



**Механика**  
**Транспорт**  
**Комуникации**

Научно списание <http://www.mtc-aj.com>

ISSN 1312-3823 (print)

ISSN 2367-6620 (online)

том 23, брой 3, 2025 г.

статия № 2727

## **МИНИМИЗИРАНЕ НА ЕНЕРГИЯТА, ИЗРАЗХОДВАНА ОТ ТОВАРНО- РАЗТОВАРНИТЕ МАШИНИ В ИНТЕРМОДАЛНИ ТЕРМИНАЛИ, ЧРЕЗ НАМИРАНЕ НА ОПТИМАЛНИ СТОЙНОСТИ НА СКОРОСТИТЕ ЗА ДВИЖЕНИЕ НА ОТДЕЛНИТЕ МЕХАНИЗМИ**

**Илиян Славов, Борис Петков, Галина Петкова**

[islavov@vtu.bg](mailto:islavov@vtu.bg), [borpet@vtu.bg](mailto:borpet@vtu.bg), [gpetkova@vtu.bg](mailto:gpetkova@vtu.bg)

ORCID iD: 0009-0003-1817-7365

*Висше транспортно училище „Тодор Каблешков“,  
София, ул. „Гео Милев“ № 158,  
БЪЛГАРИЯ*

**Резюме:** В доклада е представена възможност за минимизиране на изразходваната електрическа енергия в интермодални терминали, чрез намиране на оптимални стойности на скоростите за движение на отделните механизми на товарно- разтоварните машини. Разгледана е оптимизационна процедура даваща възможност за избор на машини с най- подходящи скоростни параметри при определени експлоатационни условия. При формулиране на оптимизационната задача се определят средните разстояния, които преодоляват отделните механизми за всеки работен цикъл, продължителността на работните операции (включително и независещите от работата на механизмите) от всеки цикъл, отчита се влиянието на преходните процеси при движение на механизмите. При тези условия оптимизацията е сведена до избор на машини с такива кинематични параметри, при които изразходваната електрическа енергия се минимизира.

**Ключови думи:** оптимизация на енергопотреблението в интермодални терминали, намаляване на потреблението на електроенергия, избор на машини.

### **ВЪВЕДЕНИЕ**

Интермодалният товарен транспорт отдавна е един от най-екологичните начини за превоз на стоки. Той съчетава ефективността на железопътния и водния транспорт за по-дълги разстояния с гъвкавостта на шосейния - за по-къси разстояния, както и бързината на въздушния, като се търси оптимума от икономическа гледна точка. Големи са очакванията, че интермодалният транспорт ще допринесе за намаляване на въглеродните емисии и ще повиши ефективността на транспортната система.

За постигане на максимална интермодална ефективност е необходима дългосрочна стратегия за терминалите. При линейния трафик е възможно да има повече малки терминали по маршрута, като се съкратят разстоянията за хранване. Тава ще позволи интермодалният трафик да покрие повече маршрути на по-къси разстояния. Освен това е необходим малък брой големи интермодални терминали, където пристанищата и летищата могат да се използват максимално за оптимално взаимодействие между камиони, влакове, кораби и самолети.

Конвенционалните крайни терминали са сравнително скъпи както от инвестиционна, така и от експлоатационна гледна точка, но в тях могат да се обработват всички видове единични товари. Те обаче покриват голяма площ и трябва да бъдат оразмерени за много високи натоварвания. Това определя високи разходи за обработвана товарна единица, които е трудно да се намалят, дори при големи обеми обработени товари.

Интермодалният транспорт включва движението на товари, използвайки една и съща транспортна единица (напр. контейнер, полуремарке, сменяема каросерия) или тежкотоварен камион между множество видове транспорт, при което се претоварва само транспортната

единица [1]. Специализирани съоръжения, използващи вертикално претоварване - „повдигане/разтоварване“ или хоризонтално претоварване - „рол-он/рол-оф“, позволяват прехвърлянето на стоки между различните видове транспорт. За вертикалното претоварване се използват портални кранове или рийчстакери. Хоризонталните системи са базирани на технологията на железопътния транспорт, свързана с товарни рампи или с напълно интегрирани вагони.

Налице е стремеж към електрифициране на оборудването, вместо използване на дизелови двигатели. Вместо 10 крана, всеки със собствен дизелов двигател, крановете могат да бъдат разположени на една електрифицирана проводяща шина. Електрифицираните кранове също така позволяват лесно генериране на енергия по време на намаляване на скоростта на движение или спускане на товари. Тази възстановена енергия може да се съхранява и/или да се разпределя с останалите кранове, работещи в рамките на терминала. Така се намалява не само разхода на енергия, но и се компенсират пиковите електрически натоварвания [2]. Намаляването на пиковите натоварвания намалява разходите за закупуване на електроенергия за терминала и прави възможно рационализирането на необходимата инфраструктура за електроразпределение в рамките на обекта.

