

УДК 62.83

## УЛУЧШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНТЕЙНЕРНОГО КОЗЛОВОГО КРАНА

Е. А. Смотров, А. М. Фель, В. В. Субботин, Р. В. Квятковская  
НТЦ «СТАНКОСЕРТ»

**Аннотация.** Проведено исследование энергетических характеристик козлового крана – контейнерного перегружателя. На базе полученных результатов обоснована целесообразность применения рекуператора с блоком суперконденсаторов для их улучшения. Проведена оценка экономической эффективности рекуператора с блоками суперконденсаторов разной емкости.

**Ключевые слова:** козловой кран, рекуперация, рекуператор, суперконденсатор, преобразователь напряжения.

### Введение

Современная тенденция развития транспортной логистики смещается в сторону контейнерных перевозок и увеличения количества обслуживающего эту область оборудования. Одним из элементов этой системы являются козловые краны – контейнерные перегружатели.

Работа посвящена одному из направлений совершенствования энергетических характеристик контейнерного козлового крана.

При питании от сети козлового крана вопросы рекуперации энергии при спуске груза и торможении не являются существенными. В данной статье анализируются вопросы утилизации энергии, рекуперированной для козлового контейнерного крана с автономным источником питания – дизель-генератором, установленном на борту.

### Цель исследования

Исследовать энергетические характеристики контейнерного перегружателя с автономным источником питания, определить возможность и целесообразность внедрения рекуператора в систему.

Оценить экономическую эффективность полученной системы.

### Материалы исследования

Объект – козловой кран с пневмоколесным ходом Rubber Tyred Gantry Crane (RTG) фирмы Konecranes.

Основные технические данные RTG:

- максимальная грузоподъемность с комплектацией спредером BROMMA YSX45E при подъеме одного 45-футового контейнера – 40,6 т;
- высота подъема спредера – 18,1 м;
- скорость передвижения, м/мин:
- крана с грузом на крюке 1,5...75;
- крана без груза и дополнительных нагрузок 2,7...130;
- крана поперек пути без груза и нагрузок 1...50;
- грузовой тележки с грузом максимальной массы 1,4...70.

Измерительное оборудование: трехфазный счетчик энергии ACE 6000, программно-измерительный комплекс POWERGRAPH, счетчик энергии постоянного тока СЭПТ.

Функциональная схема основного электрооборудования RTG приведена на рис. 1 и включает в себя следующие узлы и блоки:

- дизель-генераторная установка Д-Г;
- преобразователи подъема (ПП) и вспомогательной лебедки (ПВЛ);
- преобразователи передвижения тележки (ППТ) и крана (ППК);
- разрядные резисторы (РР1 и РР2);
- электродвигатели перемещения спредера (М1, М2) и передвижения (М3-М5).

На схеме также изображены следующие узлы и блоки (отсутствуют на реальном объекте):

- датчики напряжения ДН1 и ДН2;
- преобразователь напряжения – рекуператор (Р);
- блок суперконденсаторов (БСК).

Д-Г является автономным источником питания, преобразователи подъема выпрямляют входное напряжение и формируют общую шину постоянного напряжения (ШПН), от которой питаются все остальные узлы системы.

