

# Estimation of Traction Drive Test Bench with Energy Storage System Operation in Regenerative Braking Mode

Genadijs Zaleskis (*Riga Technical University - RTU*), Viesturs Brazis (*RTU*)  
and Leonards Latkovskis (*Institute of Physical Energetics*)

**Keywords** – Electrical drive, energy storage, supercapacitor.

## I. INTRODUCTION

Feature of hybrid energy storage systems (ESS) (Fig. 1.) (f.v.) is the combination of different type storage devices. For ESS research the stationary test bench is necessary, because the full-scale experiments disturb the scheduled traffic, and therefore could be run only in the off-peak time or using special test tracks. Use of the laboratory test bench with power scale 3-5 kW allows to reduce number of real vehicle test runs. Besides, the high power and high voltage transport systems are unsafe and inconvenient for educational purposes and scientific research.

The main idea of the article is estimation of the traction drive test bench with ESS overall performance in the regenerative braking mode by means of Matlab/Simulink model [1]. Capacity of the used in the test bench supercapacitor is too high in relation to the traction power therefore in the article results of the ESS scaling are presented.

## II. TEST BENCH SCHEME AND PARAMETERS

### A. Test Bench Scheme and Motor Parameters

The tramcar drive is replaced by a traction drive model which contains an equivalent independent excitation DC motor.

The traction DC motor is mechanically coupled to the asynchronous machine which together with the frequency converter forms a load simulator [7]

### B. Hybrid Energy Storage System

The hybrid energy storage system of the test bench includes the supercapacitor Maxwell BMOD0063-P125-B01 with the 125 VDC rated voltage and capacity 63 F and the accumulator battery consisting of eight elements Panasonic LC-RA1212PG with the 12 VDC rated voltage of one element.

## III. TEST BENCH SCALING

### A. Traction Drive Model Scaling

The traction drive model scaling is made on the basis of Tatra T3M tramcar parameters (f.v.).

### B. ESS Scaling

The size of vehicle ESS may be determined by two parameters: energy capacity  $E_{ESS,vehicle}$  and power capability (at discharged state)  $P_{ESS,vehicle}$ . As the time scale used is 1:1 [7], the relevant bench ESS parameters are calculated as in (11) – (14) (f.v.).

If the minimum voltage is calculated at chosen  $I_{SC,max}$

$$V_{SC,min} = \frac{P_{ESS,bench}}{I_{SC,max}}, \quad (15)$$

then the maximum voltage is

$$V_{SC,max} = \sqrt{\frac{2 \cdot E_{ESS,bench}}{C} + V_{SC,min}^2}. \quad (16)$$

Calculated value  $V_{SC,max}$  should be less than maximum allowed voltage for supercapacitor bank.

## IV. ESS OPERATION IN REGENERATIVE BRAKING MODE

In the braking mode the traction drive of the vehicle operates as a generator. Energy  $E_{br}$  which is generated by the motor in this case [11] can be expressed as

$$E_{br} \approx K_l \cdot E_{Kinetic}, \quad (17)$$

where  $K_l$  is factor which depends on the internal losses of a vehicle, power auxiliaries etc.;  $E_{Kinetic}$  is the vehicle kinetic energy. The value of  $K_l$  varies in range 0.5-0.6.

## V. SIMULATION RESULTS

The Matlab/Simulink simulations is made in the overhead feeding mode at various initial voltages  $V_{SC,0}$  of the supercapacitor:  $V_{SCmin} < V_{SC,0} < V_{SCmax}$ ;  $V_{SC,0} < V_{SCmin}$ ;  $V_{SC,0} > V_{SCmax}$ . Acceleration, freewheeling and braking modes in time scale 1:1 were simulated. The most admissible armature current  $I_{arm} = 40$  A and power scale factor  $k_P = 85.5$  are used.

## VI. CONCLUSIONS

Correct operation of the test bench depends on the correct scaling therefore within this article scale factors are calculated, and working range of supercapacitor voltage is set.

Scaling of the energy storage system allows choosing optimum parameters for the supercapacitor to provide effective braking energy saving at minimum price and sizes.

According to scale, the working voltage range of the supercapacitor used in experiments is calculated.

In the case when value of the supercapacitor initial voltage is in working range limits, the energy storage system allows the braking energy saving and partial providing the traction motor with energy in the acceleration mode.

