

УДК 621.311.62

СИСТЕМА СТУПЕНЕВОГО ЗАРЯДУ ЄМНІСНИХ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ МАГНІТНО-ІМПУЛЬСНОЇ УСТАНОВКИ

О.С. Сабокар аспірант ХНАДУ

Анотація. У статті проведено аналіз існуючих систем заряду ємнісних накопичувачів магнітно-імпульсних установок. Запропоновано схемне рішення по удосконаленню зарядного пристрою з метою зниження загальної собівартості установки, а також зменшення масогабаритних показників. Розглянуто математичну модель запропонованої системи, наведено її рішення, яке було перевірено на предмет відповідності до дійсних перехідних процесів отриманих експериментальним шляхом. Дано приблизні оцінки при можливому проектуванні магнітно-імпульсної установки.

Ключові слова: ступеневий заряд, силовий напівпровідник, ємнісний накопичувач, магнітно-імпульсна установка.

STEP CHARGED SYSTEM OF THE CAPACITIVE STORAGE FOR THE MAGNETIC PULSE SYSTEM

O.S. Sabokar post graduate student KhNAHU

Abstract. The existing charging systems of the capacitive storage for the magnetic - pulse plants were analyzed at this article. The alternative schematic decision that provides improving of the systems charged by its overall cost reducing and its weight and size reducing was proposed. A mathematical model of the system proposed was given. Its solving, was checked to compliance with the actual process transients that had been obtained experimentally. Numerical estimate, that could be used as recommendations for a possible design of magnetic-pulse plant were proposed.

Key words: step charged, power semiconductor, capacitive storage, magnetic pulse plant.

СИСТЕМА СТУПЕНЧАТОГО ЗАРЯДА ЕМКОСТНЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ УСТАНОВКИ

О.С. Сабокар аспірант ХНАДУ

Аннотация. В статье приведен анализ существующих систем заряда емкостных накопителей магнитно-импульсных установок. Предложено схемное решение по усовершенствованию зарядного устройства с целью снижения общей себестоимости установки, а так же уменьшения массогабаритных показателей. Рассмотрена математическая модель предлагаемой системы, приведено ее решение, которое было проверено на предмет соответствия с действительными переходными процессами полученными экспериментальным путем. Даны приблизительные оценки при возможном проектировании магнитно-импульсной установки

Ключевые слова: ступенчатый заряд, силовой полупроводник, емкостной накопитель, магнитно-импульсная установка.

Введение

Зарядные устройства находят широкое применение в качестве структурной составляющей электрических аппаратов, содержащих

узел накопления электрической энергии (импульсные магнитные системы, системы магнитно-импульсной обработки металлов, аппараты точечной сварки). В большинстве случаев, накопители энергии представляют

собой батарею параллельно или последовательно соединенных емкостей [1,2].

Система заряда подразумевает под собой блок повышения или понижения напряжения и блок контроля заряда. Так как наиболее жесткие требования предъявляются к процессу заряда в магнитно-импульсных установках (МИУ) она была взята в качестве прототипа. Не смотря на различные конфигурации установок, их внутреннюю компоновку можно охарактеризовать тремя основными функциональными блоками, а именно: блок зарядного контура, блок емкостных накопителей энергии и блок разрядного контура, в состав которого включается собственно инструмент – индуктор.

В данной работе рассмотрено предложение по усовершенствованию контура заряда для МИУ с целью снижения массогабаритных характеристик и стоимости с сохранением требуемых выходных параметров заряда.

В основе предложенной схемы зарядной цепи емкостного накопителя лежит принцип последовательного ступенчатого заряда импульсами тока равной энергии. Напряжение заряда контролируется амплитудой тока заряда и количеством повторяющихся токовых импульсов.

Анализ существующих технических решений

Из наиболее распространенных, можно выделить систему, состоящую из повышающего одно или трехфазный трансформатора и выпрямительного блока. В комплексе с системой управления, зарядное устройство обеспечивает необходимый уровень напряжения емкостных накопителей за требуемый промежуток времени. Основные требования, которым должно отвечать зарядное устройство, заключаются в его возможности обеспечивать пиковые значения мощности, во много раз превышающие среднюю мощность, потребляемую из сети. Так, к примеру, для реализации режима многократного повторения импульсов для МИУ с уровнем энергии 2кДж и частотой 10Гц, мгновенная мощность может составить до 20кВт [3].