© Смотров Е.А., Фель А.М.,  
Субботин В.В., Квятковская Р.В., 2017

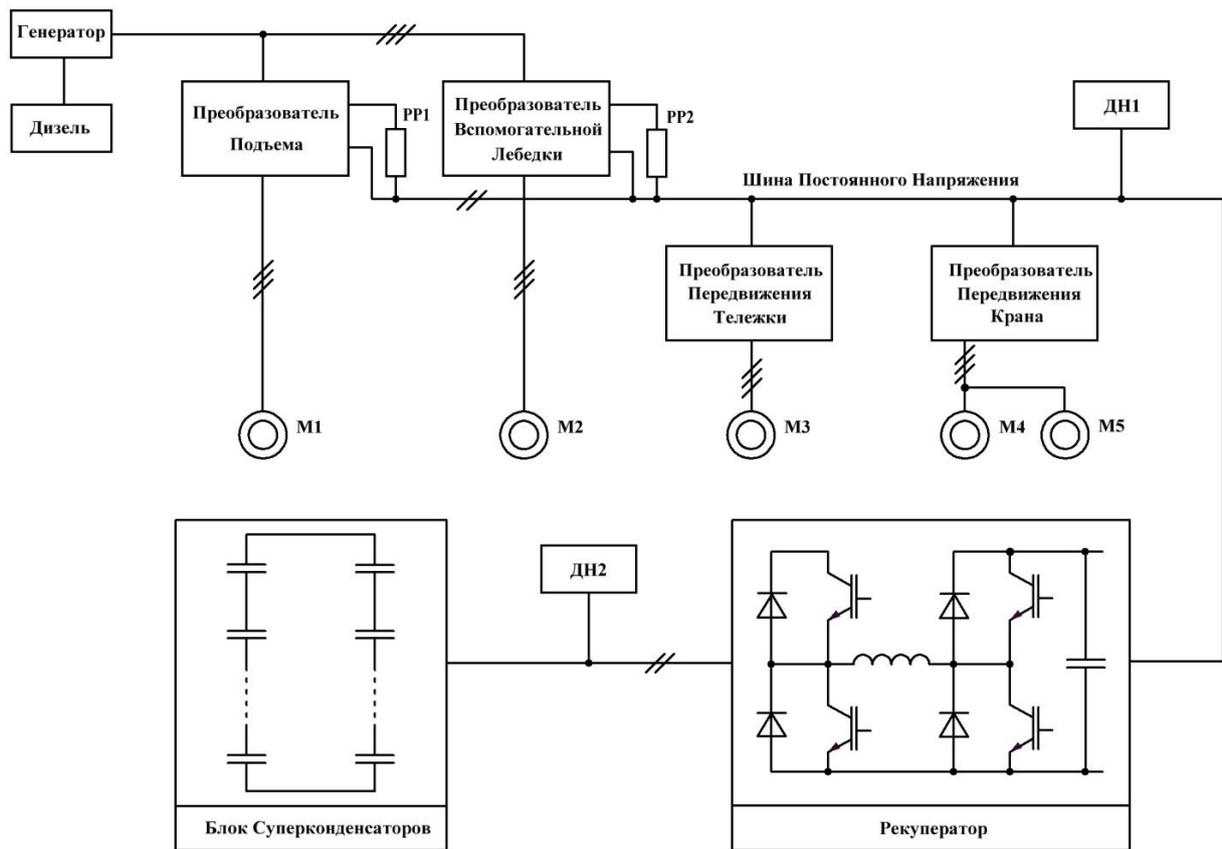


Рис. 1. Функциональная схема основного электрооборудования RTG и P с БСК

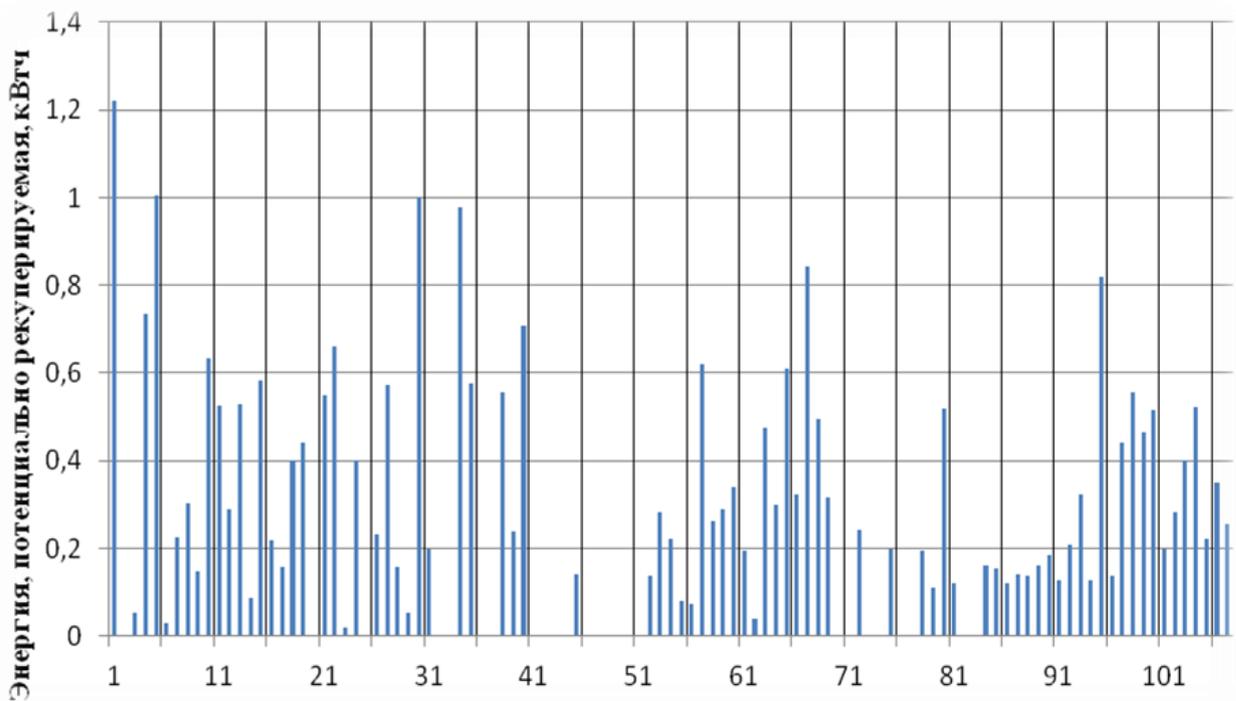


Рис. 2. Диаграмма рекуперированной энергии при работе перегружателя

Анализ режимов работы крана при различной нагрузке показал, что рекуперативное торможение происходит при спуске контейнера или при торможении крана. В таком режиме соответствующий электродвигатель переходит в генераторный режим работы, отдавая электроэнергию в емкостной фильтр ШПН. При этом на валу электродвигателя возникает тормозной момент, а на ШПН поднимается общий