



# Laboratorijsko testiranje značajki litij-ionskih baterija

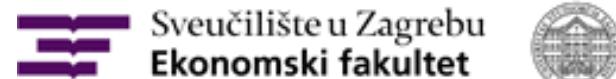
Vedran Bobanac  
Fakultet elektrotehnike i računarstva (FER)

Završna diseminacija projekta EV BASS

FER, Zagreb, 27. rujna 2018

# O projektu EVBASS

- Financira Hrvatska zaklada za znanost
- Budžet 748 tisuća kn
- Pridruženi partneri:
  - Sveučilište Aalborg
  - HEP Operator distribucijskog sustava
  - Ekonomski fakultet, Zagreb
- Listopad 2015 – rujan 2018



# Sadržaj prezentacije

- Pretvarač – razvijen na FER-u
- Karakteristike baterija
- Laboratorijsko testiranje litij-ionskih baterija
  - Svi prikazani grafovi dobiveni su vlastitim eksperimentima
- Praktične demonstracije

# Motivacija

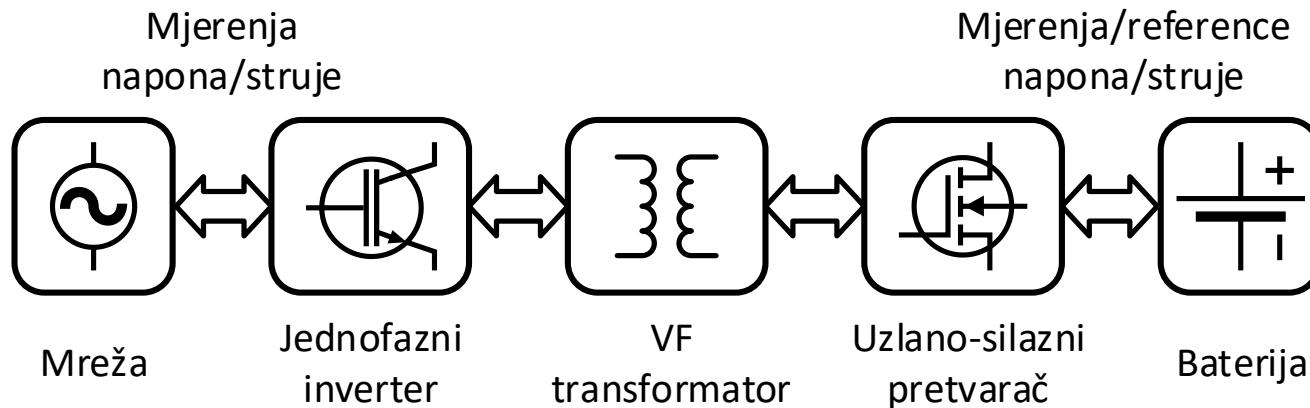
- Stanice za izmjenu baterija el. vozila – upravljaju velikim brojem baterija u različitim režimima (G2B, B2G, B2B) → važnost razumijevanja karakteristika baterija
- Potencijalna primjena na:
  - Punionice el. vozila
  - Pohrana energije
  - itd.

# Pretvarač (1)

- Po mjeri napravljen dvosmjerni AC/DC pretvarač za testiranje baterija
- Specifikacije:
  - Nazivna izlazna snaga: 1 kW
  - Izlazni napon: 0 - 20 V DC
  - Izlazna struja: -50 do 50 A DC
  - Ulaz: 50 Hz, 230 V AC
  - Ulazno/izlazna mjerena struje/napona
    - Analogni signali 0 – 10 V DC
    - Digitalni signali: izolirani USB ili RS-485
  - Udaljeno mjerjenje napona baterije (povećana točnost)

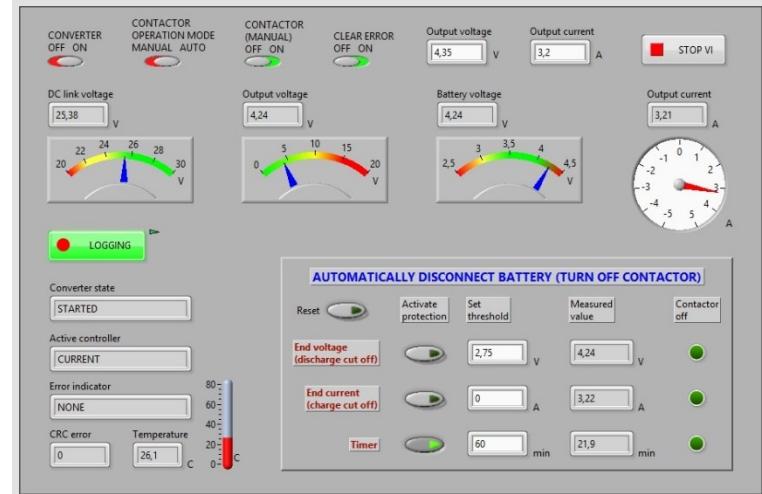
# Pretvarač (2)

- Trodijelna topologija:
  - Dvosmjerni mrežni inverter
  - Rezonantni visoko-frekvencijski transformator
  - Izlazni dvosmjerni uzlazni-silazni pretvarač