Повышающий трансформатор, способный обеспечивать уровень напряжения при такой мощности потребления обладает существен-

ными габаритами и массой, которая составляет львиную долю массы всего комплекса МИУ.

Альтернативным решением недостатков описанной выше системы является применение импульсных преобразователей напряжения в качестве устройства заряда для МИУ. Их принцип работы может базироваться либо на повышение рабочей частоты, либо использования временных характеристик зарядных и разрядных контуров для регулировки выходных показателей преобразователя. В первом варианте, повышение частоты преобразуемого напряжения и тока, дает возможность снизить массогабаритные показатели трансформатора и снизить его стоимость. Так, к примеру, для преобразования напряжения с выходной мощностью 500 Вт, импульсный трансформатор будет ориентировочно 5–6 раз меньше своего аналога работающего на промышленной частоте. Во втором же случае, можно существенно упростить схему за счет исключения индуктивно-связанных контуров, а преобразование – повышение напряжения осуществляется за счет собственных переходных процессов в цепи преобразователя. Не смотря на то, что реализации последнего типа имеют применения в маломощных преобразователях, их принцип работы представляет практический интерес для создания более экономичных вариантов исполнения генераторов токовых импульсов в технологиях магнитно-импульсной обработки металлов [4,5].

Цель работы

Целью работы является оценка эффективности использования схемы ступенчатого заряда емкостных накопителей в качестве преобразователя напряжения на примере МИУ.

Для получения численных показателей работы зарядного устройства, необходимо выполнить описание модели системы заряда, произвести ее численное моделирование, а правильность полученных решений следует апробировать экспериментально.

Описание работы схемы

Предложенное усовершенствование системы заряда представлено на схеме электрической силовой части МИУ на рис. 1. Усовершенствование подразумевает исключение из схемы

повышающего трансформатора и высоковольтного выпрямительного устройства с

управляемыми тиристорами [6].

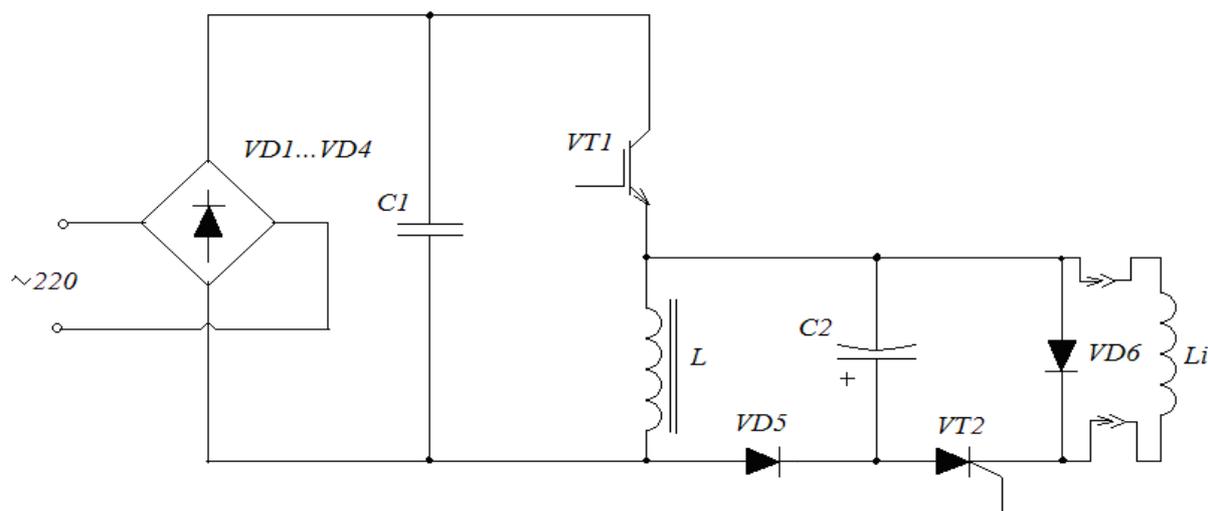


Рис. 1. Силовая часть МИУ: VT1...VT2 – полупроводниковые ключи; VD1...VD6 – силовые ВЧ диоды; L – дроссель; Li – подключаемый индуктор – инструмент; C1...C2 – емкости.

Работу схемы можно условно охарактеризовать двумя состояниями: состояние, когда ток протекает от выпрямителя по ветви коммутатора и индуктивности и состояние, когда коммутатор разомкнут и ток индуктивности в режиме переходного процесса протекает в контуре с емкостным накопителем.