уровень напряжения. При превышении порогового напряжения на ШПН подключаются разрядные резисторы, ток в которых регулируется при помощи широтно-импульсной модуляции (ШИМ) и ограничивается напряжением на ШПН заданного уровня во время процесса рекуперации (спуска контейнера/торможения крана).

Анализ полученных результатов показывает, что энергия, выделяемая при торможении в разрядных резисторах (34 Вт·ч), в 7,35 раза меньше энергии, выделяемой в резисторах при опускании спредера (250 Вт·ч) и в 36 раз меньше энергии, выделяемой при опускании груженого спредера (32 т) (1222 Вт·ч).

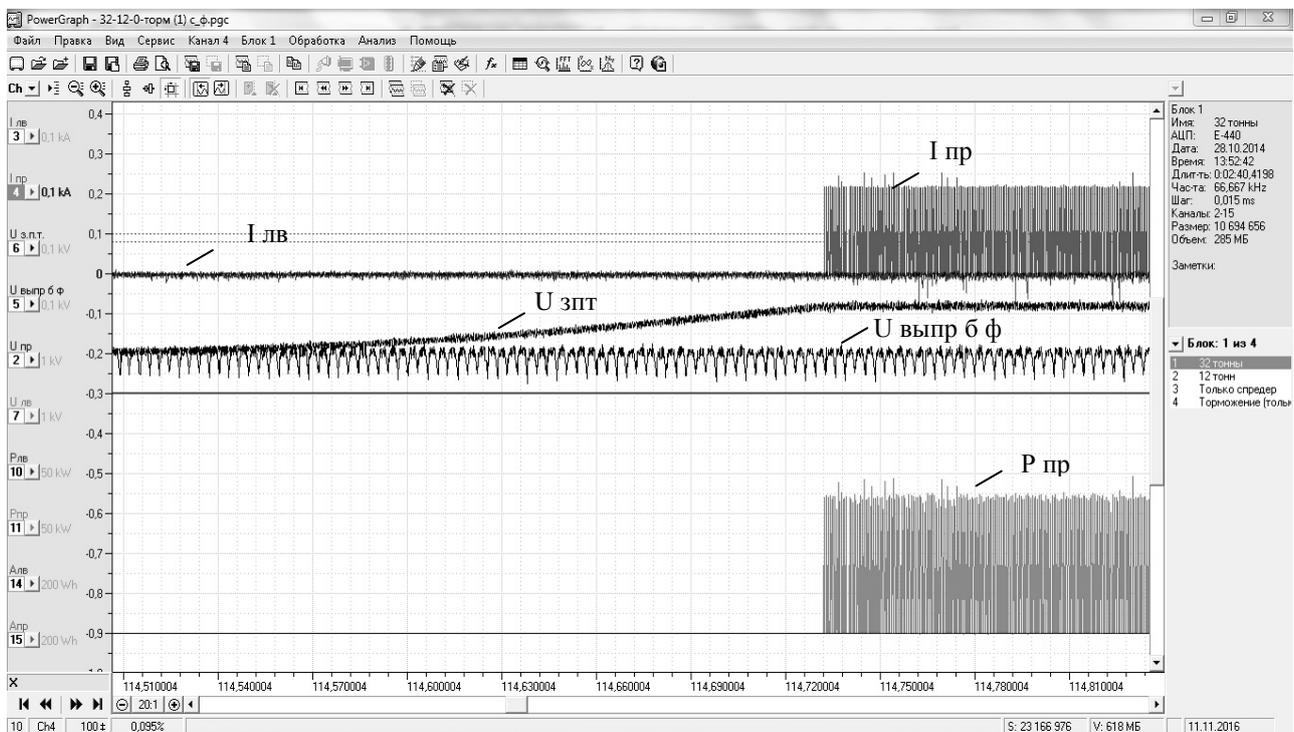
Для оценки количества энергии, выделяемой