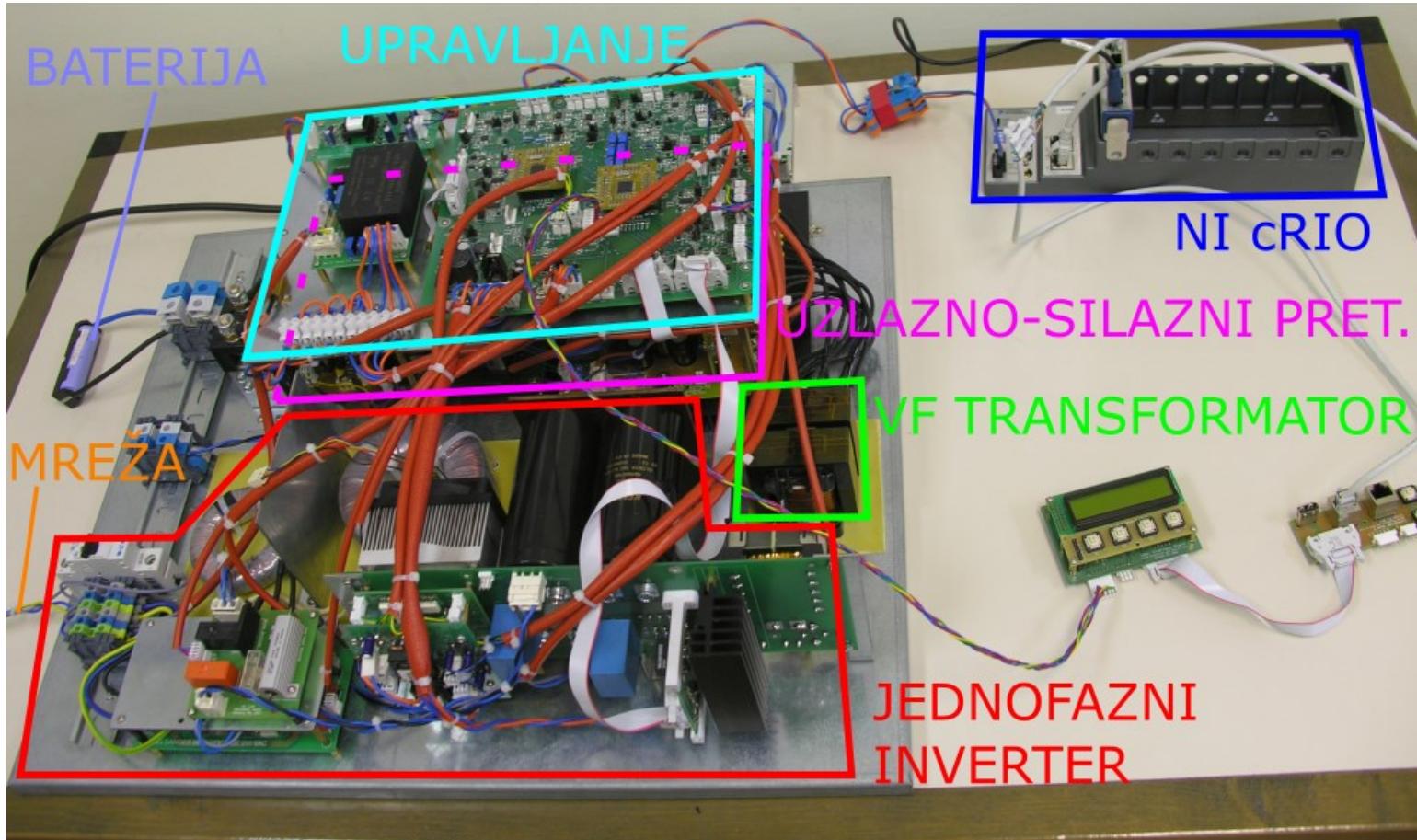


# Pretvarač (3)

- Komunikacija i upravljanje – NI LabVIEW
- Pretvarač je spojen na osobno računalo
  - Komunikacija – NI cRIO preko Etherneta
  - SCADA – NI LabVIEW



# Pretvarač (4)



# Punjive baterije (1)

- Najraširenije tehnologije:
  - Olovne baterije
  - Baterije na bazi nikla
    - Nikal-kadmij (NiCd)
    - Nikal-metal-hidrid (NiMH)
  - Litij-ionske baterije



# Punjive baterije (2)

- Glavne karakteristike: napon i kapacitet
- Kapacitet: amper-sati (Ah) ili vat-sati (Wh)
  - Npr. baterija od 10 Ah teoretski isporučuje:
    - Struju od 10 A u trajanju od 1 sata
    - Struju od 5 A u trajanju od 2 sata
  - Kapacitet se smanjuje s vremenom i korištenjem
- C-razina (*engl. C-rate*) = brzina punjenja/praznjenja baterije
  - 1C odgovara nazivnoj vrijednosti amper-sati (Ah), npr.:
    - 1C za bateriju od 10 Ah = 10 A
    - 2C za bateriju od 10 Ah = 20 A
    - 0.5C za bateriju od 10 Ah = 5 A

# Laboratorijsko testiranje

- Litij-ionski članci: 18650

- Tesla model S
- Laptop computers
- Power tools, etc.