Обикновените индустриални мотокари намаляват разходите, но ще ограничат обработката до 20-футови контейнери и сменяеми каросерии.

Значителен обем изследвания е посветен на локализирането и проектирането на интермодални терминали [3-5]. Съществува обаче ясна липса на литература, която да се занимава с определяне на енергопотреблението [6] на интермодалните терминали. Това е належащ въпрос, породен от нарастващите цени на енергийните носители и на въглеродните емисии [7]. В този контекст възниква въпроса: възможно ли е да се разработи надежден метод за изчисление на енергопотреблението на интермодалния терминал, позволяващ оптимизиране на логистичните процеси и потреблението на енергия? Освен това, как зависи общото потребление на енергия на логистичните съоръжения от фактори като входни параметри, спецификации на интермодалната инфраструктура, видове товаро-разтоварни съоръжения и операции по обработка?

#### **МЕТОДИ НА ОПТИМИЗИРАНЕ**

Проблемите, свързани с оптимизацията на товарно-разтоварни и складови процеси и системи, особено в условията на пазарното стопанство, придобиват все по-голямо значение за ефективното функциониране на товаро- разтоварната система. Това налага разработването и внедряването на ефективни методи и алгоритми за оптимизация с широко използване на достиженията на математиката и софтуерните постижения.

Проблемът за избор на оптимални скорости за движение на отделните механизми на кранове от мостов тип [8] може да се разглежда в два аспекта – когато се проектира кран за определен вид дейности или при избор на кранове с най-подходящи скорости за работа при определени експлоатационни условия. Ще разгледаме оптимизационна процедура при втория случай – в условията на работа на товарно- разтоварния фронт в интермодални складове.

Приемаме, че товаро- разтоварният фронт ще бъде съоръжен с един или повече кранове от даден вид. Трябва да се има предвид, че цената на крановете не зависи само от кинематичните параметри, а също и от геометричните - светъл отвор, височина на повдигане, дължина на конзолите, база и др. Съществено влияние върху цената оказва и типа кран и неговата окомплектовка – механизми за въртене на товара около неговата хоризонтална и вертикална оси, наличие на гасители на колебанията на товара, наличие на микроскорости, крайни защиты и др.

Преди да се пристъпи към процеса на оптимизиране, трябва да се определят средните разстояния, които трябва да преодоляват отделните механизми за всеки цикъл. По-нататък, имайки предвид, че скоростите на движение на отделните механизми практически се изменят дискретно, ще използваме различните стойности на скоростите чрез съответния вид сравнявани товаро-разтоварни машини.

Крановите механизми, по време на работа, се намират в два режима – движение с номинални скорости и преходни режими на ускоряване и спиране.

При тези предварителни условия оптимизацията се свежда до избиране на кранове с такива скоростни параметри, при които енергопотреблението за функциониране на товаро-разтоварния фронт (ТРФ) се минимизира.

Имайки предвид горното можем да формулираме следната **оптимизационна задача**: да се намерят такива (оптимални) стойности за движение на крановете механизми, така че енергопотреблението да е с минимална стойност [8]. За решаване на тази задача съставяме следната целева функция:

$$(1) \quad \min E = \sum_{k=1}^n E_k^H + \sum_{k=1}^n E_k^{pp}, \quad kWh$$

при следното ограничение:

$$(1.1) \quad z \Pi_k^E Z_k \geq Q^\Gamma$$

където:

$\min E$  - търсената стойност на минималното енергопотребление;

$E_k^H$  - енергията, консумирана от  $k$ -тия кран при номинален режим на работа на механизмите;

$E_k^{pp}$  - енергията консумирана от  $k$ -тия кран при преходен режим на работа на механизмите;

$n$  - броят на крановете на товарно- разтоварния фронт;

$Q^\Gamma$  - годишно количество товари за манипулиране от ТРФ, t;

$\Pi_k^E$  - експлоатационна производителност на  $k$ -тия кран, t/h;

$z$  - годишен брой на работните часове на ТРФ;

$Z_k$  - брой на крановете от  $k$ -тия вид.

