

УДК 621.34

**В.Н. Шамардина**, канд. техн. наук,  
**С.М. Лемешко**

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОПРИВОДА ГОРОДСКОГО АВТОБУСА С ГИБРИДНОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКОЙ

***Аннотация.** Исследован электропривод городского автобуса большой вместимости с гибридной силовой установкой и накопителем энергии из суперконденсаторных модулей. Сформулированы технические требования к основным компонентам тягового электропривода. Показана эффективность применения бортовых накопителей энергии. Исследованы переходные процессы электромеханических координат в программном пакете ADVISOR.*

**В. М. Шамардина**, канд. техн. наук,  
**С. М. Лемешко**

## ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОПРИВОДУ МІСЬКОГО АВТОБУСА З ГІБРИДНОЮ СИЛОВОЮ УСТАНОВКОЮ

***Анотація.** Досліджено електропривод міського автобуса великої місткості з гібридною силовою установкою і накопичувачем енергії на основі суперконденсаторних модулів. Сформульовано технічні вимоги до основних компонентів тягового електропривода. Показано ефективність застосування бортових накопичувачів енергії. Досліджено перехідні процеси електромеханічних координат з використанням програмного пакету ADVISOR.*

**V. M. Shamardina**, PhD,  
**S. M. Lemeshko**

## INVESTIGATION OF THE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE ACTUATOR CITY BUS WITH HYBRID POWER PLANT

***Abstract.** In the article the large urban hybrid bus with energy storage on the basis of ultracapacitor modules is researched. Technical requirements to the main components of the traction drive are formulated. The efficiency of the use of on-board energy storage is shown. The transient electromechanical coordinates in a software suite ADVISOR are researched.*

**Постановка проблемы.** В городском цикле движения при резкопеременном характере нагрузок, частых остановах и торможениях, двигатели внутреннего сгорания (ДВС) автобусов 70-90 % времени работают в неустановившихся режимах. Короткие пробеги чередуются с продолжительными остановками, работой дизеля на холостом ходу. При движении на пониженной скорости мощность ДВС используется неэкономично, с повышенным расходом топлива, выбросы в атмосферу угарного газа, других вредных веществ и твердых частиц превышают экологические нормы работы транспортных средств. Эти факторы определяют снижение эффективности работы традиционных энергетических установок автотранспортных средств (ТС) и экологической безопасности окружающей среды [2].

**Целью статьи** является исследование автобуса большой вместимости с двумя источниками энергии: дизель-генераторной установкой (ДГУ) и бортовым накопителем энергии (НЭ) на основе суперконденсаторных модулей (СКМ).

Совместное использование таких источников энергии позволяет:

– организовать работу ДВС в оптимальном по топливной эффективности режиме за счет снижения доли нестационарных режимов работы и удельного расхода топлива на 20-50 %;

– упростить механическую трансмиссию, исключив из нее коробку передач и карданный вал;

– сократить в 2-5 раз уровни выбросов вредных веществ за счет работы в ограниченном частотном диапазоне дизеля;

– рекуперировать электроэнергию при торможении, движении накатом и сбросе скорости с накоплением и дальнейшим ее использованием;

– использовать ДВС меньшей мощности (до 30 % по сравнению с традиционной схемой);

– повысить комфортность автобуса за счет обеспечения лучшей управляемости автобуса, снижения шума тягового оборудования и вибрации;

– повысить надежность и ресурс механической системы автобуса в целом.

Дизель-генераторная установка рассчитывается на длительную генерацию энергии относительно невысокого уровня, а также на движение в тяговом режиме при невозможности демпфирования перегрузок сил тяги автобуса электрическим накопителем энергии.

Выбор НЭ на базе СКМ:

– определяется число модулей НЭ, соединенных последовательно, исходя из требуемого напряжения и определенных в тягово-энергетическом расчете емкости и удельной энергии, необходимой для городского ездового цикла (рис.1);

– выбирается число параллельных ветвей СКМ с учетом значений зарядного тока СКМ в фазах торможения и движения под уклон с максимальным отбором тока НЭ, токово-температурных зависимостей, определяющих возможные превышения температуры СКМ, и экономической целесообразности.