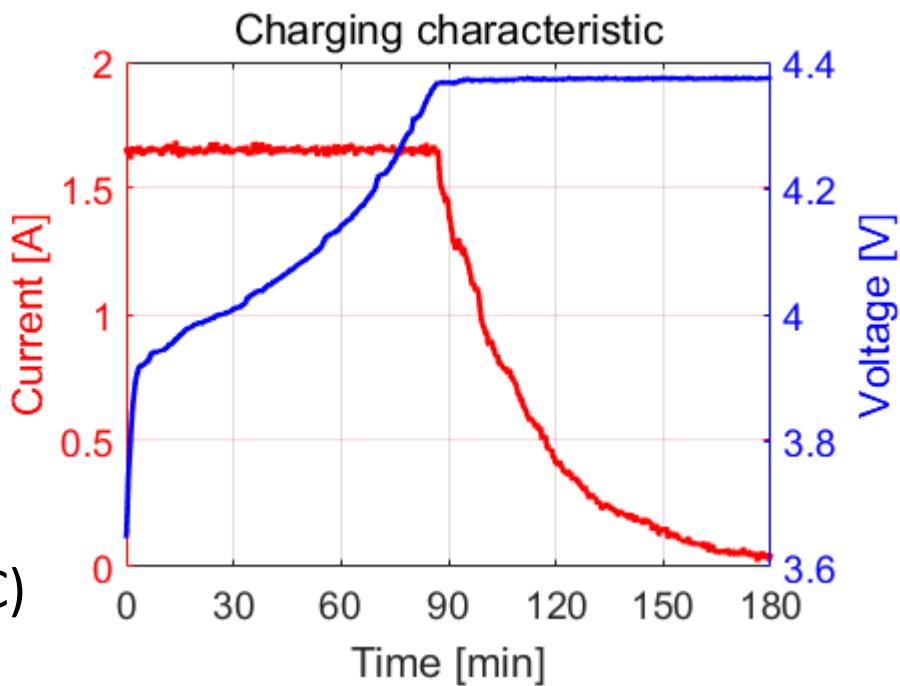
- Samsung ICR18650-32A

- Tehnologija: Litij-kobalt-oksid ( $\text{LiCoO}_2$ ) – LCO ili ICR
- Nazivni napon: 3.75 V
- Nazivni kapacitet: 3.2 Ah
- Minimalni kapacitet: 3.1 Ah

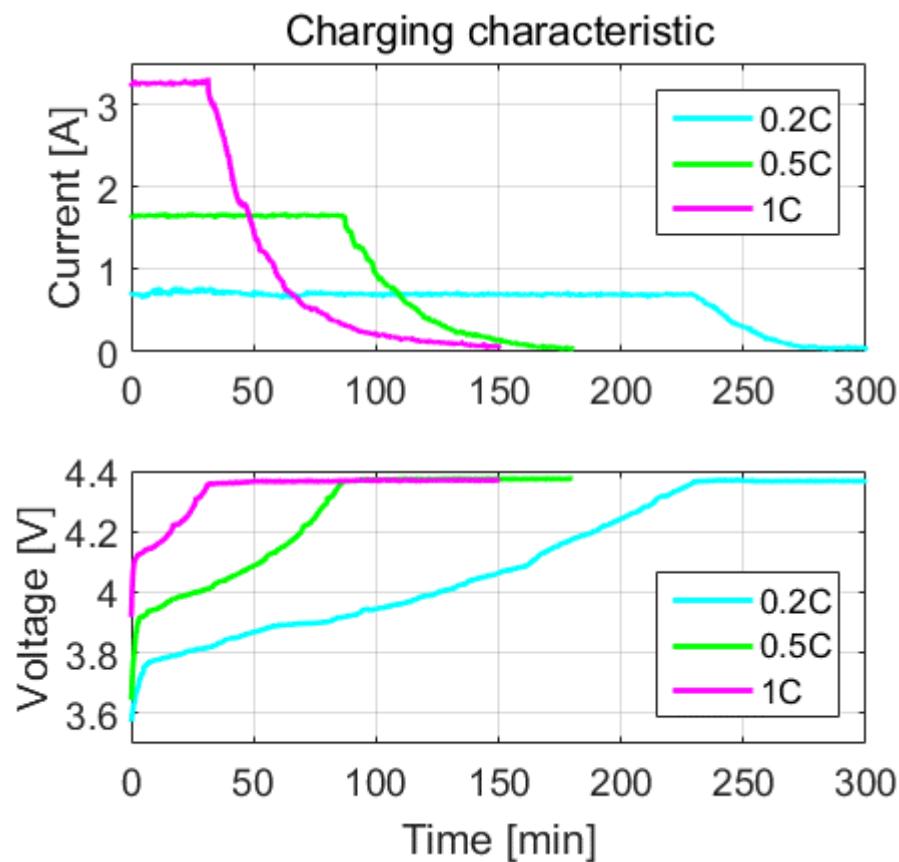


# Punjjenje baterija (1)

- Punjenje konstatnom strujom i konstatnim naponom – CC/CV karakteristika (*engl. Constant Current Constant Voltage*)
- Prilagodljivi parametri:
  - Konstantna struja punjenja
  - Napon punjenja
  - Struja kraja punjenja (*engl. cut-off current*)
- Parametri punjenja:
  - Konstatna struja: 1.6 A (0.5C)
  - Napon punjenja: 4.35 V
  - Trajanje: 180 min



