

# Načrtovanje avtomatiziranih regalnih skladiščnih sistemov z uporabo simulacijskega postopka

## The Design of Automated Storage and Retrieval Systems Using a Simulation Modeling Approach

Iztok Potrč - Tone Lerher - Janez Kramberger - Matjaž Šraml

*V prispevku je predstavljen simulacijski model avtomatiziranega regalnega skladiščnega sistema z enojno pomično in večpomičnimi mizami. Glavni namen predstavljene raziskave je določitev zmogljivosti sistema z večpomičnimi mizami, glede na sistem z enojno pomično mizo. Slednje pomeni glavni delež in pomoč pri postopku načrtovanja avtomatiziranega regalnega skladiščnega sistema. Povečanje pretočne zmogljivosti transportno-skladiščnih enot je mogoče z uporabo sistema z večpomičnimi mizami, glede na sistem z enojno-pomično mizo. V inženirski praksi se največkrat uporablja sistem z enojno pomično mizo, ki temelji na dvojnem delovnem krogu, medtem ko sistem z večpomičnimi mizami temelji na štirikratnem in šestkratnem delovnem krogu. Problem se pojavi pri uporabi ustrezne upravljalne strategije, za zagotovitev pogoja o najmanjših vožnjah regalnega dvigala. V ta namen smo uporabili posebno domiselno metodo, poimenovano "Strategija x", ki razvršča zaporedje skladiščnih in odpremnih zahtev, z namenom po minimizaciji povprečnega časa vožnje regalnega dvigala. Za ovrednotenje domiselne metode s sistemom večpomičnih miz smo uporabili tehniko diskretnih numeričnih simulacij. Rezultati simulacijske analize so pokazali očitno povečanje pretočnih zmogljivosti sistema z večpomičnimi mizami v primerjavi s sistemom enojne pomične mize.*

© 2004 Strojniški vestnik. Vse pravice pridržane.

**(Ključne besede: sistemi skladiščni, skladišča avtomatizirana, operacije skladiščne, simulacije diskretne, analiza zmogljivosti)**

*A simulation model of a single and a multi-shuttle automated storage and retrieval systems is presented in this paper. The main object of the presented research was to determine the efficiency of multi-shuttle systems versus single-shuttle systems, which represents the main share and support in the design process of automated storage and retrieval systems. An improvement of the throughput capacity of the transport unit load is possible with the use of multi- versus single-shuttle systems. Single-shuttle systems are frequently used in engineering practice, and they are based on the dual command cycle, while multi-shuttle systems are based on the quadruple and sextuple command cycles. The main problem is how to incorporate an appropriate control policy so that the condition of minimal empty travel of the storage and retrieval machine will be fulfilled. A special heuristics method, "Strategy x", that sequences storage and retrieval requests in order to minimize the average travel time has been used for this purpose. Discrete event simulations were used to evaluate the heuristics performances within multi-shuttle systems. The results of simulation analyses showed significant improvements in the throughput capacity for multi-shuttle systems in comparison with single-shuttle systems.*

© 2004 Journal of Mechanical Engineering. All rights reserved.

**(Keywords: storage systems, retrieval systems, storage operations, discrete event simulation, performance analysis)**

### 0 UVOD

Razvojne usmeritve v skladiščenju so spremenile postopke skladiščnega poslovanja. Spremembe se kažejo v kratkih odzivnih časih pri uskladiščenju in odpremi blaga, zmanjševanju zalogovne velikosti skladišča in avtomatizaciji celotnega skladiščnega poslovanja. Številna

### 0 INTRODUCTION

Technological developments in warehouses have changed the processes of storage operations; this is reflected in the short response times for the storage and retrieval of goods, the reduction of warehouse volume and the automation of the whole of warehouse management. Numerous companies are

podjetja zamenjujejo draga in dotrajana običajna skladišča z avtomatiziranimi regalnimi skladiščnimi sistemi (AS/RS). AS/RS lahko razdelimo na AS/RS z enojno pomično (sl. 1) in večpomičnimi mizami (sliki 2 in 3).

Najosnovnejši elementi AS/RS z enojno pomično mizo (sl. 1) so skladiščni regali (SR), regalno dvigalo (RD), vhodna in izhodna (I/O) lokacija ter zvezni transporterji (sl. 4) [13]. AS/RS so vodeni z računalnikom, ki zbira pomembne informacije in zagotavlja visoko stopnjo organiziranosti skladišča. Te informacije lahko nadalje uporabljamo v proizvodnji, razdelitvi, računovodstvu, prodaji itn. Glavne prednosti pri gradnji AS/RS so učinkovit izkoristek skladiščnega prostora, manjše število poškodb in izgube blaga, povišanje ravni nadzora uskladiščenja in odpreme blaga ter zmanjšanje števila skladiščnih delavcev [2].

Zmogljivost AS/RS je pogosto ovrednotena s številom transportno-skladiščnih enot (TSE) na časovno enoto, ki jih lahko uskladiščimo in odpremimo, kar pomeni pretočno zmogljivost sistema  $\lambda$ . Pri načrtovanju in določitvi AS/RS moramo upoštevati čas vožnje regalnega dvigala pri delovnem krogu, dolgoročne in kratkoročne vzorce toka materiala, podrobno analizo učinka posredovanja (komisioniranja) po nalogu, oceniti povprečni čas med izpadom in popravilom opreme ter systemske opravilne strategije [12]. Zmogljivost AS/RS je lahko določena tudi s povprečnimi stroški za opravili uskladiščenja in odpreme, oziroma glede na čakalni čas za odpremo.

Zaradi potrebe po večji pretočni zmogljivosti in manjših odzivnih časih pri obdelavi naročil, so bila razvita regalna dvigala, ki lahko sprejmejo več TSE hkrati. Številni proizvajalci skladiščne opreme so začeli ponujati takšne izvedbe regalnih dvigal, ki lahko sprejmejo tudi tri in več TSE hkrati. Tako lahko dosežemo večje pretočne zmogljivosti. Pretočna zmogljivost AS/RS z večpomičnimi mizami se na splošno povečuje s povečevanjem števila pomičnih miz. Zaradi tega se zmanjšujejo nekoristne "prazne" vožnje regalnega dvigala. S povečevanjem števila pomičnih miz se prav tako povečuje vložek kapitala [13].

V prispevku je obravnavan in analiziran AS/RS skladiščenja majhnih delov s sistemom z enojno pomično in večpomičnimi mizami. AS/RS majhnih delov se uporabljajo predvsem na področjih avtomobilske, kemične in farmacevtske industrije, kjer predstavlja TSE geometrijsko majhen zaboj. Regalna dvigala so lažje in kompaktnjše izvedbe od običajnih regalnih dvigal, kjer je osnova za TSE paleta. Pri uporabi AS/RS z večpomičnimi mizami ločimo v splošnem AS/RS z dvema pomičnima (sl. 2) in tremi pomičnimi mizami (sl. 3) ([10], [12] in [13]).

AS/RS so bili v zadnjih desetletjih predmet številnih raziskav. Njihov intenziven razvoj se je začel

replacing costly and outdated traditional warehouses with a system of automated storage and retrieval systems (AS/RSs). AS/RSs can be classified into single (Figure 1) and multi-shuttle (Figures 2 and 3) AS/RSs.

The basic components of the type of single-shuttle AS/RS (Figure 1) are storage racks (SRs), storage and retrieval machine (S/R machine), input and output (I/O) locations and interface conveyors (Figure 4) [13]. The AS/RSs are computer controlled, they collect beneficial information and provide a high degree of inventory visibility, which can be subsequently used for manufacturing, distribution, accounting, sales, etc. The main advantages of building an AS/RS are the efficient utilization of warehouse space, a decrease in the amount of damage and the loose of goods, increased control during the storage and retrieval of goods, and in a reduction in the number of warehouse workers [2]. Therefore, numerous production companies start to replace costly and lasted traditional warehouses with the AS/RS.

The efficiency of an AS/RS is often evaluated by the number of transport unit loads (TULs) per time unit that can be stored and retrieved, e.g., the throughput capacity of the system  $\lambda$ . When designing and evaluating the AS/RS, the designer must consider the S/R machine cycle time, the long-term as well as short-term material flow patterns, a detailed analysis of the order picking activity, an estimated average time between failure and repair for the equipment, systems operating strategies, etc. [12]. The efficiency of the AS/RS can be determined by the average cost per storage-and-retrieval operation or by the waiting time for a retrieval.

Due to increased requests for higher throughput capacities and shorter response times during the handling of orders, special designs of S/R machines that can carry several TULs simultaneously, have been constructed. Warehouse-equipment producers have begun to offer S/R machines that can receive up to the three TULs simultaneously and, as a result, higher throughput capacities can be achieved. The throughput capacity of a multi-shuttle AS/RS, tends to increase as the number of shuttles increases and, correspondingly, the amount of empty travel of the S/R machine decreases. The capital investment of the system also increases as the number of the shuttles increases [13].

Mini-load single- and multi-shuttle AS/RSs are discussed and evaluated in the presented study. The mini-load AS/RSs are most frequently used in the automotive, chemical and pharmaceutical industries, where the TUL represents a container. S/R machines are lighter and more compact than conventional S/R machines, where the TUL represents a palette. In the material-handling industry, generally, the dual-shuttle (Figure 2) and the triple-shuttle (Figure 3) AS/RSs can be used ([10], [12] and [13]).

AS/RSs have been the subject of much research over the past few years. Their intensive

z razvojem informatike in računalništva, ki predstavljata pomemben element skladiščne organizacije. Prav tako ne smemo pozabiti na organizacijsko raven sistema, ki s svojimi domiselnimi strategijami vodi in ureja njihovo delovanje.

Hausman in sodelavci [8] so analizirali enojni delovni krog (EK) samo za skladišča, ki so kvadratna po času (SIT)<sup>1</sup>. Primerjali so učinkovitost treh različnih skladiščnih odločitvenih pravil, kot so: strategija naključnega skladiščenja, strategija namenskega skladiščenja, strategija skladiščenja na podlagi določite skladiščne cone. Graves in sodelavci [5] so razširili modele [8] na bolj zmogljiv dvojni delovni krog (DK) z različnimi skladiščnimi odločitvenimi pravili za skladišča SIT. Analitične modele za določitev statističnega povprečja EK in DK, za skladišča splošnih oblik (skladišča, ki niso SIT) sta razvila Bozer in White [2]. Njuni analitični modeli temeljijo na strategiji naključnega skladiščenja z različno vhodno in izhodno razporeditvijo vhodnega zalogovnika. Pogosta praksa pri določitvi zaporedja zahtev za uskladiščenje in odpremo je, da sta obe zahtevi izpolnjeni na podlagi pravila "prvi pride prvi obdela" (PPPP - FCFS)<sup>2</sup>. Omenjeno pravilo je bila predpostavka tudi v modelih, ki sta jih predstavila Bozer in White [2]. Predpostavka PPPP je smiselna za uskladiščenje v AS/RS, saj večina teh sistemov uporablja za vhodno in izhodno lokacijo zvezni transporter. V tem primeru bi bilo težko spremeniti zaporedje TSE, določenih za uskladiščenje. Kakorkoli že, predpostavka PPPP je manj primerna za odpremo, ki pomenijo le elektronska sporočila in so lahko na lahek način urejena v zaporedje [9]. Zaradi tega so Han in sodelavci [7] pokazali, da lahko povečamo pretočno zmogljivost, če nadomestimo zaporedje FCFS odpreme z novo, "najbližji sosed" (NS)<sup>3</sup> domiselno metodo. Po njihovi navedbi prispeva 50% zmanjšanja prazne vožnje regalnega dvigala pri DK k povečanju pretočne zmogljivosti za 10 do 15%. Takšno povečanje pretočne zmogljivosti lahko pomaga pri premagovanju v konicah povpraševanja v fazi proizvodnje ali celo zmanjšanje skladiščnega hodnika, kar vodi k pomembnim prihrankom ([7] in [10]).

Po pregledu pregleda literature in dosedanjega dela na obravnavanem področju ugotavljamo, da je večina avtorjev analizirala AS/RS z enojno pomično mizo. Ti sistemi delujejo na temelju EK in DK, kjer lahko hkrati uskladiščimo in odpremimo samo eno TSE. Pretočna zmogljivost AS/RS z enojno pomično mizo je tako omejena z največjo zmogljivostjo regalnega dvigala in optimalnim tlorisom skladiščnega regala. Če želimo povečati pretočno zmogljivost,

development began with the development of informational and computer science, which represents an important part of warehouse operations. However, the organizational level of the system, which leads and manages the warehouse activities using different heuristics strategies, must also be taken into account.

Hausman et al. [8] analysed Single command Cycle (SC) only for Square-In-Time (SIT)<sup>1</sup> racks. They compared the performances of three storage-assignment policies, e.g., random, full-turnover-based and class-based turnover assignment. Graves et al. [5] extended models [8] to the more efficient Dual command Cycle (DC), with different assignment policies for SIT racks. Analytical models for expected SC and DC for storage racks of general shapes (non-SIT rack) have been developed by Bozer and White [2]. Their analytical models are based on randomized storage with different input and output configurations of the input queue. A common practice in sequencing storage and retrieval requests is that both requests are processed with a "first-come-first-served" (FCFS)<sup>2</sup> policy, which was also the assumption in the analytical models of Bozer and White [2]. The FCFS assumption is reasonable for storages, since most of the AS/RSs are interfaced with a conveyor for input and output location. In this case it is difficult to change the sequence of TULs presented for storage operation. However, the FCFS assumption is less suitable for retrievals, which are just electronic messages and can be easily sequenced [9]. Therefore, Han et al. [7] showed that the throughput capacity can be increased by replacing the FCFS retrieval sequencing with a new "nearest neighbor" (NN)<sup>3</sup> heuristics policy. According to their statement, a 50% or even more decrease in the interleave time for a dual command cycle leads to an increase in throughput of 10 to 15%. Such an increase in throughput capacity could help to handle peak demand in the operation phase or even to eliminate an aisle, which leads to considerable savings ([7] and [10]).

From the literature survey and present work on this field, the majority of researchers analysed the single-shuttle AS/RS. These systems work on the basis of SC and DC, where only one storage and retrieval could be achieved simultaneously. The throughput capacity of the single-shuttle AS/RS is therefore limited by the maximum efficiency of the S/R machine and the optimal layout of the SR. Therefore, multi-shuttle AS/RSs have to be used in order to

<sup>1</sup> SIT – velja za AS/RS, pri katerih je razmerje med obliko SR in zmogljivostjo regalnega dvigala enaka izrazu  $(L/v_x = H/v_y)$ .

<sup>2</sup> PPPP - FCFS – pravilo, pri katerem so TSE razporejene v smislu zaporedja prihoda.

<sup>3</sup> NS - NN – pravilo, ki rangira vse odpreme zahteve v skladiščnem regalu v smislu njihovih razdalj od trenutne skladiščne lokacije.

<sup>1</sup> SIT – deals for storage racks where the relationship between the layout of the SR and the efficiency of the S/R machine is equal  $(L/v_x = H/v_y)$ .

<sup>2</sup> FCFS – a policy that TULs are sequenced in order of arrival.