в разрядных резисторах, и частоты процессов рекуперации на ШПН и в РР были установлены счетчики СЭПТ.

Исследования режимов работы крана проводились в течение месяца. За этот период дизель-генераторная установка проработала 526 часов и по показаниям счетчика электрической энергии произвела 14,5 МВтч электроэнергии, затратив 9,1 тыс. л дизельного топлива. В разрядных резисторах за рассматриваемый период было рассеяно 5,73 МВтч электроэнергии, (эквивалент 3,55 тыс. л топлива) что составляет 39% от выработанной электроэнергии.

Выборка данных счетчиков приведена на рис. 2. По оси абсцисс отложены операции при работе крана (подъем/спуск/перемещение), по оси ординат отложены уровни энергии, выделяемой в разрядных резисторах за операцию. Уровень энергии определяется массой спускаемого контейнера и высотой спуска. Максимальное количество энергии 1,22 кВтч было получено при спуске груза 32 т с максимальной высотой (18,1 м).

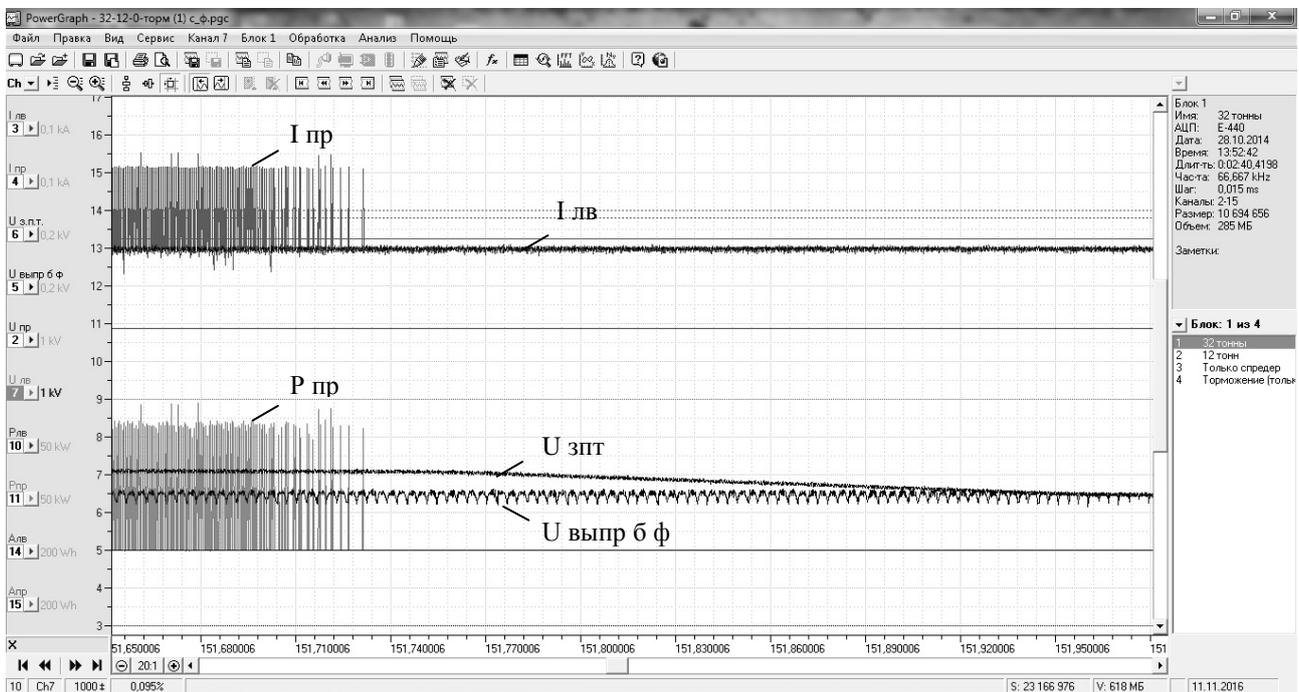
Временные диаграммы участка процесса спуска приведены на рис. 3.



