane modele i algorytmy mogą być przydatne dla projektantów rozważanej klasy układów elektronicznych, umożliwiając skrócenie czasu projektowania takich układów,
- Obecnie trwają badania wpływu elementów indukcyjnych na właściwości rozważanej klasy układów.