Енергията, консумирана от  $k$ -тия кран при номинален режим на работа е:

$$(2) \quad E_k^H = \frac{1}{3600} \frac{Q^\Gamma}{Q_k^H k_k^T} \sum_{m=1}^r N_{km}^H T_{km}^H, \quad kWh$$

където:

$Q^\Gamma$  - годишно количество товари за манипулиране от ТРФ, t;

$Q_k^H$  - номиналната маса на товара на  $k$ -тия кран, t;

$k_k^T$  - коефициент, отчитащ използването на товароподемността на  $k$ -тия кран;

$N_{km}^H$  - консумирана мощност от  $m$ -тия механизъм на  $k$ -тия кран, kW;

$T_{km}^H$  - времето за работа на  $m$ -тия механизъм на  $k$ -тия кран, s

При механизмите за преместване на товара консумираната мощност при номинален работен режим е:

$$(3) \quad N_{km}^H = \frac{W_{km} v_{km}}{1000 \eta_{km}}, \quad kW$$

където:

$W_{km}$  - съпротивлението при движение на  $m$ -тия механизъм на  $k$ -тия кран, N;

$v_{km}$  - номиналната скорост на движение на  $m$ -тия механизъм на  $k$ -тия кран, m/s;

$\eta_{km}$  - КПД на  $m$ -тия механизъм на  $k$ -тия кран.

При подечните механизми консумираната мощност при номинален работен режим е:

$$(4) \quad N_{km}^H = \frac{G_{km}^T v_{km}}{1000 \eta_{km}}, \quad kW$$

където:

$G_{km}^T$  - теглото на повдигнатия товар от  $m$ -тия механизъм на  $k$ -тия кран, N.

Времето за работа на  $m$ -тия механизъм на  $k$ -тия кран е:

$$(5) \quad T_{km}^H = \frac{l_{km}}{v_{km}} - 2 \frac{v_{km}}{a_{km}}$$

където:

$l_{km}$  - средното разстояние, което изминава на  $m$ -тия механизъм на  $k$ -тия кран за един работен цикъл, m;

$a_{km}$  - допустимото ускорение на  $m$ -тия механизъм на  $k$ -тия кран, m/s<sup>2</sup>.

Енергията консумирана от  $k$ -тия кран при преходен режим на работа е:

$$(6) \quad E_k^{\text{np}} = \frac{1}{3600} \frac{Q^\Gamma}{Q_k^H K_k^T} \sum_{m=1}^r N_{km}^{\text{np}} T_{km}^{\text{np}}, \text{ kWh}$$

Тук  $N_{km}^{\text{np}}$  и  $T_{km}^{\text{np}}$  имат същите значения както в (2), но при преходни режими на работа. Тогава:

-при механизмите за преместване на товара консумираната мощност е:

$$(7) \quad N_{km}^{\text{np}} = \frac{(W_{km} + a_{km} G_{km}^M) v_{km}}{1000 \eta_{km}}, \text{ kW}$$

-при подемните механизми консумираната мощност е:

$$(8) \quad N_{km}^{\text{np}} = \frac{(G_{km}^T + a_{km} m_{km}) v_{km}}{1000 \eta_{km}}, \text{ kW}$$

където:

$G_{km}^M$  - теглото на  $m$ - тия механизъм за хоризонтално преместване на  $k$ - тия кран, N;

$m_{km}$  - масата на товара на  $m$ - тия подемен механизъм на  $k$ - тия кран, t.

По отношение на ограничението (1.1) имаме предвид следните зависимости:

$$(9) \quad \Pi_k^E = \frac{3600 Q_k^H}{t_k^H} K_k^T K_k^B = \frac{3600 Q_k^H}{\sum_{j=1}^J t_{jk}^{\text{нез}} + \sum_{m=1}^r t_{km}} K_k^T K_k^B$$

където:

$t_k^H$  – продължителността на работния цикъл на  $k$ - тия кран, s;

$K_k^B$  – коефициент отчитащ регламентирания престой на  $k$ - тия кран;

$t_{jk}^{\text{нез}}$  – продължителност на  $j$ - тата, независеща от движението на механизма операция, s;

$t_{km}$  - продължителността на работа  $m$ - тия механизъм на  $k$ - тия кран, s

като

$t_{km} = \frac{l_{km}}{v_{km}} + 2 \frac{v_{km}}{a_{km}}$ , извежда се от условията за равно ускорително движение, при

предполагането, че изминатото разстояние при преходните режими и четири пъти по- малко от това на номиналните.

## РЕЗУЛТАТИ

На базата на представените по- горе зависимости и изведената от оптимизационната задача целева функция представяме оптимизационен математичен модел като коефициентите в представените по- долу уравнения съдържат постоянните величини и параметри в уравненията от (1) до (9):

$$(10) \quad E_k^H = \frac{C_k}{3600} \sum_{m=1}^r (A_{km} - B_{km} v_{km}^2), \quad k = 1 \div n$$

$$(11) \quad E_k^{\text{np}} = \frac{C_k}{3600} \sum_{m=1}^r (D_{km} v_{km}^2), \quad k = 1 \div n$$

Като се имат предвид уравнения 10 и 11 целевата функция 1 добива вида:

$$(12) \quad \min E = \sum_{k=1}^n \left( \frac{C_k}{3600} \sum_{m=1}^r (A_{km} - B_{km} v_{km}^2) \right) + \sum_{k=1}^n \frac{C_k}{3600} \sum_{m=1}^r (D_{km} v_{km}^2)$$