а



б



в

Рис. 3. Временные диаграммы RTG при спуске груза весом 32 т  
 а) начало спуска; б) середина спуска; в) окончание спуска

На рис. 3 обозначены:  $I_{pp1}$  – ток PP1;  $I_{lv}$  – ток PP2;  $P_{pp1}$  – мощность PP1;  $P_{lv}$  – мощность PP2;  $A_{pp1}$  – энергия PP1;  $A_{lv}$  – энергия PP2;  $U_{zpt}$  – напряжение звена постоянного тока;  $U_{выпр.б.ф}$  – выпрямленное напряжение.

В начале спуска (рис. 3, а)  $U_{zpt}$  начинает возрастать до определенного уровня, при котором начинают работать PP. В середине спуска (рис. 3, б) более детально показаны процессы происходящие на PP. По окончании спуска (рис. 3, в) с уменьшением генерируемой энергии рост напряжения на ШПН прекращается, а значит, прекращается работа PP. Скорость спада  $U_{zpt}$  к  $U_{выпр.б.ф}$  зависит от текущего потребления напряжения на ШПН.

Рассеянную в разрядных резисторах электроэнергию можно сохранять с дальнейшим возвратом в ШПН. Для этого необходим буфер энергии – блок суперконденсаторов (БСК) и преобразователь-рекуператор (Р), который формирует режим передачи энергии между БСК и ШПН. [3] Схема включения Р с БСК и дополнительных датчиков, необходимых для работы Р, приведена на рис. 1 в составе функциональной схемы перегружателя.

За один цикл происходит спуск и, соответственно, рекуперация энергии, затем осуществление перегружателем определенных операций (подъем, перемещение спредера, смена позиции перегружателя, подъем следующего контейнера). При наличии в системе Р и БСК указанные действия перегружателя будут производиться вначале за счет энергии, запасенной в БСК, а затем за счет энергии Д-Г установки. Спуск следующего контейнера и начало следующего цикла начинаются при разряженном БСК.

Таким образом, нужно накопить и сохранить количество энергии за один цикл.

Требуемое количество энергии, которую можно запасти в БСК, определяется разностью квадратов напряжений максимального ( $U_{\max}$ ) и минимального ( $U_{\min}$ ) напряжения на зажимах БСК в начале и в конце зарядки и непосредственно емкостью БСК.

При выборе БСК завышенной емкости, цена будет завышена, и будет происходить недоиспользование по емкости при рассмотренном ранее алгоритме работы. При выборе БСК меньшей емкости, чем необходимо для принятия энергии (спуск 32 т с высоты 18,1 м) происходит потеря части потенциально рекуперированной энергии. Рассмотрим зависимость между уровнем ограничения энергии, запасенной в БСК, и потерями (недобором) энергии в реальном режиме работы. Для выборки данных, соответствующих рис. 2, эта зависимость приведена на рис. 4. Как следует из графика на рис. 4 – ограничение накопленной энергии на уровне половины от максимально возможной рекуперированной энергии приведет к безвозвратным потерям  $\sim 10\%$  от рекуперированной энергии, но при этом емкость БСК, стоимость которого является основным ценообразующим фактором, уменьшается вдвое.