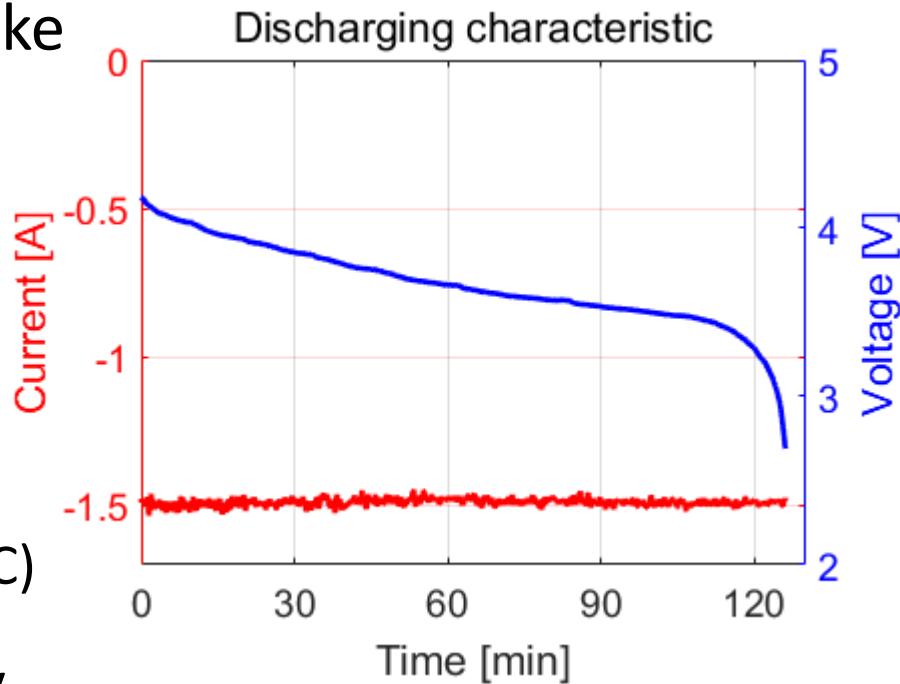
# Punjjenje baterija (2)



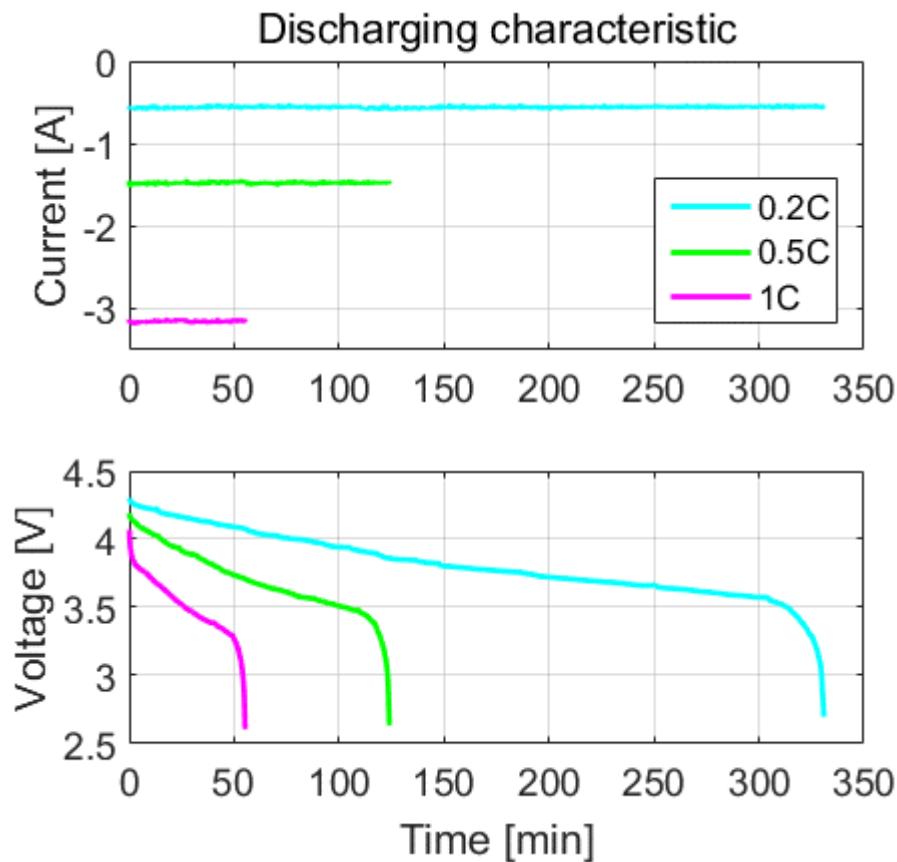
Demo (3)

# Pražnjenje baterija (1)

- Profil struje pražnjenja ovisi o primjeni
  - Promjenjiva struja – praktične primjene
  - Konstantna struja – laboratorij
- Trajanje pražnjenja je otprilike konzistentno sa C-razinom
  - $0.5C$  – cca. 2 hours
  - $1C$  – cca. 1 hour
  - $2C$  – cca. 30 minutes
- Parametri pražnjenja:
  - Konstantna struja: 1.6 A ( $0.5C$ )
  - Napon kraja pražnjenja (*engl. cut-off voltage*): 2.75 V