<sup>3</sup> NN – a policy that ranks all the retrieval requests in the SR in terms of their distance from the present storage location.

moramo uporabiti AS/RS z večpomičnimi mizami. Pri AS/RS z dvema pomičnima mizama lahko regalno dvigalo opravi dvojno uskladiščenje in dvojno odpremo v delovnem krogu, kar imenujemo štirikratni delovni krog (ŠK). Nadalje, pri AS/RS s tremi pomičnimi mizami lahko regalno dvigalo opravi trojno uskladiščenje in trojno odpremo v delovnem krogu, kar imenujemo šestkratni delovni krog (ŠEK) [13]. Problem pri AS/RS z večpomičnimi mizami nastane pri izbiri ustrezne domiselne metode, ki poskrbi za pogoj o najmanjših praznih vožnjah regalnega dvigala.

Keserla in Peters [10] sta predstavila analizo AS/RS z dvema pomičnima mizama. Predstavila sta domiselno metodo za minimizacijo prazne vožnje regalnega dvigala pri dvojnem delovnem krogu. Pokazala sta, da je pretočna zmogljivost pri uporabi ŠK večja v primerjavi z DK, in sicer med 40 in 45 odstotki. Analitične modele AS/RS z večpomičnimi mizami sta predstavila tudi Meller in Mungwatana [13]. Pri skladiščnih opravilih ŠK in ŠEK sta predstavila spremenjeno ŠK in ŠEK pri NS in "nasprotni najbližji sosed" (NNS - RNN) domiselni metodi. Njuni analitični modeli temeljijo na predpostavki, da regalno dvigalo potuje ves čas z ustaljeno hitrostjo (osnovo njunega dela predstavljajo analitični modeli, ki sta jih prva predstavila Bozer in White [2]), kar pa se ne ujema z dejanskim stanjem. Njihovo delo se razlikuje v strategiji uskladiščenja in v pravilu izbrane odločitve in zato ni neposredno uporabno za našo analizo, ki temelji na domiselni metodi "strategiji x".

Medtem ko je v dosedanjih analitičnih modelih za AS/RS z večpomičnimi mizami upoštevana le ustaljena hitrost, smo v predstavljenem delu uporabili za ovrednotenje učinkovitosti in zmogljivosti AS/RS diskretne simulacije. V nadaljevanju smo upoštevali dejavnike, ki imajo pomemben vpliv na povprečni čas vožnje regalnega dvigala pri delovnem krogu, to so:

- tloris skladiščnega regala,
- zmogljivost regalnega dvigala in
- upravljalno pravilo.

## 1 TEORETIČNE OSNOVE

V predstavljenem delu smo uporabili naslednje predpostavke in omejitve ([2], [10] in [13]):

- AS/RS z enojno pomično in večpomičnimi mizami je predpostavljen kot AS/RS z enojnim regalnim hodnikom.
- Skladiščni regal je predpostavljen z zvezno pravokotno obliko, pri je V/I lokacija postavljena v spodnjem levem robu skladiščnega regala.
- Znani sta dolžina ( $L$ ) in višina ( $H$ ) skladiščnega regala, prav tako sta znani tudi hitrosti regalnega dvigala v vodoravni smeri  $x$  in navpični smeri  $y$ .
- Regalno dvigalo lahko potuje hkrati v vodoravni in navpični smeri.
- Pri izračunu povprečnega časa vožnje regalnega

increase the throughput capacity of the system. The multi-shuttle AS/RSs are, in general, divided into the dual-shuttle and the triple-shuttle AS/RSs. In the dual-shuttle AS/RSs, the S/R machine can perform up to two storages and two retrievals in a cycle, e.g.m Quadruple command Cycle (QC). Furthermore, in the triple-shuttle AS/RSs, the S/R machine can perform up to the three storages and three retrievals in a cycle, e.g., Sextuple command Cycle (STC) [13]. The main problem within the multi-shuttle AS/RSs is to find the appropriate heuristics that provide the condition of minimum empty travel of the S/R machine.

Keserla and Peters [10] presented an analysis of dual-shuttle AS/RSs. The heuristics for minimizing the interleave time for DC is presented and the throughput-capacity improvement using QC in comparison with DC is in the range 40–45 %. Analytical models under multi-shuttle AS/RS were also presented by Meller and Mungwatana [13]. Within the storage operation of QC and STC, they presented a modified QC and STC with NN and a "reverse nearest neighbour" (RNN) request selection rule. Their analytical models are based on the assumption that the S/R machine travels all the time with uniform velocity (the basis of their work is the analytical models of Bozer and White [2]), which does not fit with the actual situation. However, they used a different approach to storage-location assignment policy and request selection rule. Therefore, their model is not directly applicable to our analysis, which is based on "Strategy x" heuristics.

Whereas in the existing analytical models for multi-shuttle AS/RS only uniform velocity is considered, the discrete event simulation for evaluating the performance and the efficiency of the AS/RS was used [11]. Several aspects, which have significant influences on the average cycle time, were considered, as follows:

- the layout of the SR,
- the efficiency of the S/R machine,
- the control policies.

## 1 THEORETICAL BACKGROUNDS

The main assumptions and notations of the present work are ([2], [10] and [13]):

- A single- and multi-shuttle AS/RS is considered to be a single picking aisle AS/RS.
- The SR is considered to be a continuous rectangular pick face, where the I/O location is located at the lower left-hand corner of the SR.
- The length ( $L$ ) and the height ( $H$ ) of the SR, as well as the S/R machine velocities in the horizontal  $x$  and vertical  $y$  directions, are known.
- The S/R machine travels simultaneously in the horizontal and vertical directions.
- In calculating the average travel time, non-constant



dvigala upoštevamo, da hitrosti regalnega dvigala v vodoravni in navpični smeri nista stalni.

- Časi za nalaganje in odlaganje TSE so nespremenljivi in se lahko preprosto dodajo v izraze za izračun povprečnega časa delovnega kroga.
- Regalno dvigalo deluje na podlagi EK, DK, ŠK in SEK.
- Za izvedbo domiselne metode "strategije x" obstaja množica  $n$  zasedenih lokacij za izvedbo zaporedja odpreme. Prav tako obstaja tudi množica  $m$  možnih lokacij za izvedbo zaporedja uskladiščenja v skladiščnem regalu.

Sistem simbolov:

- $v_x$  hitrost regalnega dvigala v vodoravni smeri,
- $v_y$  hitrost regalnega dvigala v navpični smeri,
- $a_x$  pospeševanje/pojemanje regalnega dvigala v vodoravni smeri,
- $a_y$  pospeševanje/pojemanje regalnega dvigala v navpični smeri,
- $H$  višina skladiščnega regala,
- $L$  dolžina skladiščnega regala,
- $E(T(SA))$  statistično povprečje časa vožnje regalnega dvigala za eno smer v skladiščnem regalu,
- $E(T(SC))$  statistično povprečje časa vožnje regalnega dvigala pri enojnem delovnem krogu,
- $E(T(DC))$  statistično povprečje časa vožnje regalnega dvigala pri dvojnem delovnem krogu,
- $E(T(QC))$  statistično povprečje časa vožnje regalnega dvigala pri štirikratnem delovnem krogu,
- $E(T(STC))$  statistično povprečje časa vožnje regalnega dvigala pri šestkratnem delovnem krogu.

### 1.1 AS/RS z enojno pomično mizo

Značilen AS/RS z enojno-pomično mizo ima regalno dvigalo, ki prenaša TSE k določenim skladiščnim položajem ali od njih na obeh straneh regalnega hodnika. Velike dvižne razdalje, velike hitrosti v vodoravni in navpični smeri, natančno rokovanje in nadzorovano premikanje so pomembni značilnosti regalnega dvigala. Regalno dvigalo se sestoji iz pomičnega okvirja, ki vodi in podpira dvižno mizo, na kateri so položene TSE. Pomična miza ali teleskopska naprava na dvižni mizi vodi TSE v položaj v skladiščnem regalu in iz njega. AS/RS z enojno pomično mizo se nanašajo na EK ali DK.

EK se sestoji iz skladiščnega ali odpremnega opravila. Pri uskladiščenju je EK sestavljen iz časa za nalaganje TSE na V/I položaju, vožnje do skladiščnega položaja, odlaganje TSE na omenjenem položaju ter vrnitve na V/I položaj. EK za odpremo je izveden podobno [10].

DK obsega hkrati uskladiščenje in odpremo. DK obsega čas za nalaganje TSE na V/I lokaciji, vožnjo do skladiščne lokacije, odlaganje TSE v skladiščni regal, prazno vožnjo do odpremnega položaja,

velocities are used for the horizontal and vertical travel.

- The pickup and deposit times associated with the TUL's handling are assumed to be constant and, therefore, these could easily be added to the cycle time expressions.
- The S/R machine operates either on the SC, DC, QC or STC.
- For the "Strategy x" heuristics, a block of  $n$  occupied locations is available for retrievals sequencing and there are a block of  $m$  initial open locations for storage sequencing in the SR.

Notations:

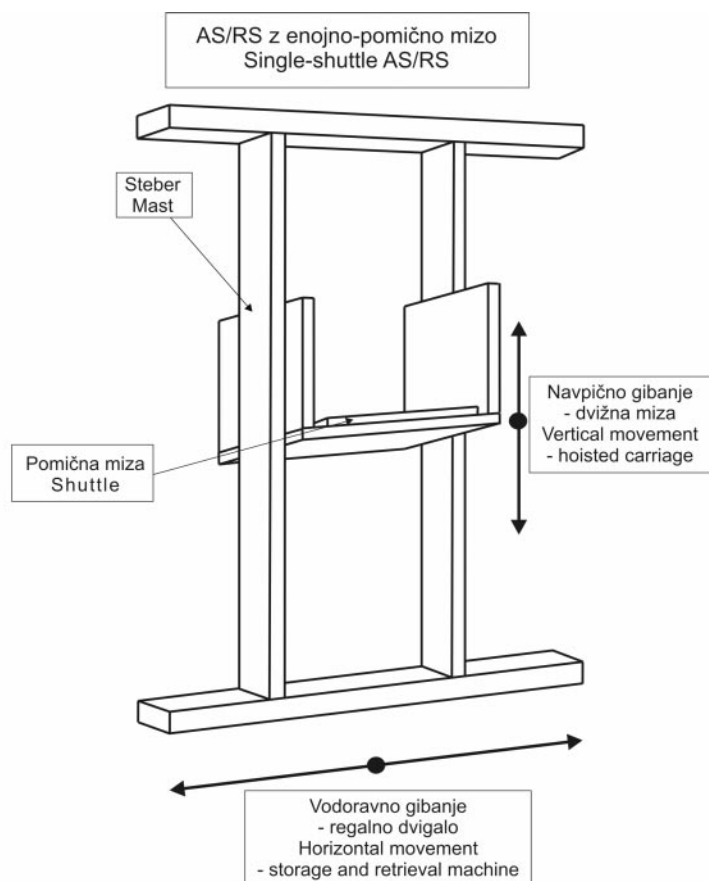
- $v_x$  velocity of the S/R machine in the horizontal direction,
- $v_y$  velocity of the S/R machine in the vertical direction,
- $a_x$  acceleration/deceleration of the S/R machine in the horizontal direction,
- $a_y$  acceleration/deceleration of the S/R machine in the vertical direction,
- $H$  height of the SR,
- $L$  length of the SR,
- $E(T(SA))$  the expected one-way travel time,
- $E(T(SC))$  the expected single command travel time,
- $E(T(DC))$  the expected dual command travel time,
- $E(T(QC))$  the expected quadruple command travel time,
- $E(T(STC))$  the expected sextuple command travel time.

### 1.1 Single-shuttle AS/RS

A typical single-shuttle AS/RS has an S/R machine that moves TULs to or from specific storage locations on either side of the picking aisle. High lifting distances, high velocity in horizontal and vertical directions, precise handling and controlled movement are important features of the S/R machine. The S/R machine consist of a travelling structural frame, which guides and supports a hoisted carriage on which the TUL is placed [12]. The shuttle or extraction device on the hoisted carriage manipulates TULs into and out of the SR position. The single-shuttle AS/RS corresponds to SC or to DC.

The SC consists of either the storage or retrieval operation. For storage, the SC consists of the time to pickup the TUL at the I/O location, travel to the storage location, depositing the TUL at that location and the return to the I/O location. The SC for a retrieval operation is developed similarly [10].

The DC involves both storage and retrieval operations simultaneously. The DC involves the time to pickup the TUL at the I/O location, travel to the storage location, placing the TUL in the SR, traveling empty to the retrieval location, retrieving the TUL,



Sl. 1. Regalno dvigalo za AS/RS z enojno pomično mizo  
Fig. 1. The S/R machine for single-shuttle AS/RS

odpremo TSE ter vrnitev in odlaganje TSE na V/I položaja [10].

V literaturi poznamo mnogo matematičnih izrazov za določitev delovnega kroga AS/RS. V nadaljevanju bodo predstavljeni modeli, ki so jih predlagali Bozer in White [2] ter Gudehus [6].

Bozer in White [2] sta razširila analitične izraze predhodno predstavljene pri Hausmanu in sodelavcih [8] ter Gravesu in sodelavcih [5]. Izpeljala sta analitične modele za določitev statističnega povprečja EK in DK za regalna skladišča, ki niso SIT. Model temelji na naključnem skladiščenju, z upoštevanjem alternativnih V/I položajev in postavitve regalnega dvigala v regalnem hodniku. V analitičnih modelih nista upoštevala vpliva pospeševanja in pojemanja. Na podlagi naključnega skladiščenja in odpreme PPPP so določena statistična povprečja za različne oblike skladiščnega opravila, sledi [13]:

- Izračun izmer skladiščnega regala v času

$$t_x = \frac{L}{v_x} \quad t_y = \frac{H}{v_y} \quad (1)$$

Naj bo  $T$  faktor velikosti in  $b$  faktor oblike skladiščnega regala:

$$T = \max(t_x, t_y) \quad b = \min\left(\frac{t_x}{T}, \frac{t_y}{T}\right) \quad (2)$$

returning and depositing the TUL at the I/O location [10].

Many formulas for the cycle-time calculation of the AS/RS can be found in the literature. In what follows the expressions of Bozer and White [2] and Gudehus [6] will be presented.