It is necessary to consider possible decrease in ESS effectiveness if initial voltage of the supercapacitor is too close to the working range limits.

## REFERENCES

- [1] V. Brazis, G. Zaleskis, L. Latkovskis, L. Grigans, U. Sirmelis: Simulation of Light Railway Traction Drive with Energy Storage System. Proceedings of the 52st Annual International Scientific Conference of Riga Technical University, Section "Power and Electrical Engineering", October 2011.
- [7] V. Brazis, G. Zaleskis, L. Latkovskis, L. Grigans: Traction Drive Load Simulator. Proceedings of the 52st Annual International Scientific Conference of Riga Technical University, Section "Power and Electrical Engineering", October 2011.
- [11] R. Barrero, J. Van Mierlo and X. Tackoen: Enhanced Energy Storage Systems for Improved On-Board Light Rail Vehicle Efficiency. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2008. – pp. 26-36.

# Vilces piedziņas laboratorijas stenda ar enerģijas uzkrājēju sistēmu darbības novērtēšana rekuperatīvās bremzēšanas režīmā

Genadijs Zaleskis (Riga Technical University - RTU), Viesturs Brazis (RTU)  
and Leonards Latkovskis (Institute of Physical Energetics)

**Atslēgvārdi (angl.)** – Electrical drive, energy storage, supercapacitor.

## I. IEVADS

Hibrīdo enerģijas uzkrājēju sistēmu (1. att., p.v.) pētīšanai ir nepieciešams stacionārais laboratorijas stends, jo pilna mēroga eksperimenti traucē saplānotu transporta kustību un tāpēc tos var veikt tikai ārpus sastrēgumstundām vai speciālos poligonos.

Šī raksta galvenā doma ir vilces piedziņas laboratorijas stenda ar enerģijas uzkrājēju sistēmu darbības efektivitāte rekuperatīvās bremzēšanas režīmā ar Matlab/Simulink modeļa [1] palīdzību. Stendā izmantotā superkondensatora kapacitāte ir pārāk liela salīdzinājumā ar vilces piedziņas jaudu, tāpēc šajā rakstā ir parādīti enerģijas uzkrājēju sistēmas mērogošanas rezultāti.

## II. LABORATORIJAS STENDA SHĒMA UN PARAMETRI

### A. Laboratorijas stenda shēma un dzinēja parametri

Tramvaja piedziņa ir aizvietota ar vilces piedziņas modeli, kas iekļauj ekvivalento neatkarīgas ierosmes līdzstrāvas dzinēju.

Vilces līdzstrāvas dzinējs ir mehāniski savienots ar asinhrono mašīnu, kas kopā ar frekvences pārveidotāju veido slodzes stimulatoru [7].

### B. Hibrīdā enerģijas uzkrājēju sistēma

Hibrīdā enerģijas uzkrājēju sistēma sastāv no superkondensatora Maxwell BMOD0063-P125-B01 ar nominālo spriegumu 125 VDC un kapacitāti 63 F un akumulatoru baterijas, kas sastāv no astoņiem Panasonic LC-RA1212PG tipa elementiem ar katra elementa nominālo spriegumu 12 VDC.

## III. LABORATORIJAS STENDA MĒROGOŠANA

### A. Vilces piedziņas modeļa mērogošana

Vilces piedziņas modeļa mērogošana tika izpildīta, pamatojoties uz tramvaja Tatra T3M parametriem (p.v.).

### B. Enerģijas uzkrājēju sistēmas mērogošana

Enerģijas uzkrājēju sistēmu raksturo divi parametri: enerģijas ietilpība  $E_{ESS,vehicle}$  un maksimālā jauda  $P_{ESS,vehicle}$ . Šie parametri tiek aprēķināti no (11) – (14) (p.v.).

Minimālais spriegums tiek aprēķināts pie izvēlētajā maksimālās strāvas  $I_{SC,max}$

$$V_{SC,min} = \frac{P_{ESS,bench}}{I_{SC,max}}, \quad (15)$$

bet maksimālais spriegums ir

$$V_{SC,max} = \sqrt{\frac{2 \cdot E_{ESS,bench}}{C} + V_{SC,min}^2}. \quad (16)$$

Aprēķinātai  $V_{SC,max}$  vērtībai jābūt mazākai nekā superkondensatora maksimāli pieļaujama spriegums.