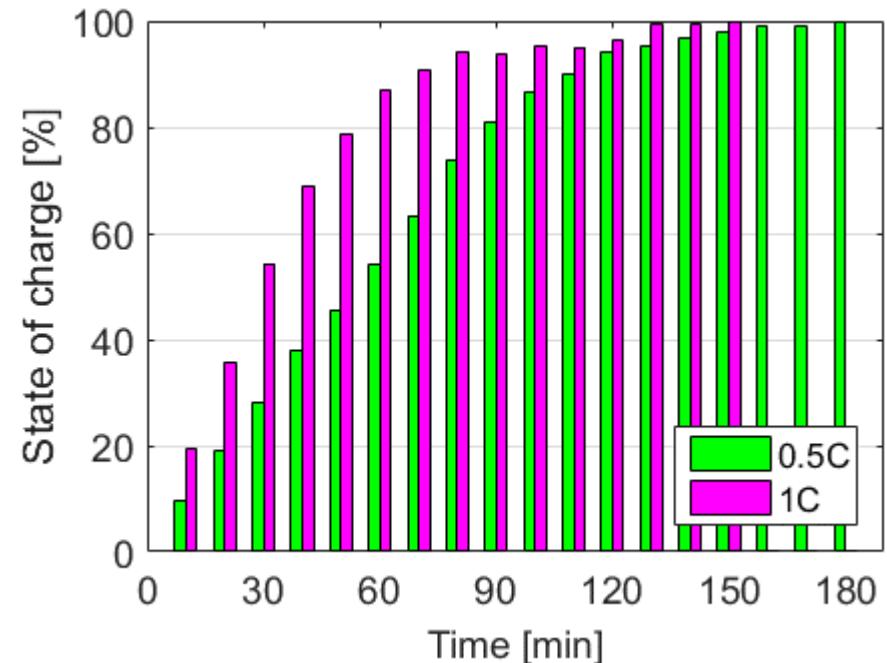
# Pražnjenje baterija (2)



Demo (3)

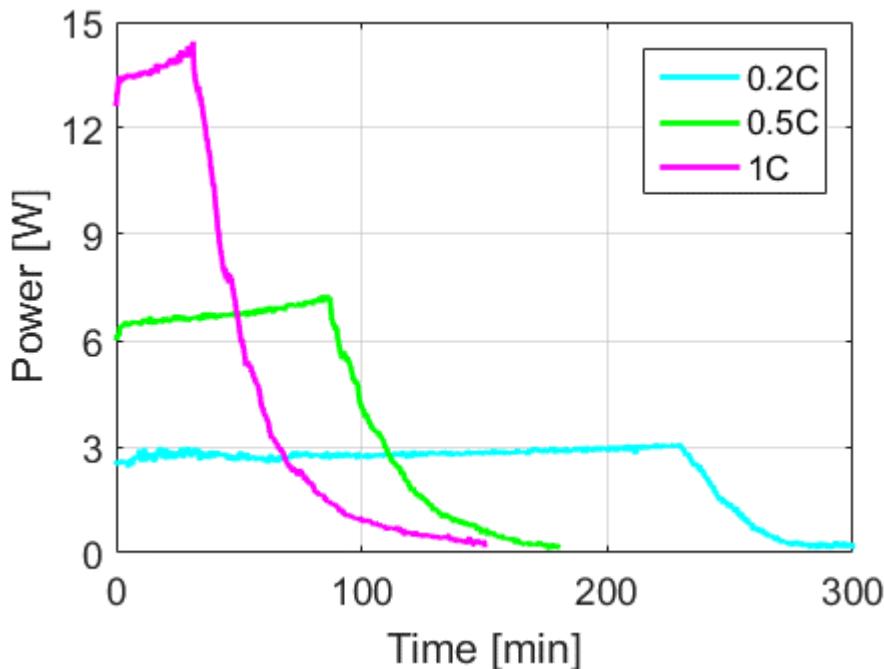
# Stanje napunjenosti (SoC)

- *Engl. State-of-Charge (SoC)*
- Stanje napunjenosti mjereno u ovisnosti o trajanju punjenja potpuno prazne baterije
- Niz parcijalnih punjenja (koraci od 10 min) praćeni potpunim pražnjenjem
- $SoC = \frac{100}{C} \int_0^T I(\tau) d\tau$
- Punjenje:
  - 0.5C (1.6 A)
  - 1C (3.2 A)
- Pražnjenje:
  - 0.5C (1.6 A) – oba slučaja