При открытии ключа VT1 протекающий через дроссель ток приводит к накоплению в нем энергии пропорциональной индуктивности и квадрату значения тока. Наличие диода VD5 предотвращает протекание тока по параллельной ветви с C2 при открытом состоянии ключа.

Во втором режиме, в момент закрытия ключа VT1, накопленная в индуктивности энергия передается в емкость за счет выполнения условия непрерывности тока на индуктивности в момент коммутации.

Описанный процесс повторяется циклически до установления требуемого напряжения на емкостном накопителе. Особенной применения повышающего преобразователя такого типа для МИУ заключается в отсутствии стационарного режима его работы. В отличие от типового зарядного устройства, в котором максимальное напряжение ограничено коэффициентом трансформации, предложенная конструкция может обеспечивать многократное повышение напряжения заряда. Максимум выходного напряжения может огра-

ничиваться лишь количеством циклов заряда емкости. Исходя из таких соображений, нельзя использовать известные функциональные зависимости при описании работы предложенной схемы преобразования зарядного устройства. С целью получения качественных оценок работоспособности предложенного усовершенствования зарядного устройства, получим его представление в модельном виде.

Постановка задачи. Исходя из описания работы устройства заряда, рассмотрим протекающие динамические процессы виде функций тока и напряжения для двух режимов работы цепи заряда для одного цикла заряда емкости. На рис. 2 представлены две приведенные электрические схемы, соответствующие двум режимам работы, где R – токоограничивающий резистор, номинал которого рассчитывается из максимальной нагрузки на источник питания E , Rl – омическое сопротивление обмотки дросселя.

Уравнение состояния для режима замкнутого коммутатора для функции тока на индуктивности и его решения при нулевых начальных условиях

$$L \frac{dJ(t)}{dt} + (R + R_L) J(t) = U_{\Pi} \quad (1)$$

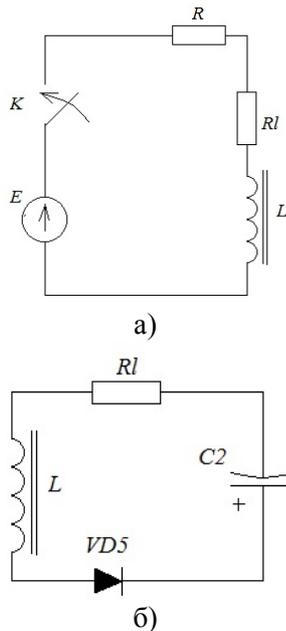


Рис. 2. Идеализация электрической цепи заряда; а) – для замкнутого состояния ключа; б) – для разомкнутого состояния ключа.

Так как функция тока индуктивности предполагает только нулевые начальные условия, функция тока примет известную временную форму [2]

$$J_i(t - \tau_{1i}) = \frac{U_{II}}{R + R_L} \left[1 - e^{-\left(\frac{R+R_L}{L}\right)(t-\tau_{1i})} \right], \quad (2)$$

где τ_{1i} – промежуток времени, соответствующий периоду начала i -го цикла заряда.

Время установления заданного значения тока на индуктивности, которое является важным показателем работы системы заряда, так как влияет на общее время установления требуемого напряжения заряда, выразим из (2)

$$t_L = \frac{L}{R + R_L} \ln \left(1 - \frac{J_3 (R + R_L)}{U_{II}} \right)^{-1}. \quad (3)$$

Фактически, в момент достижения тока дросселя и размыкания коммутатора, индуктивный элемент представит собой источник тока, который в начальный момент времени может привести к электрическому пробоему ключа из-за скачка напряжения на нем. В качестве поглощающего элемента выступает сама заряжаемая емкость. В таком случае, скачек напряжения на ключе автоматически будет ограничиваться, а его максимум апри-

ори, может быть равен сумме напряжения источника питания и напряжения заряда емкости.

Далее решим уравнение состояния для режима заряда емкости в момент размыкания коммутатора при ненулевых начальных условиях.

$$\frac{d^2 U_C(t)}{dt^2} + 2\beta \frac{dU_C(t)}{dt} + \omega_0^2 U_C(t) = 0, \quad (4)$$

где $\beta = \frac{R_L}{2L}$ – декремент затухания

$\omega_0^2 = \frac{1}{LC}$ – собственная частота.