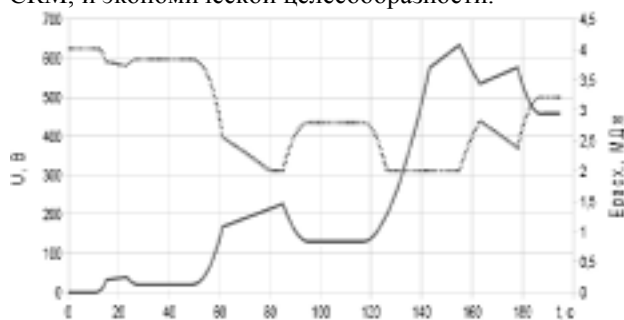


Рис.1. Диаграмма расходуемой энергии и напряжения НЭ

Тяговое усилие, требуемое при заданном цикле движения, кН:

$$\Sigma F = (m \cdot k_{пр} \cdot a + p \cdot C_x \cdot S_z \cdot (v/3,6)^2 / 2 + m \cdot k_{пр} \cdot g \cdot (f \cdot \cos \alpha + \sin \alpha)) / 1000. \quad (1)$$

Максимальная электрическая энергия, потребляемая в НЭ в фазе торможения автобуса, МДж:

$$A_{эл} = m \cdot k_{пр} \cdot (v/3,6)^2 / 1000 \cdot \eta_p \cdot \eta_{ТАД} \cdot \eta_{ТАИ}. \quad (2)$$

Требуемая емкость НЭ при разряде суперконденсаторных модулей до напряжения  $1/2U_d$ , Ф:

$$C_{НЭ} = 2 \cdot A_{эл} / (U_d)^2 / 0,75 \cdot 10^6. \quad (3)$$

Кинетическая энергия на ободе колеса в тягово-тормозных режимах, МДж:

в фазе разгона:

$$E_{кТ} = E_{кон\ пред. уч.} + P_{ТАД} \cdot \Delta t_{уч} \cdot \eta_p / 1000; \quad (4)$$

в фазе разгона при втором и третьем изменении ускорения (рис.2):

$$E_{кТ} = E_{кон\ пред. уч.} + E_{кон\ посл. \text{ № оп.}} + (P_{ТАД} + P_{МАХ}) \cdot \Delta t_{уч} \cdot \eta_p / 1000; \quad (5)$$

в фазе равномерного движения:

$$E_{к0} = E_{кон\ пред. уч.} + P_{ТАД} (F_c) \cdot \Delta t_{уч} \cdot \eta_p / 1000; \quad (6)$$

– в фазе торможения:

$$E_{кТр} = E_{кон\ пред. уч.} + (P_{ТАД} + P_{МАХ}) \cdot \Delta t_{уч} / \eta_p / 1000. \quad (7)$$

Напряжение на СКМ без учета питания со стороны

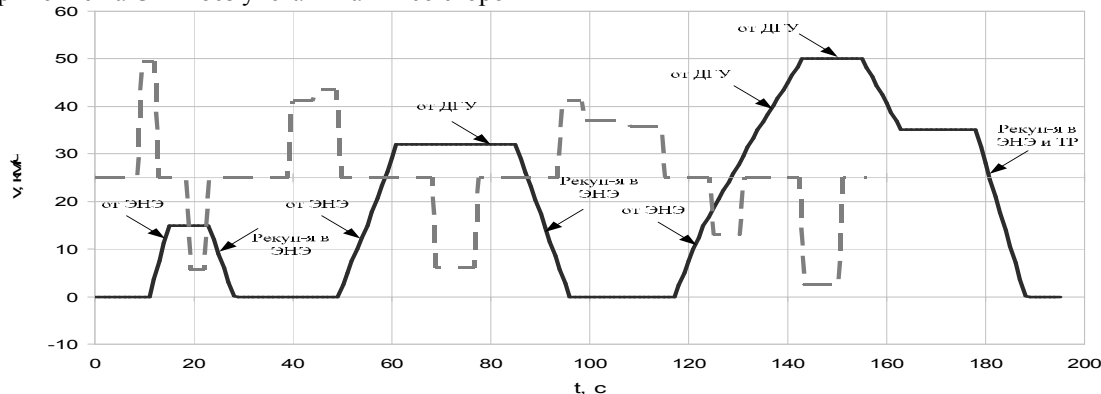


Рис.2. Ездовой цикл движения

ДГУ, В:

в фазах разгона и равномерного движения

$$U_{СКТ} = \sqrt{U_{СК\ пред.}^2 - \frac{2 \cdot \Delta E_k \cdot 10^6}{C_{СКМ} \cdot \eta_p \cdot \eta_{ТАД} \cdot \eta_{ТАИ}}}; \quad (8)$$

в фазе торможения

$$U_{СКТр} = \sqrt{U_{СК\ пред.}^2 + \frac{2 \cdot \Delta E_k \cdot 10^6}{C_{СКМ} \cdot \eta_p \cdot \eta_{ТАД} \cdot \eta_{ТАИ}}}. \quad (9)$$

Первая часть цикла характеризуется невысокой скоростью, её реализация осуществляется от СКМ. В фазе торможения происходит заряд НЭ. Во второй части цикла движение от НЭ происходит только в фазе разгона; при снижении напряжения НЭ до уровня  $1/2U_{ск}$  в фазе равномерного движения второй части городского цикла движение происходит от ДГУ. При этом ДВС работает по характеристике минимальных удельных расходов топлива. Рекуперация энергии происходит во всех фазах торможения. На третьем этапе городского цикла разгон до 35 км/ч происходит на НЭ, дальнейший разгон до 50 км/ч и равномерное движение осуществляется от ДГУ. В третьей части городского цикла при длительном замедлении часть тока рассеивается в блоке тормозных резисторов.

Для детального анализа электромеханических координат гибридного электропривода был использован программный инструмент ADVISOR, разработанный американской лабораторией NREL (National Renewable Energy Laboratory). Программное обеспечение позволяет измерять расход топлива, выброс вредных веществ, вычислять рабочие характеристики для компонентов трансмиссии, производить выбор параметров компонентов комбинированной энергетической установки ТС, таких как электрические машины, тяговые аккумуляторные батареи, суперконденсаторы, ДВС, топливные элементы (рис.3).

На рис. 4 представлены переходные процессы в тяговом генераторе, двигателе и НЭ при движении в европейском ездовом цикле.

**Вывод.** Проведение тягово-энергетических расчетов в условиях городских ездовых циклов движения позволили исследовать процессы энергопреобразования, осуществить выбор компонентов тягового электропривода автобуса. Программное расширение ADVISOR позволило осуществить детальный анализ электромеханических параметров гибридного электропривода последовательного типа.

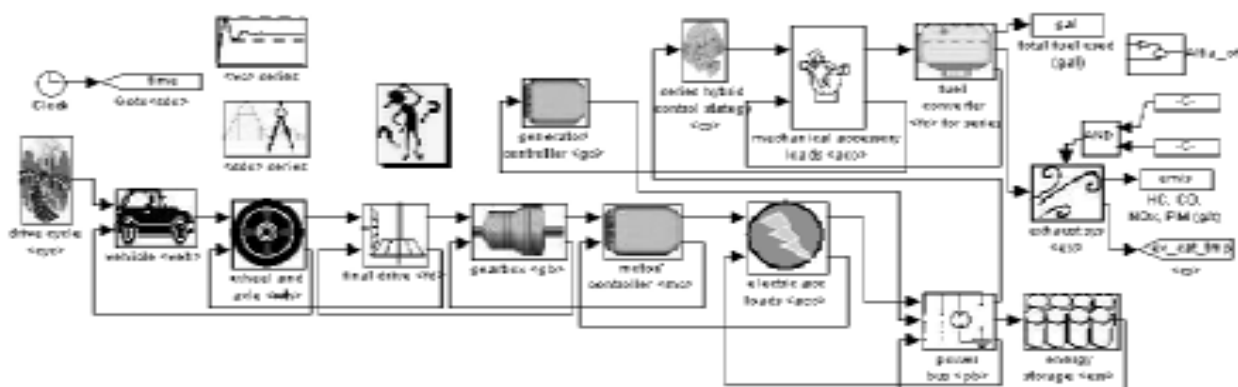


Рис. 3. Модель гибридного автобуса с электроприводом последовательного типа в пакете Simulink