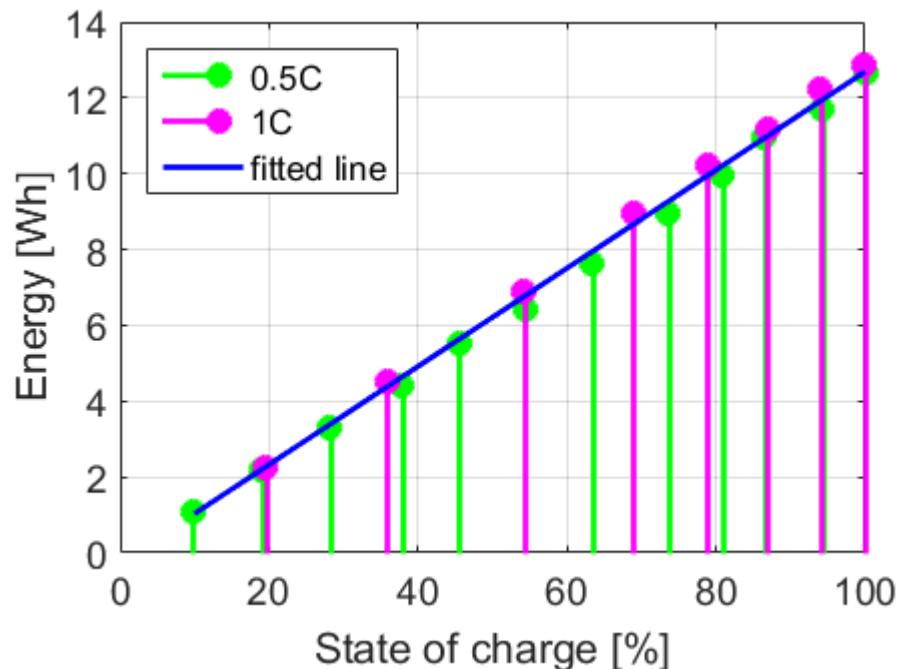


# Snaga i energija punjenja

- Karakteristika el. snage tijekom potpunog punjenja (0%-100% SoC)
- $P = U \cdot I$

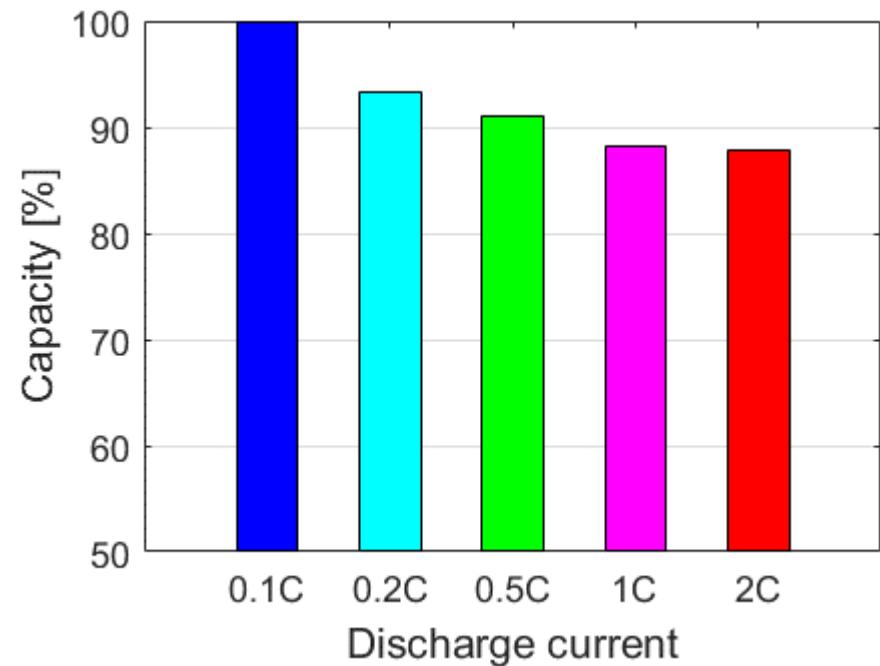


- El. energija:  $E = \int_0^t P(\tau)d\tau$
- Energija punjenja (0%-100%): 12.6 Wh (0.5C), 12.9 Wh (1C)



# Kapacitet

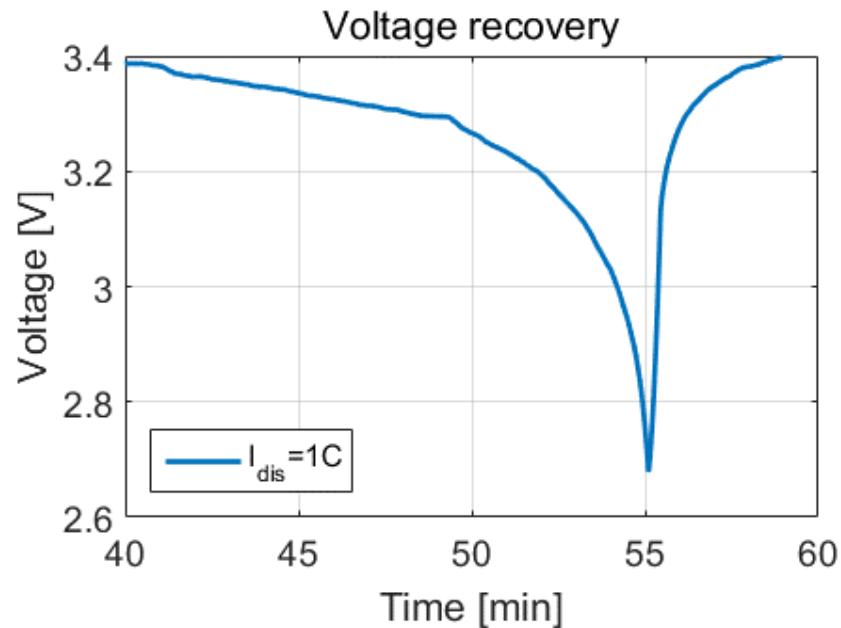
- Maksimalni broj amper-sati (Ah) koji se može dobiti iz baterije tijekom jednog pražnjenja
- $C = \int_0^T I(\tau)d\tau$
- 100% kapaciteta = 3.3 Ah
- Veća struja pražnjenja = manji kapacitet
- Peukert-ov zakon – primjenjiv uglavnom na olovne baterije