Bozer and White [2] have extended the analytical expressions that were previously presented by Hausman et al. [8] and Graves et al. [5]. They developed analytical models for the expected single and dual command cycles for the non-SIT racks. The models are based on randomized storage, where the alternative I/O locations and various dwell-point strategies for the S/R machine were considered. In the analytical expressions the influences of acceleration and deceleration were not considered. According to randomized storage and FCFS retrieval requests, the expected travel-time estimation for different kinds of operation are determined as follows [13]:

- Computation of the dimensions for the SR in time

- Izračun statističnega povprečja za različne delovne kroge

Statistično povprečje časa vožnje regalnega dvigala za eno smer v skladiščnem regalu:

$$E(T(SA)) = \left[ \frac{1}{2} + \frac{b^2}{6} \right] \cdot T \quad (3).$$

Statistično povprečje časa vožnje regalnega dvigala pri enojnem delovnem krogu:

$$E(T(SC)) = \left[ 1 + \frac{b^2}{3} \right] \cdot T \quad (4).$$

Statistično povprečje časa vožnje regalnega dvigala med dvema skladiščnima položajema:

$$E(T(TB)) = \left[ \frac{1}{3} + \frac{b^2}{6} - \frac{b^3}{30} \right] \cdot T \quad (5).$$

Statistično povprečje časa vožnje regalnega dvigala pri dvojnem delovnem krogu:

$$E(T(DC)) = \left[ \frac{4}{3} + \frac{b^2}{2} - \frac{b^3}{30} \right] \cdot T \quad (6).$$

Vpliva razmerja pospeševanja in pojemanja sta upoštevana v analitičnih izrazih Gudehus [6]. Predstavljeni analitični modeli veljajo samo za skladiščne regale, pri katerih je faktor oblike  $b$  enak 1

- Computation of the expected travel times for different cycles

Expected one-way travel time:

Expected single command travel time:

Expected travel between time component for dual command cycle:

Expected dual command travel time:

The influence of acceleration and deceleration rate on the analytical expressions are considered by Gudehus [6]. The presented analytical models are valid only for the SR shape factor  $b = 1$

$$b = \frac{v_x}{v_z} \cdot \frac{H}{L} \quad (7).$$

S spodnjimi izrazi lahko določimo statistično povprečje za različne delovne kroge. Statistično povprečje časa vožnje regalnega dvigala za eno smer v skladiščnem regalu:

$$E(T(SA)) = \frac{1}{2} \left( \frac{v_x}{a_x} + \frac{v_y}{a_y} \right) + \frac{2}{3} \cdot \frac{L}{v_x} \quad (8).$$

Statistično povprečje časa vožnje regalnega dvigala pri enojnem delovnem krogu:

$$E(T(SC)) = \left( \frac{v_x}{a_x} + \frac{v_y}{a_y} \right) + \frac{4}{3} \cdot \frac{L}{v_x} \quad (9).$$

Statistično povprečje časa vožnje regalnega dvigala med dvema skladiščnima položajema:

$$E(T(TB)) = \frac{1}{2} \left( \frac{v_x}{a_x} + \frac{v_z}{a_z} \right) + \frac{14}{30} \frac{L}{v_x} \quad (10).$$

Statistično povprečje časa vožnje regalnega dvigala pri dvojnem delovnem krogu:

$$E(T(DC)) = \frac{3}{2} \left( \frac{v_x}{a_x} + \frac{v_y}{a_y} \right) + \frac{4}{3} \frac{L}{v_x} + \frac{14}{30} \frac{L}{v_x} \quad (11).$$

## 1.2 AS/RS z večpomičnimi mizami

V predloženem prispevku temelji analiza AS/RS z večpomičnimi mizami na pristopu diskretnih simulacij. Analitične modele za ŠK in ŠEK za AS/RS z več-pomičnimi mizami so predstavili avtorji Meller in Mungwatana [13] ter Keserla in Peters [10]. Z namenom, da bi dosegli največje zmogljivost AS/RS (npr. kratki časi vožnje regalnega dvigala), moramo uporabiti ustrezno domiselno metodo. V nadaljevanju bo predstavljena domiselna metoda "strategija x" za

## 1.2 Multi-shuttle AS/RS

In the presented study of multi-shuttle AS/RS, the analysis is based on the discrete event simulations approach. Analytical models for the QC and STC of multi-shuttle AS/RS operation were developed by Meller and Mungwatana [13] and Keserla and Peters [10]. In order to achieve the maximum efficiency of the AS/RS (e.g., short travel times) the proper heuristics strategy should be used. The use of heuristics "Strategy x", for the case of

primera AS/RS z dvojnopomično in trojnopomično mizo, ki je bila uporabljena v predloženem prispevku.

### 1.2.1 AS/RS z dvojnopomično mizo

V primeru AS/RS z dvojnopomično mizo se uporablja posebna tehnična izvedba regalnega dvigala, ki lahko prenaša dve TSE hkrati. Poenostavljena oblika regalnega dvigala (glej sl. 2) sestoji iz pomičnega okvira, ki vodi in podpira dvižno mizo. Dve pomični mizi ali teleskopski napravi na dvižni mizi neodvisno vodita TSE v položaj v skladiščnem regalu in iz njega.

AS/RS z dvojno pomično mizo se nanaša na ŠK in določa regalnemu dvigalu, da obiše dva skladiščna in dva odpremna položaja v skladiščnem regalu. Učinkovit način za izvedbo omenjene določitve je, da sledimo zaporedju zahtev po uskladičenju in odpremi z namenom, da bo čas prazne vožnje regalnega dvigala najmanjši [13]. Zaporedje zahtev za uskladičenje in odpremo je mogoče natančno določiti z uporabo domiselne metode - "strategije x".

Algoritem za izvedbo te domiselne metode lahko zapišemo na naslednji način. Naj predstavlja  $S_n$  množico  $n$  začetnih praznih položajev in  $R_m$  množico  $m$  odprem, primernih za izvedbo zaporedja v skladiščnem regalu.

Algoritem "strategije x" v primeru AS/RS z dvojnopomično mizo:

#### 1) Izbira dveh skladiščnih položajev v SR

$$(S_1, S_2, \dots, S_n \in S) \quad (S_1, S_2) \in S$$

#### 2) Izbira dveh odpremnih položajev v SR

$$(R_1, R_2, \dots, R_n \in R) \quad (R_1, R_2) \in R$$

#### 3) Določitev zaporedja za obisk dveh skladiščnih in dveh odpremnih položajev

$$(S_1, S_2)^{\text{Naraščajoča "strategija x"}} \quad (R_1, R_2)^{\text{Padajoča "strategija x"}}$$

#### 4) Izvedba skladiščne operacije štirikratnega delovnega kroga

Skladiščno opravilo - uskladičenje TSE (naraščajoča "strategija x")

1. uskladišči  $S_1$ , če velja pogoj  $x_{S_1} < x_{S_2}$ ,
2. uskladišči  $S_2$ .

Skladiščno opravilo - odprema TSE (padajoča "strategija x")

1. odpremi  $R_1$ , če velja pogoj  $x_{R_1} > x_{R_2}$ ,
2. odpremi  $R_2$ .

#### 5) Določitev pretočnih zmogljivosti pri enem delovnem krogu

$$\lambda_{QC} = (2 \cdot S + 2 \cdot R) = 4 \left[ \frac{TSE}{cikel} \right] \quad (12).$$

Statistično povprečje časa vožnje regalnega dvigala pri štirikratnem delovnem krogu je enako statističnemu povprečju časa vožnje regalnega

dual-shuttle and triple-shuttle AS/RS, is discussed in the following study.

### 1.2.1 Dual-shuttle AS/RS

In the case of dual-shuttle AS/RS, a special design of S/R machine, which can carry two TULs simultaneously, is used. The simplified configuration of the S/R machine (see Fig. 2) consists of the traveling structural frame, which guides and supports a hoisted carriage. Two shuttles or extraction devices on the hoisted carriage manipulate the TULs into and out of the SR position independently [12].

The dual-shuttle AS/RS corresponds to the QC and requires the S/R machine to visit two storage and two retrieval locations in the SR. An efficient way to perform this command is to sequence storage and retrieval requests with the condition that the empty travel of the S/R machine will be minimised (see also Meller and Mungwatana [13]). The possibility to sequence storage and retrieval requests is to follow the heuristics, which will be further presented.

The algorithm for performing "Strategy x" can be written with the following procedure. Let  $S_n$  be the set of  $n$  initial open locations and  $R_m$  the set of  $m$  retrievals available for sequencing in the SR.

The "Strategy x" in the case of dual-shuttle AS/RS operates as follows:

#### 1) Selection of two storage locations in the SR

$$(S_1, S_2, \dots, S_n \in S) \quad (S_1, S_2) \in S$$

#### 2) Selection of two retrieval locations in the SR

$$(R_1, R_2, \dots, R_n \in R) \quad (R_1, R_2) \in R$$

#### 3) Determination of the sequence for visiting two storage and two retrieval locations

$$(S_1, S_2)^{\text{Increasing "Strategy x"}} \quad (R_1, R_2)^{\text{Decreasing "Strategy x"}}$$

#### 4) Performance of the storage operation under quadruple command cycle

Storage operation-storage of TULs (increasing "Strategy x")

1. Storage  $S_1$ , if the condition  $x_{S_1} < x_{S_2}$  is true,
2. Storage  $S_2$ .

Storage operation-retrieval of TULs (decreasing "Strategy x")

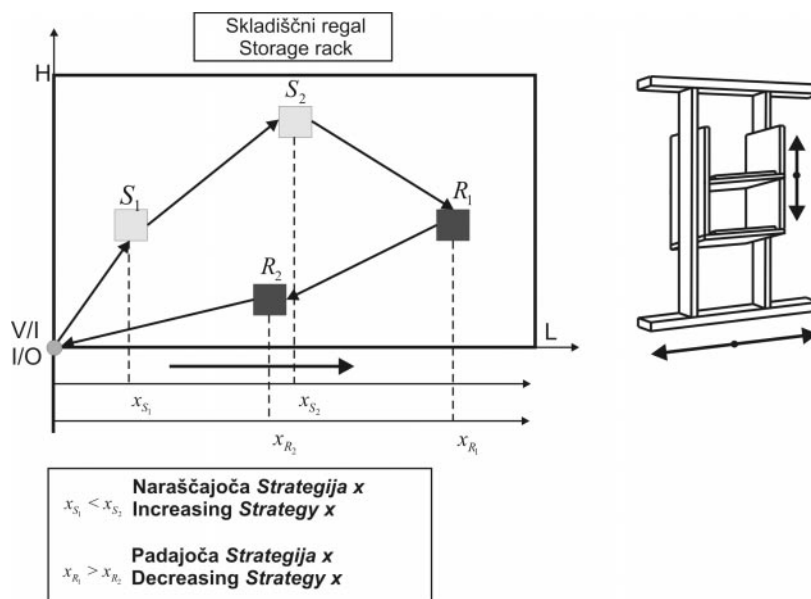
1. Retrieve  $R_1$ , if the condition  $x_{R_1} > x_{R_2}$  is true,
2. Retrieve  $R_2$ .

#### 5) Determination of the throughput capacity in a quadruple command cycle

$$\lambda_{QC} = (2 \cdot S + 2 \cdot R) = 4 \left[ \frac{TUL's}{cycle} \right] \quad (12).$$

The expected quadruple command travel time consists of the expected single command travel time  $E(T(SC))$  and three expected travel





Sl. 2. Štirikratni delovni krog  
Fig. 2. Quadruple command cycle

dvigala pri enojnem delovnem krogu  $E(T(SC))$  ter trem statističnim povprečjem časa vožnje regalnega dvigala med dvema skladiščnima položajema  $E(T(TB))$  v skladiščnem regalju.

times between the time components  $E(T(TB))$  in the SR.

$$E(T(QC)) = E(T(SC)) + 3 \cdot E(T(TB)) \quad (13).$$

Statistično povprečje časa za izvedbo štirikratnega delovnega kroga povečamo za vrednost vseh rokovanj, ki nastanejo pri izvedbi skladiščnega opravila (nalaganje in odlaganje TSE, razpoznavanje TSE itn.).

The expected quadruple command cycle time is enlarged for all the manipulations related to the TUL's handling (pickup and deposit of TULs, identification of TULs etc.)

$$E(QC) = E(T(QC)) + \sum T_m \quad (14).$$

### 1.2.2 AS/RS s trojno pomično mizo

V primeru AS/RS s trojno pomično mizo se uporablja posebna konstrukcijska izvedba regalnega dvigala, ki lahko prenaša tri TSE hkrati. Regalno dvigalo (sl. 3) se sestoji iz pomičnega okvira, ki vodi in podpira dvižno mizo. Tri pomične mize ali teleskopske naprave na dvižni mizi vodijo neodvisno TSE v položaj v skladiščnem regalju in iz njega.

AS/RS s trojno pomično mizo se nanaša na ŠEK in določa regalnemu dvigalu, da obišče tri skladiščne in tri odpreme položaje v skladiščnem regalju. Prav tako kakor v AS/RS z dvema pomičnima mizama je učinkovit način za izvedbo omenjene zahteve, da sledimo zaporedju zahtev po uskladiščenju in odpremi z namenom, da bo čas prazne vožnje regalnega dvigala najmanjši.

Naj predstavlja  $S_n$  množico  $n$  začetnih praznih položajev in  $R_m$  množico  $m$  odprem, primernih za izvedbo zaporedja v SR.

Algoritem "strategije x" v primeru AS/RS s trojno pomično mizo:

### 1.2.2 Triple-shuttle AS/RS

In the case of the triple-shuttle AS/RS, a special design of the S/R machine, which can carry three TULs simultaneously, is used. The S/R machine (see Figure 3) consists of the travelling structural frame, which guides and supports a hoisted carriage. Three shuttles or extraction devices on the hoisted carriage manipulate the TULs into and out of the SR position independently [12].

The triple-shuttle AS/RS corresponds to STC and requires the S/R machine to visit three storage and three retrieval locations in the SR. As well as in the dual-shuttle AS/RS, an efficient way to perform this command is to sequence storage and retrieval requests with condition that the empty travel of the S/R machine will be minimal.

Let  $S_n$  be the set of  $n$  initial open locations and  $R_m$  the set of  $m$  retrievals available for sequencing in the SR.

The "Strategy x" in case of triple-shuttle AS/RS operates as follows:

**1) Izbira treh skladiščnih položajev v SR**

$$(S_1, S_2, S_3, \dots, S_n \in S) (S_1, S_2, S_3) \in S$$

**2) Izbira treh odpremnih položajev v SR**

$$(R_1, R_2, R_3, \dots, R_n \in R) (R_1, R_2, R_3) \in R$$

**3) Določitev zaporedja za obisk treh skladiščnih in treh odpremnih položajev**

$$(S_1, S_2, S_3)^{\text{Naraščajoča "strategija x"}} (R_1, R_2, R_3)^{\text{Padajoča "strategija x"}}$$

**4) Izvedba skladiščnega opravila šestkratnega delovnega kroga**

Skladiščno opravilo - uskladičenje TSE (naraščajoča "strategija x")

1. Uskladišči  $S_1$ , če velja pogoj  $x_{S_1} < x_{S_2} < x_{S_3}$ .
2. Uskladišči  $S_2$ , če velja pogoj  $x_{S_2} < x_{S_3}$ .
3. Uskladišči  $S_3$ .

Skladiščno opravilo odprema TSE (padajoča "strategija x")

1. Odpremi  $R_1$ , če velja pogoj  $x_{R_1} > x_{R_2} > x_{R_3}$ .
2. Odpremi  $R_2$ , če velja pogoj  $x_{R_2} > x_{R_3}$ .
3. Odpremi  $R_3$ .

**5) Določitev pretočnih zmogljivosti pri enem delovnem krogu**

$$\lambda_{STC} = (3 \cdot S + 3 \cdot R) = 6 \left[ \frac{TSE}{\text{cikel}} \right] \quad (15).$$

Statistično povprečje časa vožnje regalnega dvigala pri šestkratnem delovnem krogu je enako statističnemu povprečju časa vožnje regalnega dvigala pri enojnem delovnem krogu  $E(T(SC))$  ter petim statističnim povprečjem časa vožnje regalnega dvigala med dvema skladiščnima položajema  $E(T(TB))$  v skladiščnem regalu.