## IV. ENERĢIJAS UZKRĀJĒJU SISTĒMAS DARBĪBA REKUPERATĪVĀS BREMZĒŠANAS REŽĪMĀ

Bremzēšanas režīmā transportlīdzekļa vilces dzinējs ģenerē enerģiju  $E_{br}$  [11], kas var tikt aprēķināta

$$E_{br} \approx K_1 \cdot E_{Kinetic}, \quad (17)$$

kur  $K_1$  – koeficients, kas ir atkarīgs no transportlīdzekļa iekšējiem zudumiem utt.;  $E_{Kinetic}$  – transportlīdzekļa kinētiskā enerģija.  $K_1$  vērtība mainās diapazonā 0.5-0.6.

## V. MODELĒŠANAS REZULTĀTI

Modelēšana Matlab/Simulink vidē tika izpildīta kontakttīkla barošanas režīmam pie dažādām superkondensatora sākotnējā sprieguma  $V_{SC,0}$  vērtībām:  $V_{SCmin} < V_{SC,0} < V_{SCmax}$ ;  $V_{SC,0} < V_{SCmin}$ ;  $V_{SC,0} > V_{SCmax}$ . Tika simulēti paātrinājuma, ieskrējiena un bremzēšanas režīmi laika mērogā 1:1. Tika izmantota maksimālā enkura strāvas vērtība  $I_{arm} = 40$  A un jaudas mēroga koeficients  $k_p = 85.5$ .

## VI. SECINĀJUMI

Laboratorijas stenda korekta darbība ir atkarīga no precīzas mērogošanas, tāpēc šajā rakstā tika aprēķināti mēroga koeficienti, kā arī uzdots superkondensatora sprieguma darba diapazons.

Enerģijas uzkrājēju sistēmas mērogošana nodrošina superkondensatora optimālo parametru izvēli, lai nodrošinātu efektīvu bremzēšanas enerģijas uzkrāšanu pie minimāliem izmēriem un cenām.

Gadījumā, ja superkondensatora sākotnējā sprieguma līmenis atrodas darba diapazonā, enerģijas uzkrājēju sistēma nodrošina bremzēšanas enerģijas uzkrāšanu un daļēju vilces dzinēja energoapgādi paātrinājuma režīmā.

Enerģijas uzkrājēju sistēmas efektivitāte var samazināties, ja superkondensatora sākotnējā sprieguma līmenis atrodas tuvu darba diapazona robežām.

## LITERATŪRA

- [1] V. Brazis, G. Zaleskis, L. Latkovskis, L. Grigans, U. Sirmelis: Simulation of Light Railway Traction Drive with Energy Storage System. Proceedings of the 52st Annual International Scientific Conference of Riga Technical University, Section "Power and Electrical Engineering", October 2011.
- [7] V. Brazis, G. Zaleskis, L. Latkovskis, L. Grigans: Traction Drive Load Simulator. Proceedings of the 52st Annual International Scientific Conference of Riga Technical University, Section "Power and Electrical Engineering", October 2011.
- [11] R. Barrero, J. Van Mierlo and X. Tackoen: Enhanced Energy Storage Systems for Improved On-Board Light Rail Vehicle Efficiency. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2008. – pp. 26-36.

# Оценка работы испытательного стенда тягового электропривода с системой накопителей энергии в режиме рекуперативного торможения

Genadijs Zaleskis (Riga Technical University - RTU), Viesturs Brazis (RTU)  
and Leonards Latkovskis (Institute of Physical Energetics)

**Ключевые слова (англ.)** – Electrical drive, energy storage, supercapacitor.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Для изучения гибридных систем накопителей энергии (Рис. 1., п.в.) необходим стационарный испытательный стенд, так как полномасштабные эксперименты нарушают запланированное движение транспорта и поэтому могут быть осуществлены только в непииковое время или на специальных полигонах.

Основная идея статьи заключена в расчёте эффективности работы испытательного стенда тягового привода с системой накопителей энергии в режиме рекуперативного торможения при помощи компьютерной модели [1]. Ёмкость использованного в стенде суперконденсатора слишком велика по сравнению с тяговой мощностью, поэтому в данной статье представлены результаты масштабирования системы накопителей энергии.