# Efekt oporavka kapaciteta

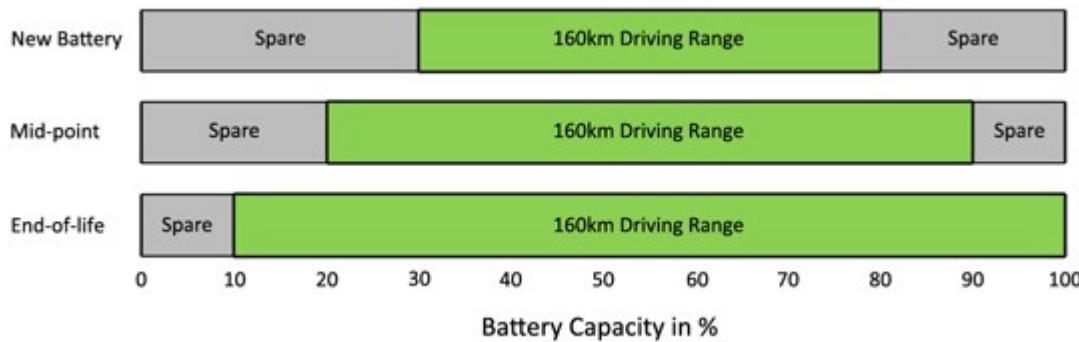
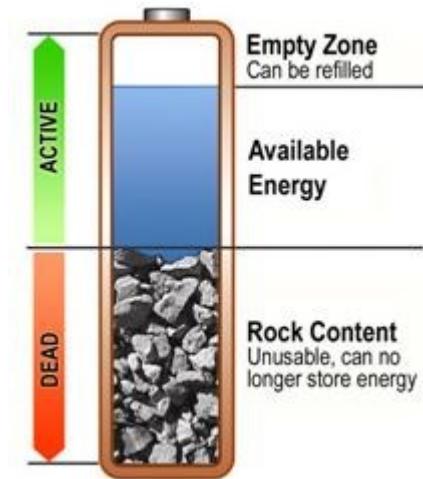
Demo (2)

- *Engl. rate capacity effect*
- Kraj pražnjenja – predefinirana donja granica napona
- Period mirovanja nakon kraja pražnjenja → oporavak napona → baterija se može dalje prazniti
- Ovaj efekt je izraženiji za visoke struje pražnjenja



# Efekt gubitka kapaciteta

- Sve baterije postepeno gube kapacitet s:
  - Korištenjem – cikliranje (punjenje/praznjenje)
  - Vremenom
- Specifikacije vrijede za novu i zdravu bateriju
- Uobičajeni kraj radnog vijeka: 80% inicijalnog kapaciteta
- Litij-ionske baterije tipično ostvaruju 300-1000 ciklusa



Izvor:  
[batteryuniversity.com](http://batteryuniversity.com)

# Unutrašnji otpor

- Svaka baterija ima unutrašnji otpor kao posljedicu:
  - Elektroda
  - Elektrolita
  - Spojeva, žica itd.
- Uzrokuje porast/pad napona kada se primjeni struja punjenja/praznjenja:
  - Ohmov zakon:  $U = I \cdot R$
- Napon otvorenog kruga (*engl. open circuit voltage, OCV*)  $\leftrightarrow$  nema toka struje
- Napon zatvorenog kruga (*engl. closed circuit voltage, CCV*)  $\leftrightarrow$  tok struje
  - Punjenje – podiže CCV
  - Pražnjenje – snižava CCV
  - "Efekt gumene trake"

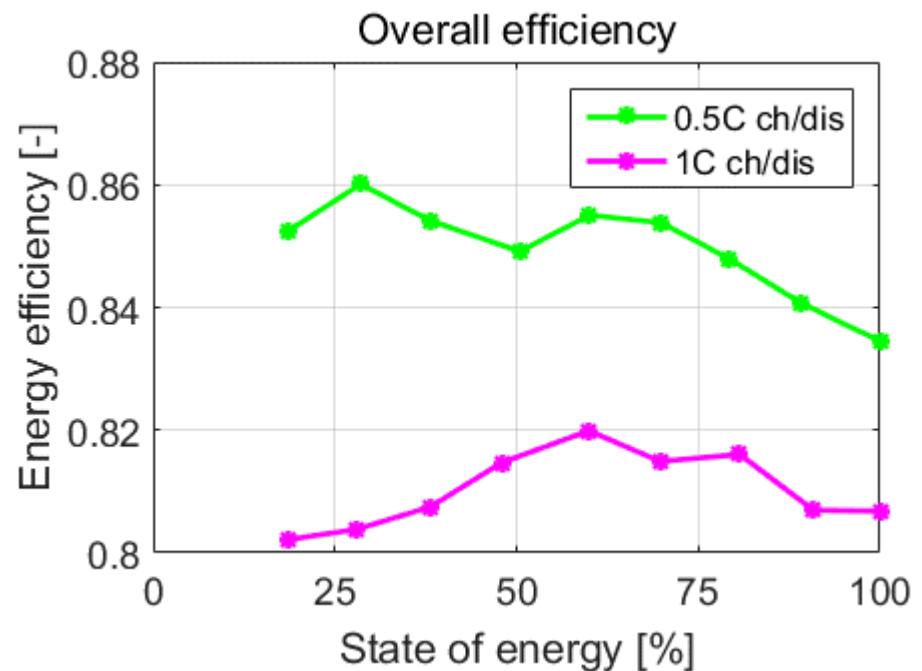
Demo (3)