**1) Selection of three storage locations in the SR**

$$(S_1, S_2, S_3, \dots, S_n \in S) (S_1, S_2, S_3) \in S$$

**2) Selection of three retrieval locations in the SR**

$$(R_1, R_2, R_3, \dots, R_n \in R) (R_1, R_2, R_3) \in R$$

**3) Determination of the sequence for visiting three storage and three retrieval locations**

$$(S_1, S_2, S_3)^{\text{Increasing "Strategy x"}} (R_1, R_2, R_3)^{\text{Decreasing "Strategy x"}}$$

**4) Performance of the storage operation under sextuple command cycle**

Storage operation-storage of TULs (increasing Strategy x)

1. Storage  $S_1$ , if the condition  $x_{S_1} < x_{S_2} < x_{S_3}$  is true.
2. Storage  $S_2$ , if the condition  $x_{S_2} < x_{S_3}$  is true.
3. Storage  $S_3$ .

Storage operation-retrieval of TULs (decreasing "Strategy x")

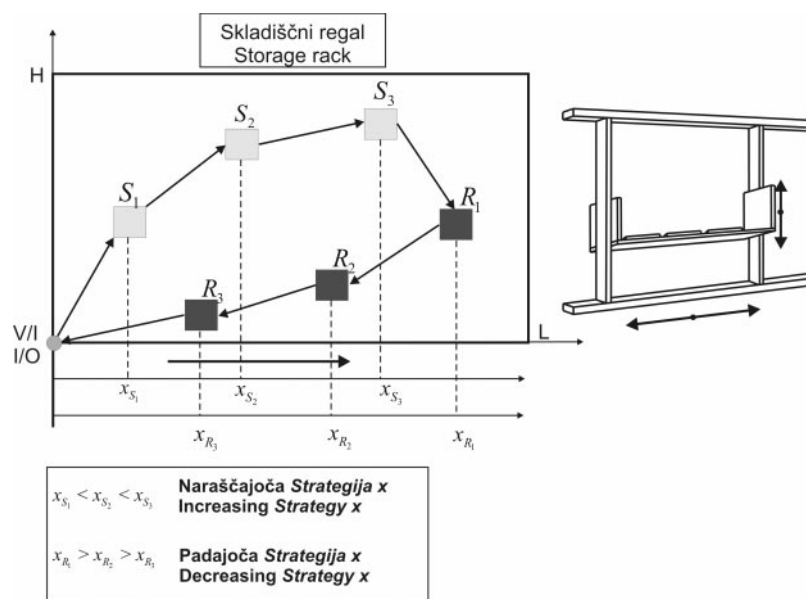
1. Retrieve  $R_1$ , if the condition  $x_{R_1} > x_{R_2} > x_{R_3}$  is true.
2. Retrieve  $R_2$ , if the condition  $x_{R_2} > x_{R_3}$  is true.
3. Retrieve  $R_3$ .

**5) Determination of throughput capacity in one cycle**

$$\lambda_{STC} = (3 \cdot S + 3 \cdot R) = 6 \left[ \frac{TULs}{\text{cycle}} \right] \quad (15).$$

The expected sextuple command travel time consists of the expected single command travel time  $E(T(SC))$  and five expected travel times between time components  $E(T(TB))$  in the SR.

$$E(T(STC)) = E(T(SC)) + 5 \cdot E(T(TB)) \quad (16).$$



Sl. 3. Šestkratni delovni krog  
Fig. 3. Sextuple command cycle

Statistično povprečje časa za izvedbo šestkratnega delovnega kroga, povečamo za vrednost vseh rokovanj, ki nastanejo pri izvedbi skladiščnega opravila (nalaganje in odlaganje TSE, razpoznavanje TSE itn.).

The expected sextuple command cycle time is enlarged for all the manipulations related to TUL's handling (pickup and deposit of TULs, identification of TULs).

$$E(STC) = E(T(STC)) + \sum T_m \quad (17).$$

## 2 SIMULACIJSKI MODEL AS/RS

Za ovrednotenje zmogljivosti AS/RS z enojno pomično mizo, v primerjavi z večpomičnimi mizami, smo uporabili metodo diskretnih simulacij. Simulacijski model AS/RS je sestavljen iz dveh delov skladiščnih regalov, regalnega dvigala, V/I položaja in zveznega transporterja. Model je bil izdelan in analiziran s programskim paketom "AutoMod" [3].

Na podlagi pregleda literature in praktičnih izkušenj smo ugotovili, da pomenijo (i) različne oblike skladiščnih regalov, (ii) zmogljivosti regalnega dvigala in (iii) upravljalna strategija velik vpliv na povprečen čas vožnje regalnega dvigala. Zatorej smo uporabili v simulacijski analizi pet različnih tipov skladiščnih regalov, ki so predstavljeni v preglednici 1.

Glede na zmogljivost regalnega dvigala smo uporabili devetnajst najpogosteje uporabljenih hitrostnih profilov za pomik regalnega dvigala v vodoravni in pomične mize v navpični smeri. V

## 2 SIMULATION MODEL OF THE AS/RS

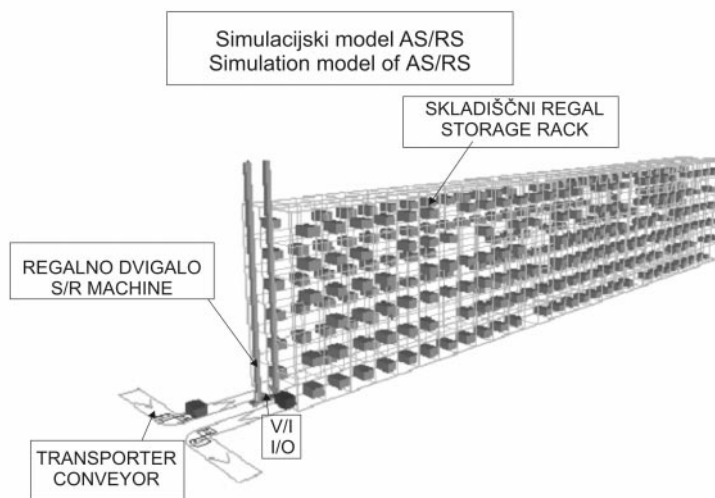
To facilitate the performance evaluation and comparison of the single-shuttle AS/RS versus multi-shuttle AS/RS, a discrete event simulation was employed. The simulation model of the AS/RS consists of two lines of SR, S/R machine, I/O location and accumulating conveyors, and was defined using the "AutoMod" computer software [3].

From the literature and practical experiences it has been found that (i) different layouts of the SR (ii) the efficiency of the S/R machine and (iii) the control policies have a tremendous influence on the average travel time. Therefore, five different layouts of the SR were used in the simulation analyses, which are presented in Table 1.

According to the efficiency of the S/R machine, nineteen different velocity profiles were used for the translation in the horizontal and vertical directions. Therefore, two completely independent

Preglednica 1. *Pet različnih tipov skladiščnih regalov*  
Table 1. *Five different layouts of the SR*

Skladiščni regal Storage rack	L (m)	H (m)	Zalogovna velikost Rack capacity
SR 30/6	30	6	360
SR 20/13	20	13	520
SR 45/10	45	10	900
SR 60/13	60	13	1560
SR 80/20	80	20	3200



Sl. 4. *Simulacijski model AS/RS z enojno pomično mizo*  
Fig. 4. *Simulation model of the single-shuttle AS/RS*

Preglednica 2. Zmogljivost regalnega dvigala

Table 2. The efficiency of the S/R machine

Zmogljivost regalnega dvigala	Vodoravno gibanje regalnega dvigala		Navpično gibanje dvižne mize	
	Horizontal movement of the S/R machine		Vertical movement of the hoisting carriage	
	$v_x$ (m/s)	$a_x$ (m/s <sup>2</sup> )	$v_y$ (m/s)	$a_y$ (m/s <sup>2</sup> )
V <sub>1</sub>	2	1	1,5	0,75
V <sub>2</sub>	2	1	1,5	1,5
V <sub>3</sub>	2	2	1,5	0,75
V <sub>4</sub>	2	2	1,5	1,5
V <sub>5</sub>	4	1	1,5	0,75
V <sub>6</sub>	4	1	1,5	1,5
V <sub>7</sub>	4	2	1,5	0,75
V <sub>8</sub>	4	2	1,5	1,5
V <sub>9</sub>	4	3	1,5	0,75
V <sub>10</sub>	4	3	1,5	1,5
V <sub>11</sub>	4	1	3	0,75
V <sub>12</sub>	4	1	3	1,5
V <sub>13</sub>	4	1	3	2,25
V <sub>14</sub>	4	2	3	0,75
V <sub>15</sub>	4	2	3	1,5
V <sub>16</sub>	4	2	3	2,25
V <sub>17</sub>	4	3	3	0,75
V <sub>18</sub>	4	3	3	1,5
V <sub>19</sub>	4	3	3	2,25

preglednici 2 sta s parametrom zmogljivosti  $V_i$  predstavljena dva popolnoma neodvisna mehanska pogona za vodoravno in navpično gibanje. Upoštevali smo tudi pospeševanje in pojemanje regalnega dvigala.

Prav tako kakor oblika skladiščnega regala in zmogljivost regalnega dvigala ima tudi upravljalno pravilo pomemben vpliv na povprečni čas vožnje regalnega dvigala. V primeru AS/RS z enojno pomično mizo smo za uskladičenje TSE uporabili strategijo naključnega skladiščenja, medtem ko smo za odpremo TSE uporabili strategijo po pravilu PPPP. V primeru AS/RS z večpomičnimi mizami smo za uskladičenje in odpremo uporabili predhodno omenjeno "strategijo x". Za vsak posamezen tip AS/RS (oblika skladiščnega regala, zmogljivost regalnega dvigala in sistem z enojno pomično v primerjavi z več-pomičnimi mizami) smo osnovni simulacijski model AS/RS primerno prilagajali.

## 2.1 Izdelava osnovnega AS/RS

V nadaljevanju bo prikazana določitev postopka za AS/RS z enojno pomično in večpomičnimi mizami.

### 2.1.1 Postopek izvedbe simulacije za AS/RS z enojno pomično mizo

Simulacija AS/RS se prične s postopkom, ki na podlagi določenih spremenljivk označi vsa prosta mesta v skladiščnem regalu. Ko je določen

mechanical drives (horizontal and vertical), which are presented with the efficiency parameter  $V_i$ , are presented in Table 2. The acceleration and deceleration of the S/R machine have also been considered.

Like the layout of the SR and the efficiency of the S/R machine, the control policy also has a significant share on the average travel time. For the single-shuttle AS/RS, the general randomized storage policy and the FCFS order picking assignment policy were applied; however, for the multi-shuttle AS/RS, the heuristics storage and order picking assignment policy, "Strategy x", were applied. For every single type of AS/RS (the layout of the SR, the efficiency of the S/R machine and the single in comparison with multi-shuttle AS/RS) the general simulation model of AS/RS has been suitably modified.

## 2.1 Development of the general AS/RS

In the following, the determination of the simulation procedure for the single and multi-shuttle AS/RS will be presented.

### 2.1.1 Single-shuttle AS/RS

The simulation of the AS/RS starts with the process of indicating all the storage locations in the SR, on the basis of definite variables. After creating



seznam prostih skladiščnih mest, se prične simulacija prihoda TSE. Po končanem transportu s tekočim trakom je TSE na V/I položaju, ki leži v spodnjem levem robu regalnega skladišča. TSE sprejme oznako, ki ji določa skladiščni položaj v skladiščnem regalu. Regalno dvigalo prevzame TSE na V/I položaju, jo naloži s pomično mizo na dvižno mizo in jo dostavi na določen skladiščni položaj v skladiščnem regalu. Za opravilo uskladiščenja je bila uporabljena strategija naključnega skladiščenja. Vsako TSE, ki je bila uskladiščena, zapišemo na čakalno listo. Skladiščenje TSE se izvaja tako dolgo, dokler se skladišče ne zapolni do določene stopnje (npr. 80 %). Ob prekoračitvi stopnje napolnjenosti se sproži postopek odpreme TSE. Pri opraviu odpreme smo uporabili pravilo PPPP. V nadaljevanju potuje regalno dvigalo na odpremni položaj TSE, ki jo s pomično mizo naloži na dvižno mizo ter jo dostavi na V/I položaj. Pri izvedbi skladiščnega opravila deluje regalno dvigalo na temelju DK.

### 2.1.2 Postopek izvedbe simulacije za AS/RS s trojno pomično mizo

Podobno kakor pri AS/RS z enojno pomično mizo, se tudi v tem primeru simulacija prične s postopkom, ki označi vsa prosta mesta v skladiščnem regalu. Po končanem transportu z zveznim transporterjem se TSE na V/I položaju, ki leži v spodnjem levem robu regalnega skladišča. V nadaljevanju TSE sprejme oznako, ki ji določa skladiščni položaj v skladiščnem regalu. Regalno dvigalo prevzame TSE na V/I položaju, jih naloži s pomičnimi mizami na dvižno mizo in jih dostavi na določen skladiščni položaj v skladiščnem regalu. S tremi praznimi položaji ( $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ ) potuje regalno dvigalo od V/I položaja do najbližjega skladiščnega položaja, na primer  $S_1$ . Po uskladiščenju prve TSE potuje regalno dvigalo do drugega skladiščnega položaja  $S_2$ , saj je le-ta bližje  $S_1$  kakor  $S_3$ . Dalje potuje regalno dvigalo do zadnjega skladiščnega položaja  $S_3$  (sl. 7). Za opravilo uskladiščenja je bila uporabljena naraščajoča "strategija x". TSE, ki so bile uskladiščene, so vpisane na čakalno listo. Skladiščenje se izvaja tako dolgo, dokler se skladišče ne zapolni do določene stopnje (npr. 80 %). Ob prekoračitvi stopnje napolnjenosti se sproži nov postopek odpreme. Iz zadnjega skladiščnega položaja  $S_3$  potuje regalno dvigalo do najbližjega od treh odpremnih položajev ( $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ), na primer  $R_1$ . Dalje, s prvega odpremnega položaja  $R_1$  potuje regalno dvigalo do najbližjega od preostalih odpremnih položajev  $R_2$ , saj je le-to bližje k  $R_1$  kakor  $R_3$ . Po odpremi druge TSE potuje regalno dvigalo k zadnjemu odpremnemu položaju  $R_3$ . Nazadnje se regalno dvigalo vrne na V/I položaj kjer so TSE pripravljene, da zapustijo AS/RS. Pri opraviu odpreme je bila uporabljena padajoča "strategija x". Pri izvedbi

the list of free storage locations, the AS/RS's first TULs are entered. Through concluded transport with accumulating conveyor, the TULs are situated in the I/O location, which lies at the lower left-hand corner of the SR. Next, the TULs receive a sign, which is dedicated to the storage location in the SR. The S/R machine picks up the TUL from the I/O location, loads it into the shuttle at the hoisting carriage and moves it to the prescribed storage location in the SR. For the storage operation, randomized storage assignment policy was used. Each TUL that has been stored in the SR is then recorded by a computer on a waiting list. The storage operation is performed until the warehouse does not reach a certain degree of fullness (e.g., 80 %). In the case of overriding the degree of fullness, a new retrieval process starts. For the retrieval operation the FCFS request selection rule was used. Next, the S/R machine travels to the retrieval location of the TUL, loads it into the shuttle and delivers it to the I/O location. In performing the storage operation, the S/R machine operates on the dual command cycle.