и ограничението 1.1:

$$(13) \quad P_{km} v_{km}^2 - R_k v_{km} = -S_{km}$$

Тук:

$$A_{km} = \frac{W_{km} l_{km}}{1000 \eta_{km}}, \quad B_{km} = \frac{2W_{km}}{1000 \eta_{km} a_{km}}, \quad C_k = \frac{Q^\Gamma}{Q_k^H K_k^T}, \quad D_{km} = \frac{2W_{km}}{1000 \eta_{km} a_{km}} + \frac{2m_{km}}{1000 \eta_{km}}, \quad P_{km} = \frac{2\Pi_k}{a_{km}}, \quad R_k = 3600 Q_k^H K_k^T K_k^B, \quad S_{km} = \Pi_{km} l_{km}.$$

В уравнение 12 въвеждаме следните субституции:

$$A_k = \frac{C_k}{3600} \sum_{m=1}^r A_{km}, \quad k = 1 - 3, \quad A = \sum_{k=1}^n A_k$$

$$H_{km} = \frac{C_k B_{km}}{3600}, \quad I_{km} = \frac{C_k D_{km}}{3600}, \quad F_{km} = I_{km} - H_{km}$$



**ЛИТЕРАТУРА:**

- [1]. Brzeziński, M.; Pyza, D.; Archutowska, J.; Budzik, M. Method of Estimating Energy Consumption for Intermodal Terminal Loading System Design. *Energies* 2024, 17, 6409. <https://doi.org/10.3390/en17246409>.
- [2]. Hewitt, C., Intermodal Freight Terminal Optimization, *HDR*, 18/8, 2022, ISSN: 0018-8646.
- [3]. Brzeziński, M.; Pyza, D. Designing of Transshipment Terminals for Selected Intermodal Transport Systems. In *Research Methods and Solutions to Current Transport Problems*; Siergiejczyk, M., Krzykowska, K., Eds.; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2020, 52–62.
- [4]. Basallo-Triana, M.J.; Vidal-Holguín, C.J.; Bravo-Bastidas, J.J. Planning and Design of Intermodal Hub Networks: A Literature Review. *Comput. Oper. Res.* 2021, 136, 105469.
- [5]. Delgado, E.J.; Barbosa-Póvoa, A.P.; Antunes, A.P. Intermodal Terminal Planning under Decentralized Management: Optimization Model for Rail-Road Terminals and Application to Portugal. *Future Transp.* 2021, 1, 533–558.
- [6]. Spengler, T.; Wilmsmeier, G., Energy Consumption and Energy Efficiency Indicators in Container Terminals—A National Inventory. In *Proceedings of the IAME 2016 Conference, Hamburg, Germany, 1/8, 2016*.
- [7]. Sari, R.; Ewing, B.; Soytaş, U. The Relationship between Disaggregate Energy Consumption and Industrial Production in the United States: An ARDL Approach. *Energy Econ.* 2008, 30, 2302–2313
- [8]. Петров Д., Стоядинов С., Оптимизация на товаро-разтоварни и складови процеси, С/О Jusautor Sofia, 1993, ISBN 954-12-0005-2.

**MINIMIZING THE ENERGY CONSUMED BY THE LOADING AND  
UNLOADING MACHINES IN INTERMODAL TERMINALS BY  
FINDING OPTIMAL VALUES OF THE SPEEDS FOR THE  
MOVEMENT OF THE INDIVIDUAL MECHANISMS**

**Iliyan Slavov, Boris Petkov, Galina Petkova**  
[islavov@vtu.bg](mailto:islavov@vtu.bg), [borpet@vtu.bg](mailto:borpet@vtu.bg), [gpetkova@vtu.bg](mailto:gpetkova@vtu.bg)

ORCID iD: 0009-0003-1817-7365

**Todor Kableshkov University of Transport,  
Sofia, Geo Milev Str. 158,  
BULGARIA**

**Abstract:** *The report presents a possibility for minimizing the consumed electrical energy in intermodal terminals by finding optimal values of the speeds for the movement of the individual mechanisms of loading and unloading machines. An optimization procedure is considered, allowing for the selection of machines with the most appropriate speed parameters under certain operating conditions. When formulating the optimization problem, the average distances covered by the individual mechanisms for each work cycle are determined, the duration of the work operations (including those independent of the operation of the mechanisms) for each cycle is determined, the influence of transient processes during the movement of the mechanisms is taken into account. Under these conditions, the optimization is reduced to the selection of machines with such kinematic parameters that the consumed electrical energy is minimized.*

**Key words:** *optimization of energy consumption in intermodal terminals, reduction of electricity consumption, selection of machines.*