В рассматриваемой системе напряжение ШПН составляет 700 В, пороговое напряжение ( $U_{pk}$ ) разрядного ключа 820 В. Для дальнейших расчетов примем пороговое напряжение для работы Р равным 800 В.

По результатам исследования системы принимаем данные: Среднее значение тока разрядного ключа  $I_{кл} = 150$  А; Время спуска с максимальной высоты  $t_{сп} = 60$  с.

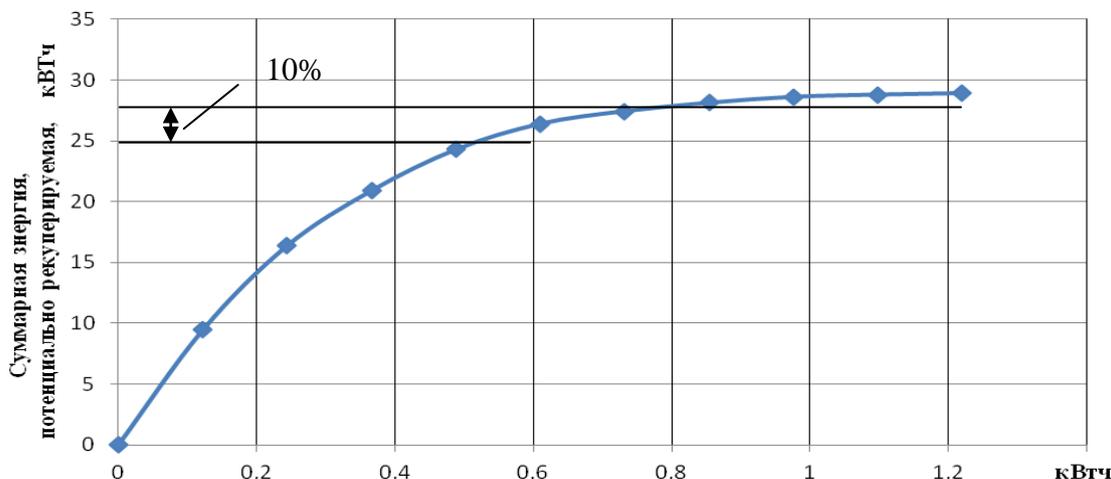


Рис. 4. Зависимость суммарной накопленной энергии от уровня ограничения

Для сравнения рассмотрим два варианта реализации Р с разной емкостью накопительной системы 1,22 кВтч и 0,6 кВтч. При диапазоне изменения напряжения на зажимах БСК от номинального до половины номинального (в соответствии с рекомендациями изготовителя) потребуется емкость 16,21 Ф и 8,105 Ф соответственно. БСК может быть набран из модулей EMHSR-0125CO-64ROS южнокорейской компании Nescap, Co., Ltd, емкостью 125 Ф номинальным напряжением 64 В, внутреннее сопротивление 6,4 мОм. Последовательное соединение 14 модулей обеспечит номинальное напряжение батареи 896 В, емкость 8,92 Ф. При параллельном соединении двух цепочек – 17,84 Ф.

Проведенный в [1] анализ показал зависимость КПД процесса заряда (разряда) БСК от соотношения: уровней напряжения – минимального и максимального на зажимах БСК, длительности процесса и величины постоянной времени батареи. Последняя равна 0,8 с. Время спуска составляет 10–60 с. При принятых соотношениях указанных величин в соответствии с [1] прием величину КПД процесса равной 0,9.

Таблица 1  
Сравнение вариантов реализации Р с разной емкостью накопительной системы (1,22 кВтч и 0,6 кВтч)

Тип БСК	EMHSR0125CO	
Энергия, кВтч	1,22	0,6
Стоимость БСК, USD	73500	36750
Стоимость преобразователя Р, USD	19000	19000
Стоимость программного обеспечения, USD	6000	6000
Суммарная стоимость Р, USD	98500	61750
Расход топлива за месяц, л	9107	9107
Энергия на РР, кВтч	4641,3	4170,17
Экономия за месяц, USD	2831	2548,1
Экономия за год,	33972	30756

USD		
Окупаемость, год	2,9	2

### Вывод

Проведенный анализ показал целесообразность применения Р и БСК для экономии электроэнергии, выделяемой на разрядных резисторах в контейнерном козловом кране.