### 2.1.2 Multi-shuttle AS/RS (triple-shuttle AS/RS)

Like for the single-shuttle AS/RS, the simulation of the AS/RS starts with the process that indicates all the storage location in the SR. After the concluded transport with an accumulating conveyor the TULs are situated in the I/O location, which lies at the lower left-hand corner of the SR. Next, the TULs receive the signs, which are dedicated to the storage locations in the SR. The S/R machine picks up the TULs from the I/O location, loads them into the shuttles, and moves them to the prescribed storage locations in the SR. With three open locations (e.g.,  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ ), the S/R machine moves from the I/O location to the closest storage location, for example,  $S_1$ . After storing the first TUL, the S/R machine moves to the second storage location, which is  $S_2$  since it is closer to  $S_1$  than  $S_3$ . Next, the S/R machine moves to the last storage location  $S_3$ . For the storage operation the increasing "Strategy x" storage assignment policy was used. TULs that have been already stored are then recorded by a computer on the waiting list. The storage operation is performed until the warehouse does not reach a certain degree of fullness (e.g., 80 %). In the case of overriding the degree of fullness, a new retrieval process starts. From the last storage location  $S_3$ , the S/R machine moves toward to the closest of three retrieval locations (e.g.,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ), for instance  $R_1$ . Next, from the first retrieval location  $R_1$ , the S/R machine moves to the closest of the remaining two retrieval locations, which is  $R_2$ , since it is closer to  $R_1$  than  $R_3$ . After the retrieval of the second TUL, the S/R machine moves to the last retrieval location  $R_3$ . Finally, the S/R machine returns to the I/O location when the TULs are ready to depart from the system. For the retrieval operation the decreasing "Strategy x" request

skladišnega opravila deluje regalno dvigalo na podlagi ŠEK.

Povprečni čas vožnje regalnega dvigala glede na AS/RS z večpomičnimi mizami je daljši v primerjavi z AS/RS z enojno pomično mizo. Kljub temu, da je povprečni čas vožnje regalnega dvigala daljši, dosežemo večje pretočne zmogljivosti, saj regalno dvigalo omogoča uskladiščenje in odpremo več TSE hkrati. Za vsak posamezen tip AS/RS je bil izdelan poseben simulacijski model, tako da smo lahko prilagajali osnovni simulacijski model.

## 2.2 Izvajanje in rezultati simulacij

S programskim modulom "AutoStat" smo za vsako posamezno izvedbo AS/RS analizirali povprečne čase vožnje regalnega dvigala. Pred začetkom simulacijske analize smo določili vhodne podatke za izvedbo simulacije.

V uporabljenem simulacijskem modelu pomeni  $T$  povprečen čas vožnje regalnega dvigala, definiran z " $v\_Time$ ", ki je enak vsoti časov  $T_i$ , potrebnih za uskladiščenje in odpremo TSE.

$$T = \sum_i T_i \quad (18).$$

Za AS/RS z enojno-pomično mizo pomeni " $v\_Time$ " vsoto povprečnega časa vožnje regalnega dvigala za enojni delovni krog in vožnjo regalnega dvigala med dvema skladiščnima položajema, kar pomeni dvojni delovni krog. Za AS/RS z večpomičnimi mizami pomeni " $v\_Time$ " vsoto povprečnega časa vožnje regalnega dvigala za enojni delovni krog in tri ali pet voženj regalnega dvigala med dvema skladiščnima položajema, kar pomeni štirikratni oziroma šestkratni delovni krog. Povprečni čas vožnje regalnega dvigala za AS/RS z enojno pomično in večpomičnimi mizami pomeni razmerje med vsoto časov vožnje regalnega dvigala in številom izvedenih krogov:

$$T(DC)_{average} = \frac{\sum_i^m T(DC)}{m} \quad (19)$$

$$T(QC)_{average} = \frac{\sum_i^m T(QC)}{m} \quad (20)$$

$$T(STC)_{average} = \frac{\sum_i^m T(STC)}{m} \quad (21).$$

Preglednica 3. Vhodni podatki za izvedbo simulacije  
Table 3. Input data for the simulation analysis

SR 30/6 – V <sub>1</sub>	
Frekvenca prihoda (s <sup>-1</sup> ) / Arrival frequency (s <sup>-1</sup> )	45
Ogrevanje modela (ure) / Warmup period (hours)	5
Čas izvajanja simulacij (ure) / Simulation time (hours)	40
Število zaporednih simulacij / Number of successive simulations	5

selection rule was used. In performing storage operation, the S/R machine operates on the sextuple command cycle.

The average travel time, according to the multi-shuttle AS/RS, is longer than the single-shuttle AS/RS. Despite a longer average travel time, higher throughput capacities are achieved, since the S/R machine manipulates several TULs simultaneously. For every single type of AS/RS a special simulation model was performed in such a way that the general simulation model was supplemented.

## 2.2 Performance and the results of the simulations

For every single realization of the AS/RS the average travel times were analysed using the program module "Auto Stat" [3]. Before starting the simulation analysis, the input data were determined.

In the present simulation model,  $T$  represents the average travel time, defined with " $v\_Time$ ", which consist of the sum of times  $T_i$ , necessary for the storage and retrieval of TULs.

For the single-shuttle AS/RS represents the variable " $v\_Time$ ", the sum of the average travel time for a single command cycle T(SC) and the average travel lines between the time component T(BT), which gives us the necessary average travel time for the dual command cycle T(DC). For the multi-shuttle AS/RS represents the variable " $v\_Time$ ", the sum of the average travel time for the single command cycle T(SC) and three or five average travel times between the time components T(BT), which gives us the necessary time for the average travel time for quadruple T(QC) and sextuple command cycle T(STC). The average travel time for the single and multi-shuttle AS/RS represents the relation between the sums of the travel times with the number of performed cycles

Pri določitvi celotnega povprečnega časa delovnega kroga moramo upoštevati dodatne čase  $T_m$ , ki nastanejo pri rokovanju TSE (razpoznavanje TSE, nalaganje in odlaganje TSE itn.). Povprečni čas dvojnega, štirikratnega in šestkratnega delovnega kroga je tako:

$$T(DC) = T(DC)_{average} + \sum_i T_m \quad \sum_i T_m = 10 \text{ sec} \quad (22)$$

$$T(QC) = T(QC)_{average} + \sum_i T_m \quad \sum_i T_m = 22 \text{ sec} \quad (23)$$

$$T(STC) = T(STC)_{average} + \sum_i T_m \quad \sum_i T_m = 30 \text{ sec} \quad (24).$$

Glede na izračunan povprečni čas delovnega kroga lahko določimo pretočno zmogljivost  $\lambda$  (TSE/uro) posamezne izvedbe AS/RS. Pretočna zmogljivost AS/RS z enojno pomično in večpomičnimi mizami je določena z naslednjimi izrazi:

$$\lambda_{DC} = \left[ \left[ \frac{3600}{T(DC)} \right] \cdot 2 \right] \quad (25)$$

$$\lambda_{QC} = \left[ \left[ \frac{3600}{T(QC)} \right] \cdot 4 \right] \quad (26)$$

$$\lambda_{STC} = \left[ \left[ \frac{3600}{T(STC)} \right] \cdot 6 \right] \quad (27).$$

Glavni namen simulacijske analize AS/RS z enojno pomično in več pomičnimi mizami je določitev odvisnosti med povprečnim časom delovnega kroga in pretočnih zmogljivosti za vsak določen AS/RS. Podrobna pojasnitev simulacijske analize je prikazana v naslednjem poglavju.

### 2.3 Analiza rezultatov

Povprečni časi delovnega kroga in pretočne zmogljivosti za AS/RS z enojno pomično in več-

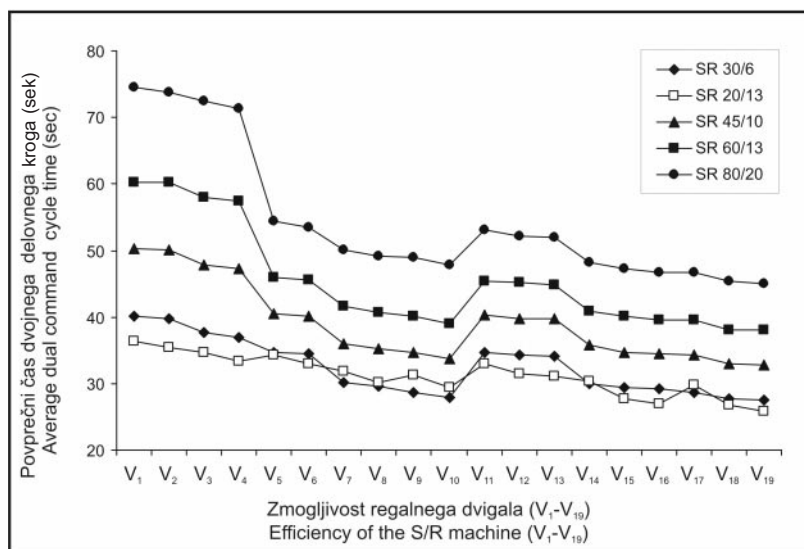
The additional time  $T_m$ , which is associated with the manipulation of the TULs, must also be considered in the determination of the average cycle time (identification of TULs, pickup and deposit times for TULs etc.). Therefore, the average cycle time now becomes:

The throughput capacity  $\lambda$  (TUL's/hour) of the individual variant of AS/RS can be determined according to the computed average cycle time. The throughput capacities for single and multi-shuttle AS/RS are determined with the following expressions;

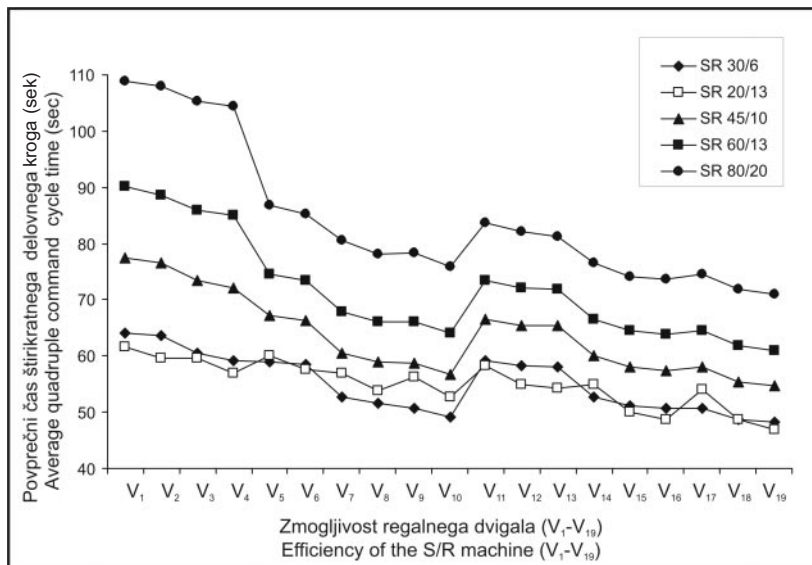
The main purpose of the simulation analysis of the single and multi-shuttle AS/RS is a determination of the relationship between the average cycle times and the throughput capacities for each defined AS/RS. A detailed explanation of the simulation analyses is presented in the next section.

### 2.3 Analysis of the results

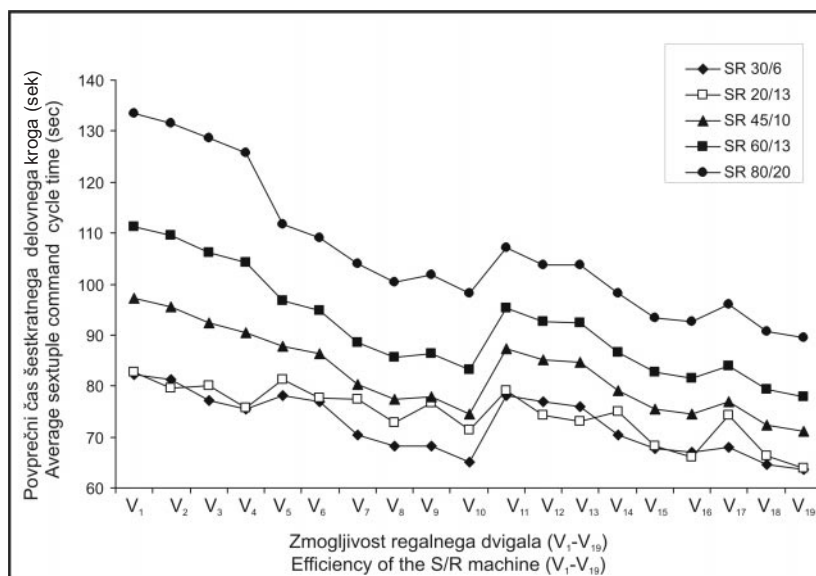
Average cycle times and throughput capacities for the single and multi-shuttle AS/RS,



Sl. 5. Porazdelitev povprečnega časa dvojnega delovnega kroga  
Fig. 5. Distribution of the average dual command cycle time



Sl. 6. Porazdelitev povprečnega časa štirikratnega delovnega kroga  
 Fig. 6. Distribution of average quadruple command cycle time



Sl. 7. Porazdelitev povprečnega časa šestkratnega delovnega kroga  
 Fig. 7. Distribution of average sextuple command cycle time

pomičnimi mizami, ki so predstavljeni na slikah 5, 6, 7, so podani na temelju izvedene simulacijske analize. Analize so bile izvedene za pet različnih oblik skladiščnih regalov in devetnajst različnih zmogljivosti regalnega dvigala.

### 2.3.1 Povprečni čas delovnega kroga

#### (i) Geometrija skladiščnega regala

Glede na porazdelitev povprečnega časa dvojnega, štirikratnega in šestkratnega delovnega kroga za pet različnih oblik skladiščnih regalov (sl. 5, 6, 7) je očitno, da ima geometrija skladiščnega regala bistveni vpliv na povprečni čas delovnega kroga. Najnižji povprečni čas delovnega kroga, glede na tip AS/RS, pripada

which are presented in the following figures 5, 6, 7, are given on the basis of the performed simulation analyses. The analyses were conducted for five different layouts of the SR and nineteen different efficiencies of the S/R machine.

### 2.3.1 Average cycle times

#### (i) The SR geometry

According to the distribution of the average dual, quadruple and sextuple command cycle times for five different layouts of the SR (Figures 5, 6, 7), it is obvious that the SR geometry has a significant impact on the average cycle time. The lowest average cycle times according to the types of AS/RS belong to the



tipu regalnega skladišča SR 20/13 in SR 30/6. Najdaljši povprečni rokovalni čas delovnega cikla pripada regalnemu skladišču SR 80/20. Poudariti je treba, da ima SR 80/20 šestkrat večjo zalogovno velikost od SR 20/13. Glavni sklep je, da ima geometrijska oblika skladiščnega regala (dolžina  $L$  in višina  $H$ ) velik vpliv na povprečni čas delovnega kroga. Torej, pri določitvi tipa AS/RS pomeni geometrijska oblika skladiščnega regala pomemben podatek.