Выпишем начальные условия уравнения (4) с учетом непрерывности тока индуктивности и напряжения емкости в момент переключения. Исходя из постановки задачи, начальные условия последующего цикла заряда, определяются конечными значениями функций предыдущего цикла на момент переключения. Отсюда

$$\begin{cases} U_C(t = \tau_{2i})_i = C_{1i} = U_C(t)_{i-1} \\ J_2(t = \tau_{2i})_i = C(-J_3\beta - C_{2i}\omega) = J_3 \end{cases} \quad (5)$$

С учетом условий (5) и тождественных преобразований общего решения для (4), находим выражения для функций тока и напряжения на емкости. При выполнении условия колебательного переходного процесса $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$,

что безусловно является желаемым с точки зрения минимальных потерь при передаче энергии, получаем общее решение уравнения для второго режима заряда емкости

$$\begin{cases} U_C(t - \tau_{2i})_i = (C_{1i} \cos(\omega(t - \tau_{2i})) + \\ + C_{2i} \sin(\omega(t - \tau_{2i}))) e^{-\beta(t - \tau_{2i})} \\ J_2(t - \tau_{2i})_i = C e^{-\beta t} ((C_{1i}\omega - C_{2i}\beta) \times \\ \times \sin(\omega(t - \tau_{2i})) - (C_{2i}\omega + C_{1i}\beta) \cos(\omega(t - \tau_{2i}))) \end{cases} \quad (6)$$

где $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$ – частота переходного процесса; C_{1i} C_{2i} – неизвестные константы интегрирования.

Время переноса электрической энергии ин-

дуктивности в емкостной накопитель получаем из выражения для $J_2(t - \tau_{2i})_i$ из условия, что протекающий ток имеет униполярный характер обусловленный наличием диода VD5 в контуре (рисунок 2, б).

$$t_{c_i}(J_2(t)_i = 0) = \frac{1}{\omega} \operatorname{arctg} \left(\frac{J_3}{CUc(\tau_{i-1})_{i-1}\omega + \frac{\beta J_3}{C\omega} + Uc(\tau_{i-1})_{i-1} \frac{\beta^2}{\omega}} \right) \quad (8)$$

Соответствующие значение промежутка времени $t_{c_i}(J_2(t)_i = 0)$ и $t_L(J_1(t) = J_3)$ на каждом i -том цикле будет определять длительность одного цикла заряда емкости.

Непрерывные временные зависимости функций тока заряда емкости и напряжения могут быть представлены в виде суммы функций для каждого из циклов заряда при соответствующем интервале времени определения i -того цикла. С использованием обобщенной ступенчатой функции получаем

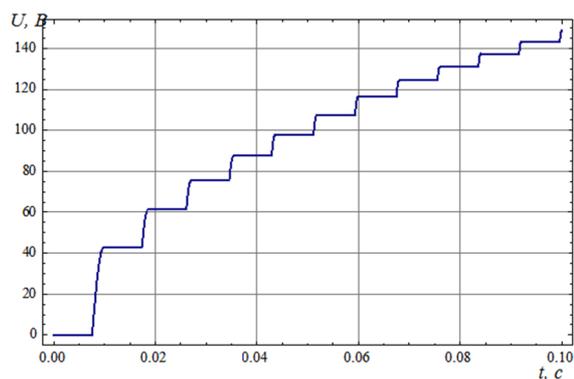
$$\left\{ \begin{aligned} U_C(t) &= \sum_{i=1}^{\infty} U_{Ci}(t - it_L - \sum_{n=1}^i t_{c_{n-1}}) \times \\ &\times \left[\eta \left(t - it_L - \sum_{n=1}^i t_{c_{n-1}} \right) - \eta \left(t - it_L - \sum_{n=1}^i t_{c_n} \right) \right] \quad (9) \\ J_2(t) &= \sum_{i=1}^{\infty} J_{2i}(t - it_L - \sum_{n=1}^i t_{c_{n-1}}) \times \\ &\times \left[\eta \left(t - it_L - \sum_{n=1}^i t_{c_{n-1}} \right) - \eta \left(t - it_L - \sum_{n=1}^i t_{c_n} \right) \right] \quad (10) \end{aligned} \right.$$