С учетом графика (рис. 4) возможно уменьшение стоимости и срока окупаемости Р, связанное с уменьшением емкости БСК и уменьшением электроэнергии, накапливаемой в БСК. При этом незначительная часть электроэнергии будет поступать на разрядные резисторы. Так как мы не всегда рекуперуем максимальное количество энергии за один цикл, целесообразней применение Р с емкостью накопительной системы 0,6 кВтч. (табл.1).

Срок окупаемости системы составит 2 года.

Предложенное решение может быть применено и в других аналогичных механизмах.

### Список использованной литературы

1. Вершинин, Д. В. Система регулирования тока батареи суперконденсаторов бортового источника питания электротранспортного средства [Текст] / Д. В. Вершинин, В. А. Войтенко, Е. А. Смотров // Электротехнические и компьютерные системы. – К.: – 2009. Наука и техника. – Вып. (73).– С. 43-49.
2. Смотров, Е. А. Анализ энергетических показателей работы суперконденсаторов [Текст] / Е. А. Смотров, Д. В. Вершинин, О. Г. Дашко, В. В. Субботин, А. Ю. Сусленко // «Приводная техника», технико-аналитический информационный журнал. – Москва.–2011. – № 6(94). – С. 23–28.
3. Смотров, Е. А. Рекуператор бортового источника питания электротранспортного средства [Текст] / Е. А. Смотров // Электротехнические и компьютерные системы. – 2011. Наука и техника. – № 2.(78). – С. 7–12.
4. Смотров, Е. А. Рекуператор электропривода лифта [Текст] / Е. А. Смотров, В. В. Субботин // Автоматизированные электромеханические системы. – К.: – 2014. Наука и техника. – № 16(92). – С. 16–25.

5. Смотров, Е. А. К вопросу об оценке энергетической характеристики электротранспортных средств [Текст] / Е. А. Смотров, Д. В. Вершинин, В. В. Субботин // Сборник статей по материалам XXIX международной научно-практической конференции «Технические науки от теории к практике». – Новосибирск: – 2013. – № 12(25). – С.174–183.

6. Standart Module 64V-125F [Electronic Resource]. – Access Mode : [http://www.nesscap.com/ultracapacitor/EDLC/Supercapacitor/high\\_voltage\\_supercapacitor\\_module.jsp](http://www.nesscap.com/ultracapacitor/EDLC/Supercapacitor/high_voltage_supercapacitor_module.jsp)

### References

1. Vershinin, D. V., Voitenko, V. A., Smotrov, E. A. (2009), “System control current battery supercapacitor onboard power supply electric vehicle” [Sistema regylovaniya toka batarei bortovogo istochnika pitaniya] Electrotechnical and computer systems, no. 73, pp. 7–12.

2. Smotrov, E. A., Vershinin, D.V., Dashko, O. G., Subbotin, V. V., Suslenko, A. U. (2011), “Analysis of the energy performance of supercapacitors” [Analiz energeticheskikh

pokazateley raboti superkondensatorov] Technical and analytical information magazine “Drive Technology”, no. 6(94), pp. 23–28.

3. Smotrov, E. A. (2011), Recuperator onboard power supply electric vehicle [Recuperator bortovogo istochnika pitaniya elektrotransportnogo sredstva] Electrotechnical and computer systems, no. 2 (78), pp. 7–12.

4. Smotrov, E.A., Subbotin, V. V. (2014), Recuperator electric drive elevator [Recuperator elektroprivoda lifta] Electrotechnical and computer systems, no. 2 (78), pp. 16–25.

5. Smotrov, E. A., Vershinin, D. V., Subbotin, V. V. The question of an the energy characteristics of electric vehicles [K voprosy ob oenergeticheskikh harakteristik elektrotransportnih sredstv] Collected articles on materials XXIX International scientific-practical conference "Engineering of Pratica to theory", Novosibirsk, 2013. no. 12(25). pp.174–183.