#### (ii) Zmogljivost regalnega dvigala

Drugi pomembni dejavnik je zmogljivost regalnega dvigala (preglednica 2), ki smo jo analizirali glede na pet različnih oblik skladiščnih regalov in tipov AS/RS. Izrazit vpliv povprečnega časa delovnega kroga, glede na spremembo zmogljivosti regalnega dvigala, velja za SR 80/20. V prvih štirih točkah lahko opazimo razmeroma majhne spremembe na povprečnem času delovnega kroga (sl. 5, 6, 7), kar prikazuje nepomemben vpliv pospeševanja, pojemanja in navpični hitrosti glede na obliko skladiščnega regala. Zmanjšanje povprečnega časa delovnega kroga se pojavi v točki  $V_5$ , v kateri naraste hitrost v vodoravni smeri, hitrost v navpični smeri pa ostane enaka, kar potrjuje domnevo, da je komponenta hitrosti  $v_x$  za omenjene skladiščne regale najpomembnejša. Sledi padanje rokovalnega časa, vse do točke  $V_{11}$ , kjer vrednost hitrosti v vodoravni smeri  $v_x$  ponovno doseže vrednost hitrosti v točki  $V_5$ , medtem ko se poveča hitrost v navpični smeri  $v_y$ . Povečanje hitrosti v vodoravni in navpični smeri povzroči ponovno padanje povprečnega časa delovnega kroga (sl. 5, 6, 7). Skladiščni regal 80/20 ima izrazit vpliv na povprečni čas delovnega kroga glede na obliko skladiščnega regala (dolgi SR  $L/v_x \gg H/v_y$ ). Kljub veliki hitrosti ( $v_x = 4 \text{ m/s}$ ) ima vožnja regalnega dvigala pogosto hitrostno-časovno odvisnost pospeševanja, vožnje z ustaljeno hitrostjo in pojemanja (sl. 8).

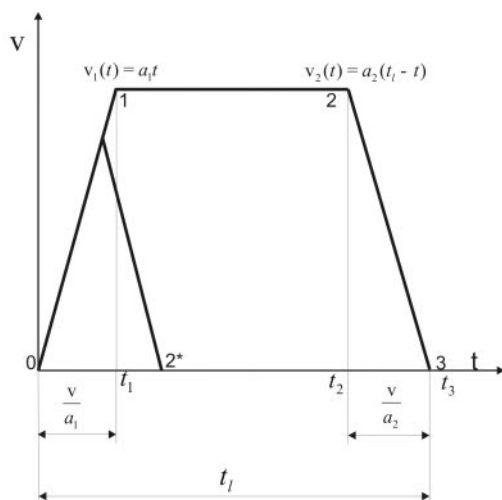
Drugače velja za SR 20/13, ki ima neizrazito težnjo glede na zmogljivost regalnega dvigala in kjer

type of storage rack SR 20/13 and SR 30/6, while the largest average cycle times belong to the type of storage rack SR 80/20. It must be emphasized that the SR 80/20 has a six-times-greater capacity than the SR 20/13. The main conclusion is that the SR geometry (length  $L$  and height  $H$  of the SR) has a great influence on the average cycle times. Therefore, when determining the type of AS/RS, the SR geometry represents significant information.

#### (ii) The efficiency of the S/R machine

Another significant factor is the efficiency of the S/R machine (Table 2), which was analysed according to the five different layouts of the SR and types of the AS/RS. An expressive tendency, due to the change of efficiency of the S/R machine, is shown by storage rack SR 80/20. Relatively small changes in the average cycle times are observed for the first few points (Figures 5, 6, 7), which shows the insignificant influence of acceleration, deceleration and vertical velocity due to the layout of the SR. A decrease of the average cycle time arises at point  $V_5$ , where the horizontal velocity is increased, while the vertical velocity remains the same, which just confirms that for such a SR  $v_x$  is the most important. The decreasing tendency of the average cycle times continues until point  $V_{11}$ . The value of the horizontal velocity ( $V_{11}$ ) again becomes equal to velocity at point  $V_5$ , while vertical velocity is increased. Increased vertical and horizontal velocities cause once again a decreasing tendency of average cycle times (Figures 5, 6, 7). The SR 80/20 has an expressive tendency according to the layout of the SR (long SR  $L/v_x \gg H/v_y$ ). Despite the high velocity travels ( $v_x = 4 \text{ m/s}$ ), the S/R machine usually with velocity-time relationship according to acceleration, uniform velocity and deceleration (Figure 8).

In other cases, for the storage rack SR 20/13, the relationship of the average command cycle



Sl. 8. Hitrostno-časovna odvisnost regalnega dvigala  
Fig. 8. Velocity-time relationship of the S/R machine

odvisnost povprečnega časa delovnega kroga ni tako bistvena. Kljub povečanju hitrosti v vodoravni smeri (točka  $V_5$  na sliki 5, 6, 7), ne dosežemo večjega vpliva na vrednost povprečnega časa delovnega cikla zaradi oblike skladiščnega regala (kratki SR  $L/v_x \geq H/v_y$ ). Kljub veliki zmogljivosti regalnega dvigala dosežemo največjo hitrost le v redkih primerih, zaradi razmeroma kratkih razdalj v skladiščnem regalu. Vožnja regalnega dvigala ima pogosto hitrostno-časovno odvisnost, ki obsega vpliv pospeševanja in pojemanja (sl. 8).

Na splošno lahko opazimo, da dosežemo najboljše rezultate pri izvedbi regalnega dvigala, ki ima najzmogljivejše pogone za vožnjo v vodoravni in navpični smeri. Sklepamo lahko, da se izrazite razlike vrednosti povprečnega časa delovnega kroga pojavijo zaradi posledice spremembe hitrosti v horizontalni smeri in manj v vertikalni smeri.

### (iii) Odvisnost med AS/RS z enojno-pomično in večpomičnimi mizami

Primerjava med T(DC), T(QC) in T(STC) kaže na veliko povečanje povprečnega časa delovnega kroga za AS/RS z večpomičnimi mizami. Slednje lahko razložimo z dejstvom, da regalno dvigalo potrebuje več časa za obisk skladiščnih položajev pri ŠK in ŠEK glede na DK. Poudariti moramo, da bi bil povprečni čas delovnega kroga še večji, če ne bi za AS/RS z več-pomičnimi mizami uporabili domiselno metodo - "strategijo x". Kljub daljšim povprečnim časom delovnega kroga za AS/RS z večpomičnimi mizami dosežemo večje pretočne zmogljivosti, saj sprejme regalno dvigalo več TSE hkrati.

Sklenemo lahko, da so geometrijska oblika skladiščnega regala, zmogljivost regalnega dvigala in vrsta upravljalne strategije najpomembnejši

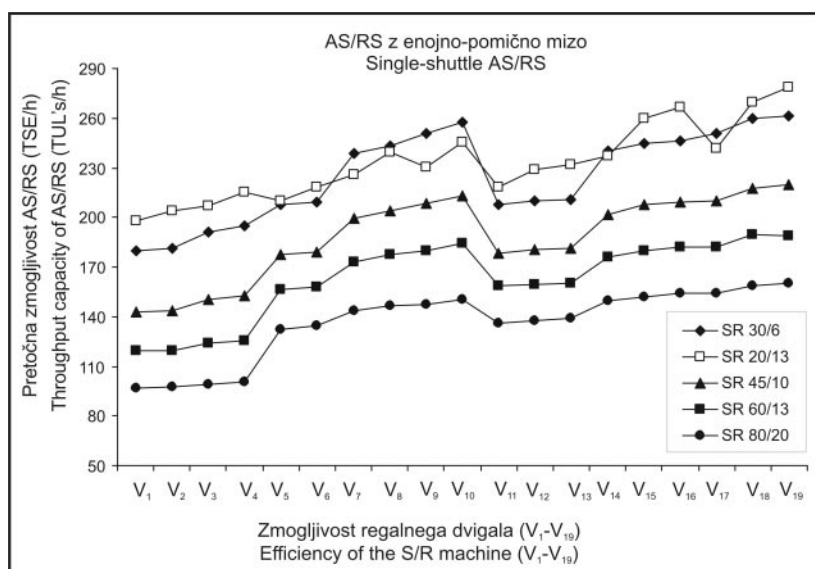
time is not so essential, which has inexpressive tendency according to the efficiency of the S/R machine. Due to the increasing horizontal velocity (point  $V_5$  on Figures 5, 6, 7), major changes in the average cycle times are not achieved because of the layout of the SR (short SR  $L/v_x \geq H/v_y$ ). In spite of the great efficiency of the S/R machine the maximum velocity hardly reached, due to the relatively short distances in the SR. The S/R machine travels in many instances on the basis of velocity-time relationship, which is associated with the acceleration and deceleration (Figure 8).

Generally, the best results are achieved with the S/R machine, which has the efficient drives for horizontal and vertical travelling. It can be concluded that the expressive differences in the average cycle times originate as a result of changing the horizontal velocity  $v_x$  and less as a result of changing the vertical velocity  $v_y$ .

### (iii) The relationship between the single and multi-shuttle AS/RS

A comparison of the T(DC), T(QC) and T(STC) shows a large increase in the average cycle times. This can be explained by the fact that the S/R machine requires more time to visit all the storage locations under QC and STC, due to DC. It must be emphasised that the average travel time would be even higher if heuristics "Strategy x" in the multi-shuttle AS/RS had not been used. Despite the longer average cycle times for the multi-shuttle AS/RS, higher throughput capacities are achieved, since the S/R machine manipulates several TULs simultaneously.

The conclusion is that the SR geometry, the efficiency of the S/R machine and the type of control policy are the most significant parameters and that



Sl. 9. Porazdelitev pretočne zmogljivosti za AS/RS z enojno pomično mizo  
Fig. 9. Distribution of throughput capacities under single-shuttle AS/RS

parametri v AS/RS in imajo velik vpliv na povprečni čas delovnega kroga.

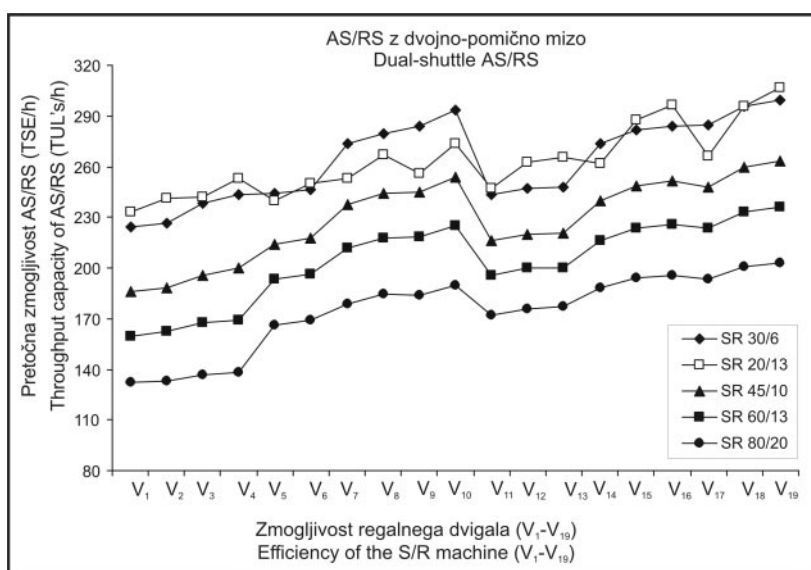
they have a major influence on the average cycle time.

### 2.3.2 Pretočna zmogljivost

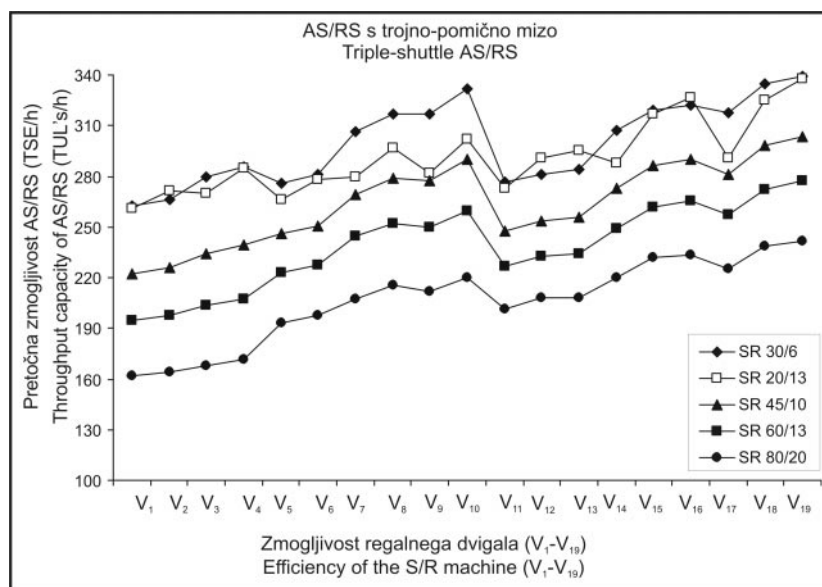
### 2.3.2 Throughput capacities

Na slikah 9, 10, 11 so prikazane porazdelitve pretočne zmogljivosti za AS/RS z enojno-pomično in večpomičnimi mizami, glede na različne oblike skladiščnih regalov in zmogljivosti regalnega dvigala. Po izvedenih analizah za T(DC), T(QC) in T(STC) in izrazov (25), (26), (27) (poglavje 2.2) je očitno, da imata SR 20/13 in SR 30/6 največje pretočne zmogljivosti. Najmanjše pretočne zmogljivosti lahko opazimo za SR 80/20. Očitno je, da sta povprečni čas delovnega kroga in pretočna zmogljivost obratno sorazmerna.

Distributions of the throughput capacities under the single and multi-shuttle AS/RS according to different layouts of the SR and the efficiency of the S/R machine are presented in Figures 9, 10, 11. On the basis of the performed analyses for T(DC), T(QC) and T(STC) and the equations 25, 26, 27 (section 2.2) it is evident that the storage racks SR 20/13 and SR 30/6 have the highest throughput capacities. The lowest throughput capacities are observed for the storage rack SR 80/20. It is obvious that the average cycle times and throughput



Sl. 10. Porazdelitev pretočne zmogljivosti za AS/RS z dvojno pomično mizo  
Fig. 10. Distribution of throughput capacities under dual-shuttle AS/RS



Sl. 11. Porazdelitev pretočne zmogljivosti za AS/RS s trojno pomično mizo  
Fig. 11. Distribution of throughput capacities under triple-shuttle AS/RS

Pri majhnih vrednostih povprečnega časa delovnega kroga so pretočne zmogljivosti visoke in nasprotno, pri večjih vrednostih povprečnega časa delovnega kroga so pretočne zmogljivosti manjše.

Na splošno izkazujejo AS/RS z večpomičnimi mizami v primerjavi z AS/RS z eno pomično mizo pomembno izboljšanje pretočnih zmogljivosti. Izboljšanje pretočnih zmogljivosti glede na ŠEK je vidno v primerjavi z DK in bo podrobno predstavljeno za naslednji primer.