Численные оценки

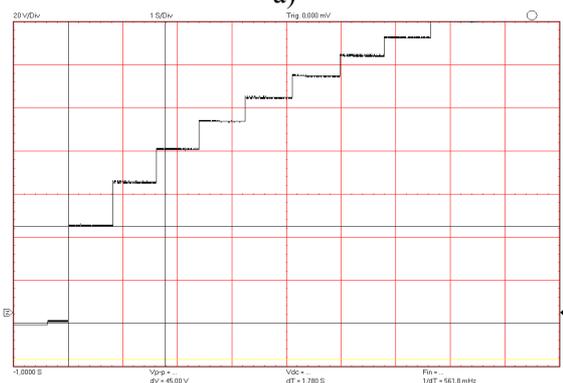
Достоверность полученных зависимостей тока и напряжения проверим при сравнение результатов моделирования и временных зависимостей напряжения заряда полученных экспериментально.

Для экспериментальной оценки были выбраны следующие параметры цепи:
 – индуктивность дросселя $L=0,022$ Гн;
 – активное сопротивление дросселя $R \approx 0,9$ Ом
 – напряжение питания $U=10$ В;
 – ток дросселя $I=3$ А
 – величина зарядной емкости 100 и 200мкФ.
 Схема эксперимента идентична рассмотрен-

ной модели при ее математическом описании (рис. 1). На рис. 3,4 представлены типичные графические зависимости функций напряжения заряда, а так же соответствующие им осциллограммы приращение напряжения заряда полученные экспериментально. Временные формы на рисунках 3,а...4,а построены в соответствии с выражением (9); осциллограммы напряжений заряда снятые с зажимов на емкости C2 (рис. 1).



а)



б)

Рис. 3. Временная зависимость напряжения для $C=100\mu\text{F}$; а – расчетная, б – измеренная (20В/дел)

Результаты численного моделирования и эксперимента занесены в таблицу 1.

Как видно из табличных значений, и временных разверток искомых функций, помимо визуальной идентичности результатов моделирования и эксперимента, можно отметить более значимое для практики проектирования числовое соответствие основных выходных показателей поведения рассматриваемой схемы. Полученный результат говорит об адекватности принятой модели и ее решений, что является приемлемым для дальнейшего расчета рабочего варианта исследуемой системы заряда МИУ.

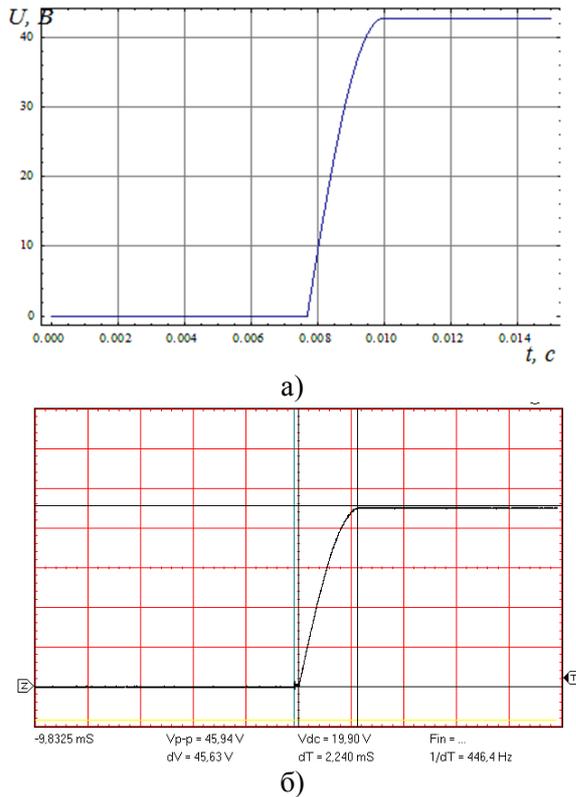


Рис. 4. Временная зависимость нарастания напряжения на первом цикле заряда для $C = 100\mu\text{F}$; а – расчетная, б – измеренная (10В/дел)

Таблица 1. Сводные числовые показатели

	Зарядная емкость $C = 100\mu\text{F}$		Зарядная емкость $C = 200\mu\text{F}$	
	Моделирование	Эксперимент	Моделирование	Эксперимент
Напряжение заряда первого цикла, В	43,5	45,6	29,0	30,9
Время установления значения заряда первого цикла, мс	2,5	2,24	3,0	3,0
Количество циклов заряда до напряжения 100В	5	5	11	9

Практический интерес представляют процессы, протекающие в реальной установке [8]. Так, на рисунке 5 представлено моделирование заряда емкости $1200\mu\text{F}$ для токов заря-

да от 10 до 100 А и индуктивности дросселя 0,01 Гн и 0,05 Гн. Как уже было отмечено ранее, предложенная схема заряда обеспечивает постоянно нарастающее напряжения на емкостном элементе, что является преимуществом перед зарядным устройством с повышающим трансформатором.