6. “Standart Module 64V-125F” , available at: [http://www.nesscap.com/ultracapacitor/EDLC/Supercapacitor/high\\_voltage\\_supercapacitor\\_module.jsp](http://www.nesscap.com/ultracapacitor/EDLC/Supercapacitor/high_voltage_supercapacitor_module.jsp)

## IMPROVE THE ENERGY PERFORMANCE CONTAINER GANTRY CRANE

E. A. Smotrov , A. M. Fell , V. V. Subbotin, R. V. Kvyatkovskaya  
NTTS "STANKOSERT"

**Abstract.** *In this work, contemplates a method of improving the energy characteristics of the container gantry crane. Well known, that effect of braking or lowering is accompanied by entering electric motors in regenerator mode. As result, possible overvoltage and subsequent crash of the on-board equipment. For overvoltage protection during developing stage were provided protector resistors, which convert excess energy into heat.*

*The research was made on gantry cranes on pneumowheel Rubber Tyred Gantry Crane. According to research operation modes it was found that in the protector resistors were utilized up to 39% energy, which was used before. Received information allows to define a proposal how to store and reuse energy that earlier would be just convert into heat. Our suggest is adding the electric converter recuperator and block of supercapacitors, which accumulate energy when the engine enter in generator mode, and then return in bus. It can be implement in the existing system with minimal changes.*

*Presents estimates the economic efficiency of two variants of realizations our solution with different capacities value. Limiting the level accumulated energy at half of the maximum possible recuperated power leads to losses of about 10% of the recuperated power, but this prices are reduced by half, the payback period of the order of ~ 2 years.*

*It is shown that to improve the energy characteristics of container cranes and similar mechanisms expedient recuperator installation.*

**Key words:** *gantry crane, recuperation, recuperator, supercapacitor, voltage converter.*

## ПОЛІПШЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНТЕЙНЕРНОГО КОЗЛОВОГО КРАНУ

Е. А. Смотров<sup>1</sup>, А. М. Фель<sup>1</sup>, В. В. Суботін<sup>1</sup>, Р. В. Квятковська<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> НТЦ «СТАНКОСЕРТ»

**Анотація.** Було проведено дослідження енергетичних характеристик козлового крану – контейнерного перевантажувача. На базі отриманих результатів обґрунтована доцільність застосування рекуператора з блоком суперконденсаторів для поліпшення енергетичних характеристик. Проведено оцінку економічної ефективності рекуператора з блоками суперконденсаторів різної ємності.

**Ключові слова:** козловий кран, рекуперация, рекуператор, суперконденсатор, перетворювач напруги.

Получено 29.11.2016



**Смотров Евгений Александрович**, кандидат технических наук, ведущий инженер научно-технического центра «СТАНКОСЕРТ», пер. Ониловой, 16, Одесса, Украина, E-mail: ukrniisip@gmail.com, тел. +048-728-85-05

**Eugene Smotrov**, Ph. D., Lead Engineer Science and Technology Center "STANKOSERT". Onilova lane., 16, Odessa, Ukraine, E-mail: ukrniisip@gmail.com, tel. + 048-728-85-05

**ORCID ID:** 0000-0002-7456-6029



**Фель Александр Михайлович**, главный инженер научно-технического центра «СТАНКОСЕРТ», пер. Ониловой, 16, Одесса, Украина, E-mail: ozto@ukr.net, тел. + 048-725-92-66

**Alexander Fell**, Chief Engineer Science and Technology Center "STANKOSERT". Onilova lane, 16, Odessa, Ukraine, E-mail: ozto@ukr.net, tel. + 048-725-92-66

**ORCID ID:** 0000-0002-9910-7857



**Субботин Виктор Владимирович**, инженер II категории научно-технического центра «СТАНКОСЕРТ», пер. Ониловой, 16, Одесса, Украина, E-mail: ukrniisip@gmail.com, тел. + 048-728-85-05

**Viktor Subbotin**, Engineer II Category Science and Technology Center "STANKOSERT". Onilova lane, 16, Odessa, Ukraine, E-mail: ukrniisip@gmail.com, tel. + 048-728-85-05

**ORCID ID:** 0000-0002-5784-7881



**Квятковская Раиса Викторовна**, инженер-исследователь научно-технического центра «СТАНКОСЕРТ», пер. Ониловой, 16, Одесса, Украина, E-mail: ukrniisip@gmail.com, тел. + 048-728-85-05

**Raya Kvyatkovska**, Research Engineer Science and Technology Center "STANKOSERT". Onilova lane, 16, Odessa, Ukraine, E-mail: ukrniisip@gmail.com, tel. + 048-728-85-05

**ORCID ID:** 0000-0002-3456-0992