### 2.3.2.1 Primerjava med AS/RS z enojno pomično in večpomičnimi mizami

Primerjava med AS/RS z enojno pomično in večpomičnimi mizami je predstavljena za naslednji primer. Analiza se nanaša na SR 30/6 in zmogljivost regalnega dvigala -  $V_1$ .

Pri čemer so:

- $T$  povprečni čas vožnje regalnega dvigala,
- $SD$  standardni odmik,
- $max. T$  največji čas vožnje regalnega dvigala,
- $min. T$  najmanjši čas vožnje regalnega dvigala,
- $\Sigma T_m$  časi, ki so povezani z rokovanjem TSE,
- $\lambda$  pretočna zmogljivost.

(i) Povprečni čas delovnega kroga za DK, ŠK in ŠEK:

$$T(DC) = T(DC)_{average} + \sum_i T_m = 40,044 \text{ s} \quad (28)$$

$$T(QC) = T(QC)_{average} + \sum_i T_m = 64,125 \text{ s} \quad (29)$$

$$T(SC) = T(SC)_{average} + \sum_i T_m = 82,308 \text{ s} \quad (30)$$

(ii) Pretočna zmogljivost za DK, ŠK in ŠEK:

$$\lambda_{DC} = \left[ \left[ \frac{3600}{T(DC)} \right] \cdot 2 \right] = 180 \left[ \frac{TSE/TUL}{h} \right] \quad (31)$$

$$\lambda_{QC} = \left[ \left[ \frac{3600}{T(QC)} \right] \cdot 4 \right] = 225 \left[ \frac{TSE/TUL}{h} \right] \quad (32)$$

$$\lambda_{SC} = \left[ \left[ \frac{3600}{T(SC)} \right] \cdot 6 \right] = 262 \left[ \frac{TSE/TUL}{h} \right] \quad (33)$$

(iii) Izboljšanje pretočne zmogljivosti za AS/RS z večpomičnimi mizami, glede na AS/RS z enojno pomično mizo:

capacities are inversely dependent. With lower values of the average cycle times, the throughput capacities are higher, and inversely, with the higher values of the average cycle times, the throughput capacities are lower.

In general, the multi-shuttle AS/RS in comparison with the single-shuttle AS/RS shows significant improvements in the throughput capacity. The throughput-capacity improvement according to the STC is evidential in comparison with the DC, and will be presented in detail in the following case.

### 2.3.2.1 Comparison of the single and multi-shuttle AS/RS

A comparison of single-shuttle versus multi-shuttle AS/RS is presented for the following case. The analysis relates to the storage rack SR 30/6 and the efficiency of the S/R machine  $V_1$ .

Where:

- $T$  average travel time,
- $SD$  standard deviation,
- $max. T$  maximum travel time,
- $min. T$  minimum travel time,
- $\Sigma T_m$  times associated with manipulation of the TULs,
- $\lambda$  throughput capacity.

(i) Average cycle times for DC, QC and STC:

(ii) Throughput capacities for DC, QC and STC:

(iii) Throughput-capacity improvement of multi-shuttle AS/RS in comparison with single-shuttle AS/RS:

Preglednica 4. Rezultati simulacijske analize

Table 4. Results of the simulation analysis

SR 30/6 - $V_1$	$T$ (s)	$SD$ (s)	$max. T$ (s)	$min. T$ (s)	$\Sigma T_m$ (s)	$\lambda$ (TSE/h) (TUL/h)
T(DC)	30,044	9,49	66,45	11,95	10	180
T(QC)	42,125	7,58	74,80	23,13	22	225
T(SC)	52,308	6,20	78,78	34,37	30	262



$$\mu_{QC}^{DC} = \frac{Q_{QC} - Q_{DC}}{Q_{DC}} \cdot 100 = 25\% \quad (34)$$

$$\mu_{STC}^{QC} = \frac{Q_{STC} - Q_{QC}}{Q_{QC}} \cdot 100 = 16,45\% \quad (35)$$

$$\mu_{STC}^{DC} = \frac{Q_{STC} - Q_{DC}}{Q_{DC}} \cdot 100 = 45,56\% \quad (36).$$

Izboljšanje pretočne zmogljivosti glede na AS/RS z večpomičnimi mizami (QC-25 %) in (STC-45 %) je očitno v primerjavi z AS/RS z enojno pomično mizo. Izboljšanje pretočne zmogljivosti lahko izloči enega ali več regalnih hodnikov, s čimer dosežemo velike prihranke pri investiciji. Čeprav so AS/RS z večpomičnimi mizami dražji od AS/RS z enojno pomično mizo, je lahko omenjeno povečanje manjše od povečanja pri varčevanju glede na izločitev regalnega hodnika. Podobne ugotovitve sta predstavila tudi Keserla in Peters [10]. Kljub povečanju pretočne zmogljivosti za AS/RS z večpomičnimi mizami, priporočamo dodatno gospodarnostno analizo obravnavanega sistema. Torej, predstavljeni rezultati lahko na splošno pomagajo načrtovalcem skladišč pri začetnih odločitvah projekta o izbiri tipa AS/RS, glede na pretočno zmogljivost TSE.

### 3 PRIMER NAČRTOVANJA AS/RS Z UPORABO REZULTATOV SIMULACIJSKE ANALIZE

V nadaljevanju je prikazan primer načrtovanja AS/RS, pri katerem smo uporabili rezultate, predstavljene v poglavju 2.

#### 3.1 Načrtovanje AS/RS

Pri načrtovanju AS/RS sta pomembna parametra zalogovna velikost  $Q$  in pretočna zmogljivost  $\lambda$ . Podatke za zalogovna velikost in pretočna zmogljivost dobimo z opazovanjem in statistično analizo predhodnega poslovanja podjetja. Naj obsega želena zalogovna velikost 3200 regalnih mest, pri čemer moramo zagotoviti zahtevano pretočno zmogljivost  $\lambda_{v/i} = 180$  TSE/uro. Izhodiščni parametri:

- $Q = 3200$  TSE,
- $\lambda_{vhod} = 90$  TSE/uro,
- $\lambda_{izhod} = 90$  TSE/uro.

#### 3.2 Določitev izmer SR (oblika SR)

Pri načrtovanju AS/RS se pogosto srečujemo z omejitvami, ki jih moramo upoštevati pri določitvi izmer skladiščnega regala. Glede na podani tloris in višino skladiščnega prostora, moramo izbrati ustrezno obliko skladiščnega regala. V nadaljevanju se odločimo za tip skladiščnega regala SR 80/20 dolžine ( $L = 80$  m) in višine ( $H = 20$  m). Zalogovna velikost omenjenega skladiščnega regala znaša 3200

The throughput-capacity improvement according to the multi-shuttle AS/RS (QC-25 %) and (STC-45 %) is evident in comparison to the single-shuttle AS/RS. The improvement of the throughput capacity could eliminate one or more aisle and therefore large savings can be achieved. Even though a multi-shuttle AS/RS is more expensive than a single-shuttle AS/RS, this increase may be less than the increase in the savings due to the elimination of the aisles. Similar conclusions have also been presented by Keserla and Peters [10]. Hence, in spite of the increased throughput capacity of the multi-shuttle AS/RS, an additional economic analysis of these systems is recommended. Therefore, the presented results could, generally, help warehouse planners to decide in the early stage of the project, which type of AS/RS will be installed due to the TUL's turnover.

### 3 EXAMPLE OF THE DESIGN PROCESS OF THE AS/RS USING THE RESULTS OF SIMULATION ANALYSES

In the following an example of the design process of the AS/RS, using results obtained in section 2, of the simulation analyses of the single and multi-shuttle AS/RS, is presented.

#### 3.1 Design process of the AS/RS

In the design process of the AS/RS rack the capacity  $Q$  and throughput capacity  $\lambda$  represent important information. Data for the  $Q$  and  $\lambda$  is acquired from the observation and statistical analyses of previous company operation. Let the required  $Q$  contain 3200 pallet places, from which are desired throughput capacity  $\lambda_{v/o} = 180$  TULs/hour has to be ensured. The starting-point parameters:

- $Q = 3200$  TULs,
- $\lambda_{input} = 90$  TULs/hour,
- $\lambda_{output} = 90$  TULs/hour.

#### 3.2 Determination of the SR dimensions (layout of the SR)

In the design process of the AS/RS, the restrictions that have to be considered when determining the SR layout, have to be fulfilled. The suitable shape of the SR has to be determined according to the given ground plan and the height of the warehouse. In the presented case a storage rack SR 80/20 with length ( $L = 80$  m) and height ( $H = 20$  m) was chosen. The rack capacity  $Q$  is 3200 pallet

regalnih mest, pri čemer je prostornina vsakega regalnega okna enaka  $1 \text{ m}^3$  (1 m v dolžino, 1 m v višino in 1 m v širino).

places. It was assumed that each rack opening is a cube that equals  $1 \text{ m}^3$  (1 m in length, 1 m in height and 1 m in width).

### 3.3 Izbira AS/RS z enojno pomično ali večpomičnimi mizami

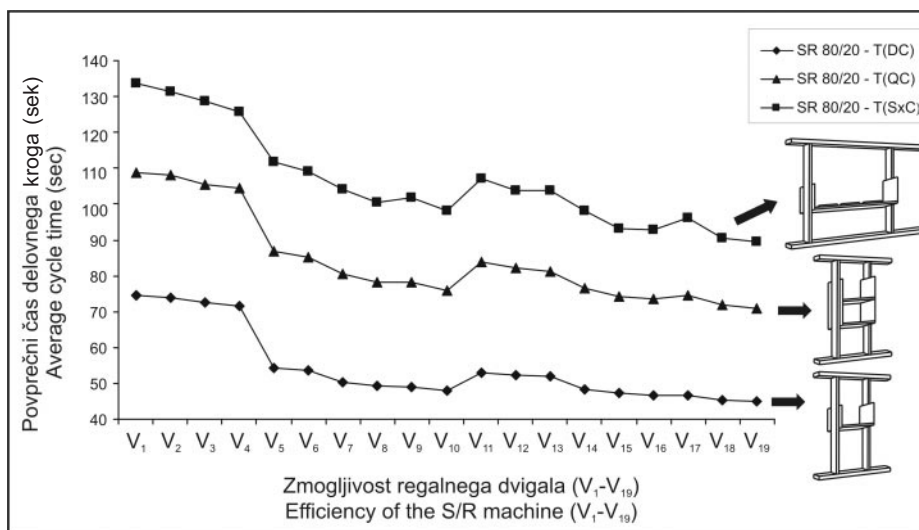
### 3.3 Selection of the AS/RS-SS or the AS/RS-MS

Pri izbiri AS/RS z enojno pomično in večpomičnimi mizami si pomagamo z odvisnostmi povprečnega časa delovnega kroga in pretočnih zmogljivosti. Predstavljena odvisnost povprečnega časa delovnega kroga in pretočnih zmogljivosti se nanaša na SR 80/20.

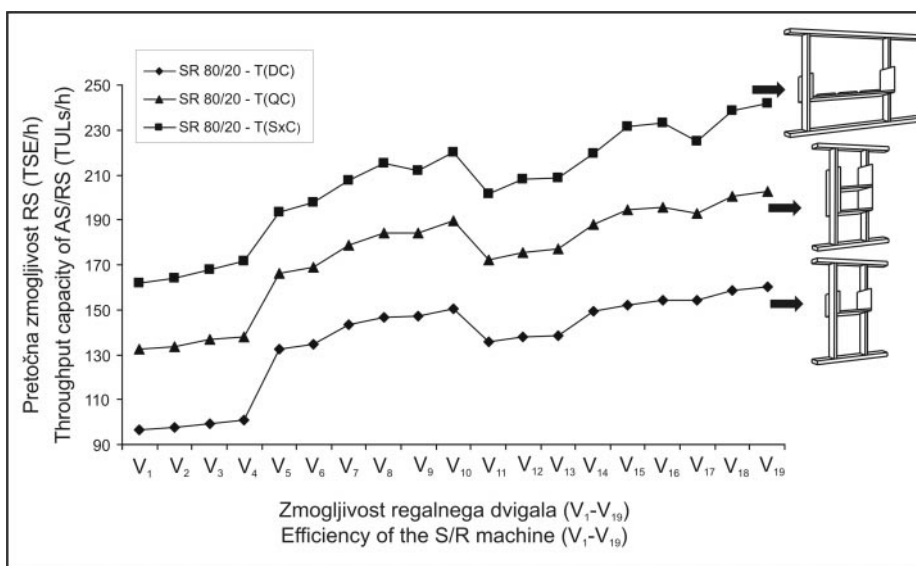
The relationships of average cycle times and throughput capacities helped when choosing single- or multi-shuttle AS/RS. The presented relationship of the average cycle times and throughput capacities are related to the storage rack SR 80/20.

Glede na zahtevano pretočno zmogljivost ( $\lambda_{V/I} = 180 \text{ TSE/uro}$ ), izberemo AS/RS s trojno pomično mizo in zmogljivostjo regalnega dvigala –

According to throughput capacity ( $\lambda_{V/I} = 180 \text{ TULs/hour}$ ), the triple-shuttle AS/RS with the efficiency of the S/R machine  $V_{19}$  was chosen. For the chosen AS/RS the maximum throughput capacity



Sl. 12. Porazdelitev povprečnega časa delovnega kroga AS/RS z enojno-pomično in večpomičnimi mizami  
 Fig. 12. Distribution of the average cycle times under single- and multi-shuttle AS/RS



Sl. 13. Porazdelitev pretočnih zmogljivosti AS/RS z enojno-pomično in večpomičnimi mizami  
 Fig. 13. Distribution of the throughput capacities under single- and multi-shuttle

$V_{19}$ . Največja pretočna zmogljivost za izbran AS/RS je enaka  $\lambda_{max} = 242$  TSE/uro, ki pa ne upošteva omejitev pri obratovanju AS/RS. Le-ta se nanaša na okvare in popravila regalnega dvigala in preostale rokavalne opreme, vzdrževanje opreme, izpad električne energije ter druge dejavnike, ki bistveno vplivajo na zmogljivost AS/RS. Z namenom, da zajamemo in upoštevamo omenjene vplive, moramo določiti dejansko zmogljivost AS/RS, ki bo zadostovala izbrani vhodni in izhodni pretočni zmogljivosti.

### 3.4 Zmogljivost AS/RS

#### (i) Največja zmogljivost pri STC

$$E_{f_{max}} = 3600/89,376 = 40 \text{ 1/h} \quad (37).$$

$$T(\text{STC}) = 89,376 \text{ s}$$

Največja zmogljivost AS/RS s trojno pomično mizo znaša 40 krogov/uro, pri čemer niso upoštevani časi za odpravo morebitnih okvar in popravil opreme, vzdrževanje opreme, izpad električne energije ipd. Povprečen čas šestkratnega delovnega kroga T(STC) je bil določen s simulacijsko analizo (sl. 13).

#### (ii) Dejanska zmogljivost pri STC

$$E_{f_{real}} = 0,81 \cdot 40 = 32 \text{ 1/h} \quad (38).$$

\* (0,61 - 0,81) – rezerva zmogljivosti / efficiency reserve

Pri največji zmogljivosti upoštevamo tudi rezervo zmogljivosti, ki upošteva zgoraj navedene omejitve. Z upoštevanjem rezerve zmogljivosti znaša dejanska zmogljivost pri šestkratnem delovnem krogu samo 32 krogov/uro.