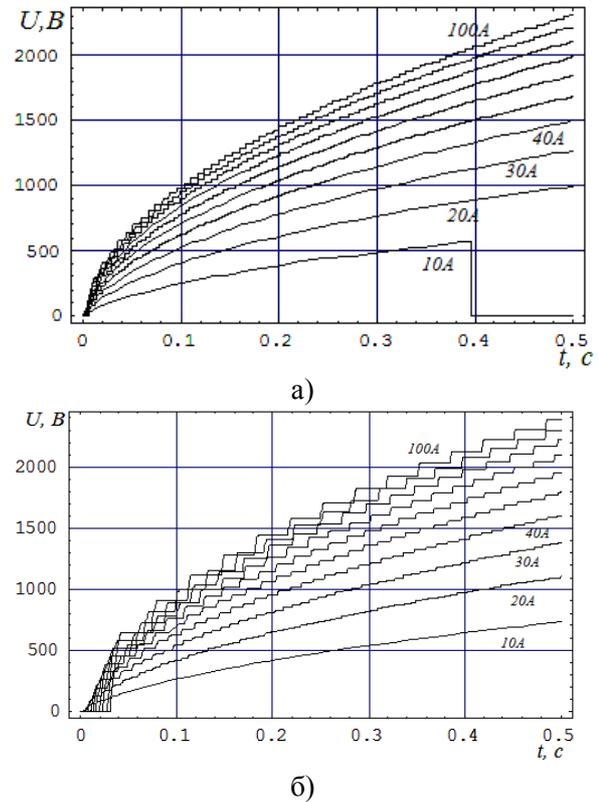


Рис. 5. Заряд емкостного накопителя: а – индуктивность дросселя 0,01 Гн; б – индуктивность дросселя 0,05 Гн

Оценка временных форм на рисунке 5, для заданных параметров цепи показала, что требуемое напряжение заряда емкости может быть достигнуто за 0,35 и 0,38 с, что на практике может соответствовать частоте повторения силовых импульсов на уровне не ниже 3 Гц. Так же можно отметить, что изменение величины используемой индуктивности влияет на частоту повторения циклов, а время-задающим фактором заряда емкости является ток коммутации.

Выводы

В работе, рассмотрено усовершенствование конструкции зарядного устройства на примере магнитно-импульсной установки за счет применения схемы ступенчатого заряда емкостных накопителей.

По результатам моделирования и экспериментальной апробации, предложенная схема заряда может быть использована в качестве зарядного устройства МИУ.

Время достижения требуемого уровня заряда зависит от тока коммутации, а величина индуктивности дросселя влияет на частоту повторения циклов коммутации.

Литература

1. Батыгин Ю.В., Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий/ Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хименко Л.Т.. – 2-е изд., перераб. Доп. – Харьков: – Торнадо, 2003. – 288с.
2. Атабеков Г.И., Основы теории цепей. – М: Энергия 1969.
3. Щ.В. Аргун. Магнітно-імпульсні установки – джерела потужності у технологіях з використанням енергії електромагнітних полів. Вестник НТУ "ХПИ". – Харьков: "ХПИ", 2013. – №30 (1003). – С. 100–106
4. Щ.В.Аргун,Т.В. Гаврилова. Удосконалення джерела енергії комплексу зовнішнього безконтактного рихтування автомобільних кузовів. Автомобиль и электроника. Современные технологии: электронное научное специализированное издание. – Х.: ХНАДУ, 2013. – № 4. – С. 119–123. – ISSN 2226-9266
5. Lenk, John D. 1996. Simplified Design of Switching Power Supplies. Publishing House: Elsevier.
6. AN-1132 APPLICATION NOTE: How to Apply DC-to-DC Step-Up (Boost) Regulators// Матеріал сайту – 2011. – Режим доступу: <http://www.analog.com/media/ru/technical-documentation/application-notes/AN-1132.pdf>

Рецензент: А.В. Гнатов, д.т.н., профессор ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 27 февраля 2016 г.