## II. СХЕМА И ПАРАМЕТРЫ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА

### A. Схема испытательного стенда и параметры двигателя

Привод трамвая заменён эквивалентным двигателем постоянного тока с независимым возбуждением, который механически соединён с асинхронным двигателем, который вместе с частотным преобразователем составляет симулятор нагрузки [7].

### B. Гибридная система накопителей энергии

Гибридная система накопителей энергии включает в себя суперконденсатор Maxwell BMOD0063-P125-B01 с номинальным напряжением 125 В и ёмкостью 63 Ф и аккумуляторную батарею, состоящую из восьми элементов Panasonic LC-RA1212PG с номинальным напряжением каждого элемента 12 В.

## III. МАСШТАБИРОВАНИЕ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА

### A. Масштабирование модели тягового привода

Масштабирование модели тягового привода выполнено на основе параметров трамвая Tatра ТЗМ (п.в.).

### B. Масштабирование системы накопителей

Система накопителей энергии характеризуется двумя параметрами: энергетическая ёмкость  $E_{ESS,vehicle}$  и максимальная мощность  $P_{ESS,vehicle}$ . Эти параметры вычисляются по формулам (11) – (14) (п.в.).

В свою очередь, минимальное и максимальное напряжения суперконденсатора  $V_{SC,min}$  и  $V_{SC,max}$  вычисляются при выбранном максимальном токе  $I_{SC,max}$  по формулам (15) и (16) (п.в.). Рассчитанное значение  $V_{SC,max}$  должно быть меньше максимально допустимого напряжения суперконденсатора.

## IV. РАБОТА СИСТЕМЫ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ В РЕЖИМЕ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТОРМОЖЕНИЯ

В режиме торможения тяговый двигатель транспортного средства генерирует энергию  $E_{br}$  [11], которая может быть выражена

$$E_{br} \approx K_1 \cdot E_{Kinetic}, \quad (17)$$

где  $K_1$  – коэффициент, который зависит от внутренних потерь транспортного средства и т.д.;  $E_{Kinetic}$  – кинетическая энергия транспортного средства. Значение  $K_1$  меняется в диапазоне 0.5-0.6.

## V. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Моделирование в среде Matlab/Simulink выполнено для режима питания от контактной сети при различных начальных напряжениях суперконденсатора  $V_{SC,0}$ :  $V_{SC,min} < V_{SC,0} < V_{SC,max}$ ;  $V_{SC,0} < V_{SC,min}$ ;  $V_{SC,0} > V_{SC,max}$ . Смоделированы режимы ускорения, выбега и торможения во временной шкале 1:1. Использовано максимально допустимое значение тока якоря  $I_{arm} = 40$  А и коэффициент масштаба мощности  $k_p = 85.5$ .

## VI. ВЫВОДЫ

Корректная работа стенда зависит от правильного масштабирования, поэтому в данной статье рассчитаны коэффициенты масштаба, а так же задан рабочий диапазон напряжений суперконденсатора.

Масштабирование системы накопителей энергии обеспечивает выбор оптимальных параметров для суперконденсатора, чтобы обеспечить эффективное накопление тормозной энергии при минимальных размерах и цене.

В случае, когда уровень начального напряжения суперконденсатора находится в пределах рабочего диапазона, система накопителей обеспечивает сохранение тормозной энергии и частичное снабжение тягового двигателя энергией в режиме ускорения.

Эффективность системы накопителей может снижаться, если начальное напряжение суперконденсатора находится слишком близко к границам рабочего диапазона.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] V. Brazis, G. Zaleskis, L. Latkovskis, L. Grigans, U. Sirmelis: Simulation of Light Railway Traction Drive with Energy Storage System. Proceedings of the 52st Annual International Scientific Conference of Riga Technical University, Section "Power and Electrical Engineering", October 2011.
- [7] V. Brazis, G. Zaleskis, L. Latkovskis, L. Grigans: Traction Drive Load Simulator. Proceedings of the 52st Annual International Scientific Conference of Riga Technical University, Section "Power and Electrical Engineering", October 2011.
- [11] R. Barrero, J. Van Mierlo and X. Tackoen: Enhanced Energy Storage Systems for Improved On-Board Light Rail Vehicle Efficiency. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2008. – pp. 26-36.