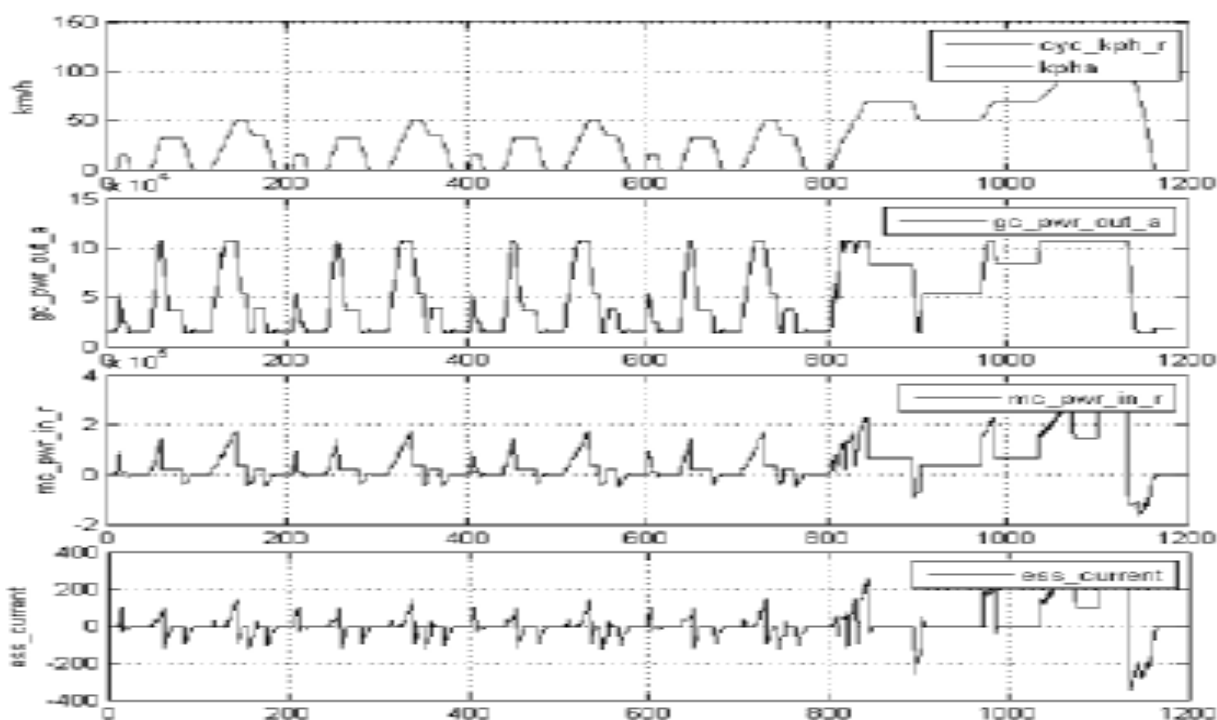


Рис.4. Графики скорости, мощности тягового генератора и двигателя, зарядно-разрядного тока НЭ в пакете ADVISOR

Список использованной литературы

1. Богдан Н.В. Троллейбус. Теория, конструирование, расчет / Н.В. Богдан, Ю.Е. Атаманов, А.И. Сафонов. – Мн.: Ураджай, 1999. – 346 с.
2. Флоренцев С.Н. Экономичный экологичный городской гибридный автобус. / С.Н. Флоренцев, Л. Макаров, В. Менухов // *Электронные компоненты*. – 2008. – № 12. – С. 24-39.

Получено 19.07.2011



Шамардина Вера Николаевна,  
 канд. техн. наук,  
 Нац.техн.ун-та “ХПИ”,  
 г. Харьков, ул. Фрунзе, 21  
 к.т.: (057) 7076974  
 shamardina@kpi.kharkov.ua



Лемешко Сергей Михайлович,  
 аспирант каф. “АЭМС” НТУ  
 “ХПИ”, г. Харьков, ул.  
 Фрунзе, 21.  
 e-mail: sergii.lemeshko@i.ua  
 к.т.: (066) 361-85-88.