#### (iii) Povprečni čas šestkratnega delovnega kroga in dejanska pretočna zmogljivost

$$T(\text{STC}) = 3600/32 = 112,5 \text{ s} \quad (39)$$

$$\lambda_{real} = (3600/112,5) \cdot 6 = 192 \text{ 1/h} \quad (40).$$

Glede na dejanske pretočne zmogljivosti  $\lambda_{real}$  lahko ugotovimo, da izbrano AS/RS s trojno pomično mizo ustreza načrtovani pretočni zmogljivosti. Izbrano regalno dvigalo doseže  $\Delta\lambda^* = 6,67\%$  večjo zmogljivost glede na predpisano pretočno zmogljivost.

$$\Delta\lambda^* = \frac{192 - 180}{180} \cdot 100 \quad (41).$$

#### 4 SKLEP

V prispevku je predstavljen simulacijski model AS/RS z enojno pomično in večpomičnimi

is  $\lambda_{max} = 242$  TULs/hour, which does not take into account the restrictions when operating the AS/RS. This is related to the errors and repairs of the S/R machine and the remaining equipment, the maintenance of the equipment, the loss of the electrical power and other factors, which have a significant influence on the AS/RS's efficiency. With the goal to achieve the main influencing parameters, the real AS/RS efficiency has to be determined, which will be sufficient for the chosen input/output throughput capacity.

### 3.4 The AS/RS efficiency

#### (i) Maximum efficiency under STC

The maximum efficiency of the triple-shuttle AS/RS is represented by 40 cycles/hour, in which the times for errors and repairs for equipment, the maintenance of equipment, and the loss of electrical power are not considered. The average sextuple command cycle time T(STC) was determined with a simulation analysis (see Figure 13).

#### (ii) Real efficiency under STC

The maximum efficiency is further multiplied by the efficiency reserve, which considers above mentioned restriction. By considering the coefficient of reserve efficiency, the real efficiency under sextuple command cycle is only 32 cycles/hour.

#### (iii) Average sextuple command cycle time and real throughput capacity

According to the real throughput capacity  $\lambda_{real}$ , the selected triple-shuttle AS/RS suit prescribed throughput capacity was found. The chosen S/R machine reached a  $\Delta\lambda^* = 6.67\%$  higher efficiency due to the prescribed throughput capacity.

#### 4 CONCLUSION

A discrete event simulation model of single- and multi-shuttle AS/RSs for the support of the design

mizami kot podpora postopku načrtovanja skladiščnih sistemov. Raziskani so različni elementi skladišča, kakor so oblika skladiščnega regala, zmogljivost regalnega dvigala in upravljalna strategija, z namenom določiti zmogljivost AS/RS z večpomičnimi mizami, glede na AS/RS z enojno pomično mizo. Za AS/RS z enojno pomično mizo smo uporabili strategijo naključnega skladiščenja in pravilo PPPP. Pri uporabi AS/RS z večpomičnimi mizami, strategija naključnega skladiščenja in pravilo PPPP več ne ustrežata načrtovanju, zato smo uporabili domiselno metodo "strategijo x". Največja prednost predstavljene metode je skrajšanje prazne vožnje regalnega dvigala pri ŠK in ŠEK.

Glede na odvisnost različnih oblik skladiščnih regalov v primerjavi z zmogljivostjo regalnega dvigala, smo ugotovili, da ima geometrijska oblika skladiščnega regala pomemben vpliv na povprečni čas delovnega kroga. Glede na zmogljivost regalnega dvigala, še posebej za skladiščne regale katerih oblika je ( $L/v_x \geq H/v_y$ ), načrtovalci skladišč ne morejo povečati pretočne zmogljivosti samo s povečanjem hitrosti regalnega dvigala. V takšnih primerih sta pospešek in pojemek, skupaj z majhnimi razdaljami, mejna dejavnika, ki lahko imata pomemben vpliv na ustrezno načrtovanje AS/RS. Torej, če želimo doseči zmogljiv AS/RS, moramo upoštevati tako geometrijsko obliko skladiščnega regala kakor tudi zmogljivost regalnega dvigala.

Povečanje pretočne zmogljivosti v mejah od 25 do 46 % lahko dosežemo za AS/RS z večpomičnimi mizami v primerjavi z AS/RS z enojno pomično mizo. V tem primeru moramo pri AS/RS z večpomičnimi mizami uporabiti domiselno metodo - "strategijo x". Poudariti moramo, da so AS/RS z enojno pomično mizo v znanosti deležni velikega zanimanja in so prisotni že v mnogih znanstvenih prispevkih. Glede na to, da ni veliko objav na temo AS/RS z večpomičnimi mizami, lahko predstavljeni rezultati dajejo uporabnikom v praksi želene informacije povprečnega časa delovnega kroga in načine za povečanje pretočne zmogljivosti. Uporabnost modela ni omejena samo na AS/RS majhnih delov, temveč je model uporaben tudi za AS/RS, pri čemer je osnova za TSE predstavlja paleto, ki nam v inženirski praksi predstavlja najpogosteje uporabljeno izvedbo.

process of a warehouse is presented in this paper. Various elements of the AS/RS were examined, for example, the layout of the SR, the efficiency of the S/R machine and the control policy, in order to investigate the efficiency of the multi-shuttle AS/RS in comparison with the single-shuttle AS/RS. For the single-shuttle AS/RS, a randomized storage-assignment policy and the FCFS request selection rule were used. Using the multi-shuttle AS/RS randomized storage-assignment policy and the FCFS request selection rule does not satisfy the design any more, therefore the heuristics strategy called "Strategy x" was applied. The main advantage of the presented heuristics is in the minimization of the empty travel of the S/R machine within QC and STC.

According to the relationship of different layouts of the SR in comparison with the efficiency of the S/R machine, it was pointed out that the SR geometry has a significant influence on the average cycle times. Further, according to the efficiency of the S/R machine, especially for those SRs whose shape is ( $L/v_x \geq H/v_y$ ), the designers could not increase throughput capacities simply by increasing the velocities of the S/R machine. In such cases the acceleration and deceleration along with small distances of the SR are the limiting factors, which could have a significant impact on the proper design of the AS/RS. Therefore, the designers should consider the SR geometry and the efficiency of the S/R machine simultaneously, in order to achieve an effective and efficient AS/RS.

The throughput-capacity improvements in the range 25 to 46 % for the multi-shuttle AS/RS could be achieved in comparison with the single-shuttle AS/RS. In this case, heuristics "Strategy x" must be used within the multi-shuttle AS/RS. It must be emphasized that the single-shuttle AS/RS is common in the engineering practice and is the subject of many research studies. However, since there are not so many publications on the multi-shuttle AS/RS, the presented results could give useful information on average cycle times and ways of increasing the throughput capacity. The practicability of the presented model is not limited only to the mini-load AS/RS but also to the AS/RS where the TUL is of a bigger size and a different shape.

## 5 OZNAKE 5 NOMENCLATURE

avtomatizirani regalni skladiščni sistemi	AS/RS	automated storage and retrieval systems
skladiščni regal	SR	storage racks
regalno dvigalo	RD/S/R	machine storage and retrieval machine
vhodni in izhodni položaj	V/I/I/O	input and output location
transportno skladiščna enota	TSE/TUL	transport unit load
pretočna zmogljivost	$\lambda$	throughput capacity
zalogovna velikost	$Q$	rack capacity

enojni delovni krog	EK/SC	single command cycle
kvadraten po času	SIT	square-in-time
dvojni delovni krog	DK/DC	dual command cycle
pravilo "prvi pride prvi odpremi"	PPPP/FCFS	"first-come-first-served" policy
pravilo "najbližji sosed"	NS/NN	"nearest neighbor" policy
štirikratni delovni krog	ŠK/QC	quadruple command cycle
šestkratni delovni krog	ŠEK/STC	sextuple command cycle
hitrost regalnega dvigala v vodoravni smeri.	$v_x$	velocity of the S/R machine in the horizontal direction
hitrost regalnega dvigala v navpični smeri.	$v_y$	velocity of the S/R machine in the vertical direction
pospeševanje/pojemanje regalnega dvigala v vodoravni smeri.	$a_x$	acceleration/deceleration of the S/R machine in the horizontal direction
pospeševanje/pojemanje regalnega dvigala v navpični smeri.	$a_y$	acceleration/deceleration of the S/R machine in the vertical direction
višina skladišnega regala.	$H$	height of the SR
dolžina skladišnega regala.	$L$	length of the SR
izmere skladišnega regala po času	$t_x, t_y$	dimensions of the SR in time
faktor velikosti za skladišni regal	$T$	the scaling factor for the SR
faktor oblike za skladišni regal	$b$	the shape factor for the SR
statistično povprečje časa vožnje regalnega dvigala za eno smer v skladiščnem regalu	$E(T(SA))$	the expected one-way travel time
statistično povprečje časa vožnje regalnega dvigala pri enojnem delovnem krogu	$E(T(SC))$	the expected single command travel time
statistično povprečje časa vožnje regalnega dvigala pri dvojnem delovnem krogu	$E(T(DC))$	the expected dual command travel time
statistično povprečje časa vožnje regalnega dvigala pri štirikratnem delovnem krogu	$E(T(QC))$	the expected quadruple command travel time
statistično povprečje časa vožnje regalnega dvigala pri šestkratnem delovnem krogu	$E(T(STC))$	the expected sextuple command travel time
statistično povprečje časa za izvedbo štirikratnega delovnega kroga	$E(QC)$	the expected quadruple command cycle time
statistično povprečje časa za izvedbo šestkratnega delovnega kroga	$E(STC)$	the expected sextuple command cycle time
povprečen čas vožnje regalnega dvigala za enojni delovni krog	$T(DC)_{\text{average}}$	average dual command travel time
povprečen čas vožnje regalnega dvigala za štirikratni delovni krog	$T(QC)_{\text{average}}$	average quadruple command travel time
povprečen čas vožnje regalnega dvigala za šestkratni delovni krog	$T(STC)_{\text{average}}$	average sextuple command travel time
povprečen čas dvojnega delovnega kroga	$T(DC)$	average dual command cycle time
povprečen čas štirikratnega delovnega kroga	$T(QC)$	average quadruple command cycle time
povprečen čas šestkratnega delovnega kroga	$T(STC)$	average sextuple command cycle time
povprečen čas vožnje regalnega dvigala	$T$	average travel time
standardni odmik	SD	standard deviation
največji čas vožnje regalnega dvigala,	Max. T	maximum travel time
najmanjši čas vožnje regalnega dvigala,	Min. T	minimum travel time
časi, ki so povezani z rokovanjem TSE	$\Sigma T_m$	times associated with the manipulation of the TULs
pretočna zmogljivost za dvojni delovni krog	$\lambda_{DC}$	throughput-capacity for dual command cycle
pretočna zmogljivost za štirikratni delovni krog	$\lambda_{QC}$	throughput-capacity for quadruple command cycle
pretočna zmogljivost za šestkratni delovni krog	$\lambda_{STC}$	throughput-capacity for sextuple command cycle
izboljšanje pretočne zmogljivosti za ŠK glede na DK	$\mu_{QC}^{DC}$	throughput improvement of QC in comparison with DC
izboljšanje pretočne zmogljivosti za ŠEK glede na ŠK	$\mu_{STC}^{QC}$	throughput improvement of STC in comparison with QC
izboljšanje pretočne zmogljivosti za ŠEK glede na DK	$\mu_{STC}^{DC}$	throughput improvement of STC in comparison with DC
največja zmogljivost AS/RS	$E_{f_{\max}}$	maximum efficiency
dejanska zmogljivost AS/RS	$E_{f_{\text{real}}}$	real efficiency
dejanska pretočna zmogljivost	$\lambda_{\text{real}}$	real throughput capacity



6 LITERATURA

6 REFERENCES

- [1] Banks, J., & S. J. Carson (1984) Discrete-event system simulations. *Georgia Institute of Technology*.
- [2] Bozer, A.Y., & A.J. White (1984) Travel-time models for automated storage and retrieval systems. *IIE Transactions*, 16 (4), 329- 338.
- [3] Brooks automation. (2001). *AutoMod-User manual V 10.0*. Utah.
- [4] Dieter, A. (1995) *Materialflusslehre-Grundlagen der Fördertechnik*, Transport und Logistik. Karlsruhe.
- [5] Graves, S. C., W.H. Hausman & L.B. Schwarz (1977) Storage retrieval interleaving in automatic warehousing systems. *Management science*, 23 (9), 935-945.
- [6] Gudehus, T. (1973) *Principles of order picking: Operations in distribution and warehousing systems*. Essen, Germany.
- [7] Han, M. H., L.F. McGinnis, J.S. Shieh & J.A. White (1987) On sequencing retrievals in an automated storage and retrieval system. *IIE Transactions*, 19, 56-66.
- [8] Hausman, H. W., B.L. Schwarz & C.S. Graves (1976) Optimal storage assignment in automatic warehousing systems. *Management science*, 22 (6).
- [9] Lee, H. F., S.K. Schaefer (1996) Sequencing methods for automated storage and retrieval systems with dedicated storage. *Computers ind. Engineering*, 32 (2), 351-362.
- [10] Keserla, A., & A.B. Peters (1994) Analysis of dual-shuttle automated storage and retrieval systems. *Journal of Manufacturing Systems*, 13 (6), 424-434.
- [11] Potrč, I., T. Lerher, J. Kramberger, M. Šraml (2003). Analytical and simulation approach for design of automated storage and retrieval systems. *International Journal of Simulation Modelling*, 2 (3), 70-77.
- [12] Material handling industry of America. (2004) Considerations for planning automated storage and retrieval system. <http://www.mhia.org.html>
- [13] Meller, D. R., & A. Mungwatana (1997) Multi-shuttle automated storage and retrieval systems. *IIE Transactions*, 29 (10), 925.
- [14] Vidovics, H. (1994) *Die Systemanalyse und Umschlagleistungen von Regalförderzeugen mit Mehrfachlastaufnahmemitteln*, Ph.D. Thesis. Graz, Technische Universität Graz.

Naslov avtorjev: prof. dr. Iztok Potrč  
mag. Tone Lerher  
dr. Janez Kramberger  
dr. Matjaž Šraml  
Univerza v Mariboru  
Fakulteta za strojništvo  
Smetanova ulica 17  
2000 Maribor  
iztok.potrc@uni-mb.si  
tone.lerher@uni-mb.si  
jkramberger@uni-mb.si  
sraml.matjaz@uni-mb.si

Authors' Address: Prof. Dr. Iztok Potrč  
Mag. Tone Lerher  
Dr. Janez Kramberger  
Dr. Matjaž Šraml  
University of Maribor  
Faculty of Mechanical Eng.  
Smetanova ulica 17  
SI-2000 Maribor, Slovenia  
iztok.potrc@uni-mb.si  
tone.lerher@uni-mb.si  
jkramberger@uni-mb.si  
sraml.matjaz@uni-mb.si

Prejeto: 28.8.2003  
Received:

Sprejeto: 30.9.2004  
Accepted:

Odrto za diskusijo: 1 leto  
Open for discussion: 1 year