# Efikasnost baterija (1)

- Uzrok gubitaka energije – unutarnji otpor  
→ disipacija topline
- Tipovi efikasnosti (1):
  - Kulonska (*engl. coulombic*)
  - Naponska
  - Energetska (uključuje kulonsku i naponsku)
- Tipovi efikasnosti (2):
  - Punjenje
  - Pražnjenje
  - Ukupno (punjenje + pražnjenje)

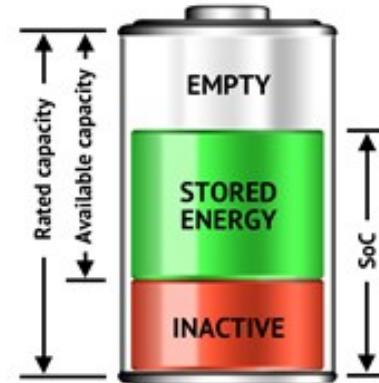
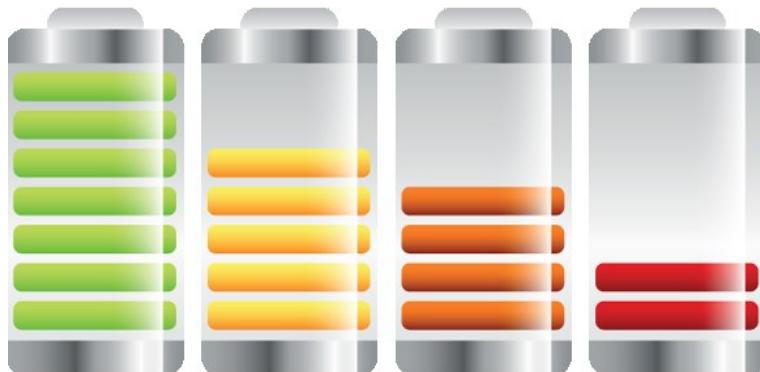
# Efikasnost baterija (2)

Efikasnost dominantno ovisi o struji punjenja/praznjenja



# Određivanje stanja napunjenoosti (1)

- Stanje napunjenoosti (%), (*engl. State-of-Charge, SoC*) = mjera za naboј pohranjen u bateriji
  - Puna baterija ima 100% SoC
  - Prazna baterija ima 0% SoC
- Određivanje stanja napunjenoosti nije trivijalno



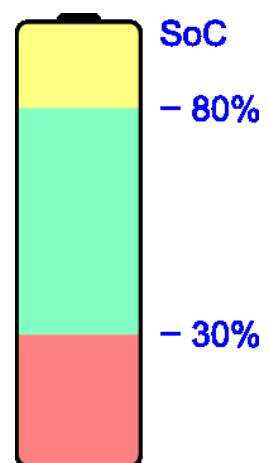
# Određivanje stanja napunjenoosti (2)

- Laboratorijska metoda – kontrolirano pražnjenje s mjerenjem amper-sati (Ah)
- Mjerenje napona otvorenog kruga (OCV)
- Mjerenje napona zatvorenog kruga (CCV)
- Brojanje kulona (*engl. coulomb counting*)
  - $SoC(t) = SoC(t - 1) + \frac{100}{c} \int_{t-1}^t I(\tau) d\tau$
  - Osnova za većinu SoC algoritama
  - Problemi: pogreška mjerjenja struje, promjenjivi kapacitet i efikasnosti
  - Gubici se moraju uzeti u obzir

Demo

# Praktični savjeti

- Radni vijek baterije može se produžiti:
  - Izbjegavanjem visokih struja punjenja/praznjenja (C-razine)
  - Izbjegavanjem dubokih praznjenja
  - Držanjem baterija na umjerenim temperaturama
    - Osobito izbjegavati rad baterija na visokom stanju napunjenoosti (blizu 100%) i na visokim temperaturama
- Litij-ionske baterije
  - Najduže traju kada se koriste između 30% i 80% SoC
  - Treba ih pohranjivati djelomično napunjene na umjerenim temperaturama



# Zaključak

- Po mjeri napravljen dvosmjerni AC/DC pretvarač za testiranje baterija
- Testirane karakteristike litij-ionskih baterija:
  - Punjenje (CC-CV)
  - Pražnjenje
  - Snaga i energija
  - Kapacitet
  - Stanje napunjenoosti (SoC)
  - Unutrašnji otpor
  - Efikasnost
- Eksperimentalni rezultati mogu se primijeniti na:
  - Stanice za izmjenu baterija el. vozila
  - Punionice za el. vozila
  - Pohrana energije



Hvala na pažnji!